

CIENCIA Y CRISIS ECONÓMICA

Cuando este número llegue a los lectores de Acta Científica y Tecnológica se habrá cumplido prácticamente un año desde que se constituyó el nuevo gobierno dirigido por el presidente Mariano Rajoy. Desde entonces se han producido importantes novedades en lo que afecta a una posible mejor gestión de la ciencia en nuestro país que ahora, en el marco de una situación de crisis económica, nos obliga a manifestar nuestra opinión como Asociación Española de Científicos (AEC). Así pues, ha llegado el momento cumplido ya este año de “rodaje”, del ya no tan nuevo gobierno, de que hagamos unas reflexiones y un somero balance al respecto sobre lo que nos afecta como científicos en la presente situación.

Cuando se formó el nuevo gobierno que ahora cumple un año de mandato, se produjo una importante novedad en su composición con la inclusión de la Política de Investigación Científica y Tecnológica dentro del Ministerio de Economía que pasó a llamarse esperanzadoramente como: Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO), en el que quedaron incluidas las acciones de estímulo y promoción de las actividades de tanto de las universidades como de los organismos estatales que se ocupan de la ciencia y de la innovación en España (OPIs), como es el caso del CSIC, CDTI, CIEMAT, ISCIII, etc., y que en buena medida desarrollan lo que desde ya hace unos años se viene designando con las siglas, más o menos afortunadas desde nuestro punto de vista de: I+D+i; es decir, lo que toda la vida se ha denominado como nuestra revista: Ciencia y Tecnología, pues entendemos que ambos términos implican *per se* la innovación en todos los aspectos de sus actividades.

Es un hecho evidente que tanto la ciencia como la tecnología han tenido a lo largo de su historia motivaciones económicas nada despreciables. Es un tópico señalar que en los albores de lo que conocemos como química moderna, los alquimistas no desdeñaban dedicarse a la obtención de oro a partir de ciertos metales. A lo largo de toda la historia de la humanidad, el desarrollo de productos, materiales, medicinas, sistemas, instrumentos, armamento, aventuras geográficas y ahora espaciales, etc. siempre ha estado revestido de una componente económica, no sólo por la utilidad de todo lo que podía desarrollar el conocimiento, sino por lo que implica su producción, comercialización y posterior disfrute al extenderse su uso a aplicaciones de todo tipo.

Esto ha sido así a lo largo de toda nuestra historia y especialmente durante la etapa del descubrimiento de nuevas tierras entre los siglos XVI y XVII. A diferencia de lo que pasó desde el siglo XVIII en el mundo anglosajón y germánico, de una manera totalmente atípica especialmente

desde el siglo XIX, España se automarginó del desarrollo científico. Este gravísimo error se ha visto reflejado a nivel popular en las tópicas imágenes acerca de “los sabios” que han supuesto más que una valoración de su actividad, la expresión de una cierta lejanía. Por tanto, la inclusión de las actividades de I+D+i dentro del ministerio estratégicamente más importante en estos momentos de crisis como es el de Economía con el “añadido” de Competitividad, nos pareció al principio realmente esperanzador porque implicaba que por primera vez en nuestra historia dicha actividad tendría una valoración y componente económicas reconocidas por el nuevo gobierno, y que como tal debía ir íntimamente ligada al planteamiento del desarrollo económico de nuestro país y más en momentos críticos. Incluso considerando que esta acción se planteaba en el contexto de una profunda crisis económica, este tipo de actividad debía favorecer otro “enfoque” de la realidad española. Desde ningún medio de comunicación hemos comprobado que se haya prestado atención a este ineludible factor. De una manera más pesimista, podría pensarse que es un tema al que no se concede la relevancia que sin duda va a tener en una España que aspire a un futuro razonable. De hecho, la actividad de I+D+i pasa de ministerio al rango de secretaría de estado.

Después de un año, lamentablemente no podemos ser optimistas y nos referimos para que se nos entienda bien: a las actitudes, más bien que a los resultados inevitables de un ajuste impuesto por las circunstancias. Y el problema es el mismo de siempre, no hay un compromiso real y serio por parte de nuestros líderes, que se traduce en la ausencia de una reflexión o incluso un debate sobre lo que implica desarrollar un país basado en la ciencia y la tecnología. Después de crear un Ministerio con un enfoque ciertamente “innovador”, no se puede limitar nuestra política en este terreno a aplicar en el caso de la I+D+i idénticos recortes que en otros sectores.

Desearíamos e incluso quisiéramos ser más optimistas y pensar que con esta adscripción ministerial se reconoce, por primera vez en nuestro país, que el cultivo y desarrollo de la ciencia y tecnología es una componente económica de primer orden para el desarrollo. Aunque el balance en cuanto a fondos asignados en los presupuestos del estado haya sufrido un importantísimo recorte, seguimos pensando que el adscribir “ciencia y tecnología” a un ministerio de economía y de competitividad, debería implicar necesariamente por parte del gobierno actual un compromiso serio de que se considere que “la ciencia es la clave del futuro de una nueva economía”. Los científicos estamos y queremos estar involucrados en la creación de riqueza y en la mejora de la calidad de vida a todos los niveles, ya que sin duda nuestra contribución puede ser uno de los recursos críticos para superar la situación actual. ■

Director: Jesús María Rincón López

Editor: Enrique Ruiz-Ayúcar

Consejo Editorial: Antonio Bello Pérez, María Arias Delgado, Ismael Buño Borde



Junta de Gobierno de la Asociación Española de Científicos (AEC).

Presidente: Jesús María Rincón López

Vicepresidente Primero: Alfredo Tiemblo Ramos

Vicepresidente Segundo: Alfonso Navas Sánchez

Secretario General: Enrique Ruiz-Ayúcar

Vocales: María Arias Delgado, Antonio Bello Pérez, José Luis Díez Martín, Fernando García Carcedo, Armando González-Posada, Sebastián Medina, Jaime Sánchez-Montero, Alfredo Tiemblo, Luis Guasch Pereira, José María Gómez de Salazar, Marcial García Rojo, Celia de la Cuadra, María del Carmen Risueño Almeida, Julio César Javier Tello Marquina.

Edita: Asociación Española de Científicos. Apartado de correos 36500. 28080 Madrid.

ISSN: 1575-7951. Depósito legal: M-42493-1999. Imprime: Gráficas Mafra

Esta revista no se hace responsable de las opiniones emitidas por nuestros colaboradores.

Sitio en la Red: www.aecientificos.es

Correo electrónico: aecientificos@aecientificos.es

ÍNDICE

El "bosón de Higgs" y los sueños
de una Teoría Final

JAIME JULVE 4

La percepción social de la ciencia
en un contexto de crisis económica.

Lo que la ciudadanía aprecia y por quién
JUAN CARLOS OLEA 10

El tren Talgo 250 híbrido

JOSÉ LUIS LÓPEZ GÓMEZ 13

Estación robotizada medioambiental
para la misión de la NASA MSL (Mars Science
Laboratory), REMS (Rover Enviromental
Monitoring Station)

EDUARDO SEBASTIÁN MARTÍNEZ¹,
MARÍA-PAZ ZORZANO MIER¹,
JAVIER GÓMEZ-ELVIRA¹, JOSÉ MORENO²,
ANTONIO PEÑA², JAIME SERRANO²,
EQUIPO REMS 20

Recubrimientos protectores de proyección
térmica para la industria aeronáutica

N. CINCA, J.M. GULEMANY 29

MEDICINA Y SALUD

Valor nutritivo de los insectos comestibles

J. TELLO, A. MORENO DÍAZ, C. RUIZ OLMOS
Y A. BOIX RUIZ 36

Importancia de los telómeros y la telomerasa
en cáncer, envejecimiento y medicina regenerativa

MIGUEL FORONDA, LUIS E. DONATE
Y MARIA A. BLASCO 39



“Veo el universo un poco más pequeño”

La manera de ver el futuro puede ser mirando las estrellas. Sólo así comprenderemos la misión de SENER en ingeniería aeroespacial: hacer más accesible el universo. Y facilitar el vuelo de satélites y vehículos espaciales, como venimos haciendo desde antes de que el hombre pisara la luna. Y conquistar el cielo sobre las alas de nuestras soluciones

aeronáuticas. O regresar a la tierra para desarrollar tecnologías y productos de concentración solar fotovoltaica, y tecnologías de defensa y seguridad. Incluso explorar lo más profundo del ser humano con nuestros avances en robótica médica, que amplían las posibilidades de la cirugía.



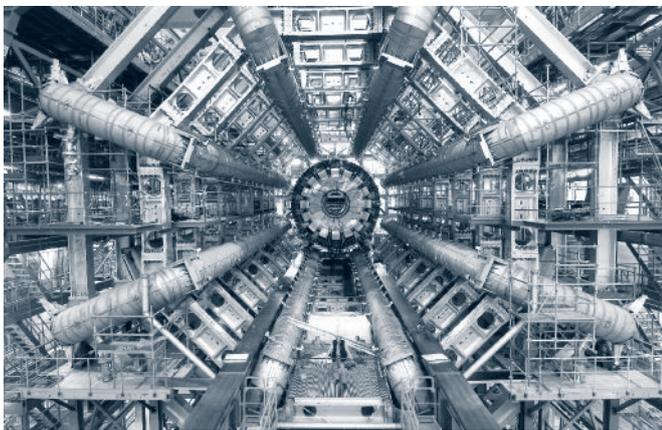
La manera de ver el futuro

El “bosón de Higgs” y los sueños de una Teoría Final

JAIME JULVE

Instituto de Física Fundamental. CSIC. Madrid

Está todavía caliente la noticia del hallazgo en el CERN de Ginebra del “bosón de Higgs”, la última pieza del Modelo Estándar de las Partículas Elementales¹ que faltaba por observar experimentalmente. Aunque algunas características no encajan completamente con lo esperado y llevará todavía algún tiempo de complejos análisis refinarlas, todo hace pensar que estamos probablemente ante la buscada partícula, esencial en el mecanismo teórico responsable nada menos que de generar la masa que tienen las demás partículas. Glosando a Ortega y Gasset, podríamos decir que en ciencia hemos alcanzado, si no la plenitud de los tiempos, sí un momento de éxtasis en la física de altas energías, la de lo más pequeño alcanzable experimentalmente. Aceptando la vigencia del reduccionismo para el estudio de los fenómenos de la naturaleza, habría que decir que se trata de un momento cumbre de toda la ciencia y quién sabe si del capítulo final por mucho tiempo.



Esta afirmación, no exenta de cierta voluntad polémica, agitará sin duda en sus sillas a los especialistas de otros campos, e incluso a los protagonistas directos del logro, que arriesgarían la muerte –o sea el fin del trabajo– víctimas de su propio éxito. Sin embargo con ella pretendemos más bien avivar un debate que impregna toda la historia de la ciencia, sin osar aventurar una respuesta concluyente, aunque sí insistir en la crítica de algunas esperanzas arraigadas o dogmas tácitos en la cultura popular de hoy y entre los cultivadores de la ciencia respectivamente.

UN CUADRO COMPLICADO

Para situar el problema, constataremos en primer lugar que, al menos entre los investigadores de las leyes fundamentales o últimas de la naturaleza, domina la convicción, al menos tácita, de la validez del esquema reduccionista, que culminaría en la existencia de una Teoría Final que todo lo explique de manera simple y condensada, adjetivos que para muchos son sinónimos de “bella”. Esta idea, espoleada por el éxito de Newton en reducir la mecánica celeste y el movimiento de los graves terráqueos a las mismas simples leyes, supone que la comprensión del todo se puede alcanzar mediante el análisis de las partes aisladas, o que la complejidad del mundo sensible se reconduce a leyes cada vez más profundas y simples. Nuestra tarea es ir desvelándolas, lo que hasta hoy se ha venido consiguiendo con notable éxito. En el paradigma actual, esta victoriosa marcha ha conseguido levantar sucesivos velos de la realidad partiendo de la Mecánica Clásica galileo-newtoniana



Arriba, detector ATLAS del LHC durante el montaje. Izquierda, criostatos de los imanes superconductores de curvatura en el anillo del acelerador LHC. Derecha, evento simulado de detección del bosón de Higgs en el detector CMS del LHC.

y su extensión a los campos continuos (electromagnetismo de Maxwell), para llegar a las Teorías Cuántica y de la Relatividad Restringida, teorías que reducen las primeras a aproximaciones de las segundas válidas en ciertos límites. La misma Termodinámica Clásica se reduce también a una teoría cinética, gobernada por la estadística de las interacciones entre muchas moléculas. Por último, la conjugación de las teorías cuántica y relativista en la Teoría Cuántica de Campos (QFT) constituye el armazón formal del Modelo Estándar de las partículas, cuyo triunfo estamos celebrando.

Aparcando de momento el tema de la gravitación y su paradigma de la Teoría de la Relatividad General, debemos decir enseguida que más allá del Modelo Estándar todo es especulación teórica que, para resolver los sucesivos problemas de consistencia que se plantean, necesita postular la existencia de cosas hasta hoy nunca observadas, tales como las partículas “supersimétricas” y dimensiones extra del espacio-tiempo. Esta escalada parece en cambio tener un punto de llegada matemáticamente consistente, la Teoría de Supercuerdas, el candidato más serio hasta el presente a ser la TOE (Theory of Everything), o sea la suspirada Teoría Final. ¿Hasta qué punto es esto plausible?

Para dar una cierta perspectiva del problema nos permitiremos una caricatura provocativa del reduccionismo, simbolizando en la Ecuación de Schrödinger la quintaesencia del comportamiento cuántico que se manifiesta en su plenitud en el ámbito atómico. Según ella la compleja fenomenología de la política sería deducible de las leyes de la sociología, éstas de las de la psicología de los individuos, que a su vez se reduce a la electroquímica del cerebro, o sea a la bioquímica, y ésta a la física molecular y atómica que ya se basan directamente en la famosa ecuación. Con un buen computador, podríamos saber el resultado de las próximas elecciones. Simbolizando en 1 m el tamaño del ser humano, la escala del átomo es del orden de 10^{-10} m, sólo diez órdenes de magnitud inferior, mientras las supercuerdas reinarían en la llamada Escala de Planck, allá por los 10^{-35} m, o sea 25 órdenes de magnitud por debajo del átomo. Esto haría el salto de la supercuerda al político algo más duro de creer, pero, al igual que la “fórmula de Drake” de la probabilidad de captar señales de vida inteligente en el cosmos, permite hilvanar algunos razonamientos clarificadores.

En efecto, la situación no es tan simplista. Entre el animal y el átomo tenemos niveles de organización tales como vísceras, tejidos, células, virus, proteínas, etc. Entre el átomo y la escala de Planck también hay estructuras intermedias. De entrada tenemos los núcleos atómicos (10^{-14} m) y dentro de éstos a los protones y neutrones (10^{-15} m), que ya se ha visto que tampoco son elementales al estar compuestos de “quarks”. Hoy por hoy estos últimos, los electrones, neutrinos y partículas similares, son los constituyentes últimos e indivisibles de la materia que se ha logrado atisbar hasta la resolución máxima alcanzable a las altas energías de los aceleradores de partículas, que con el LHC (Large Hadron Collider) del CERN llegará a los 10^{-20} m.

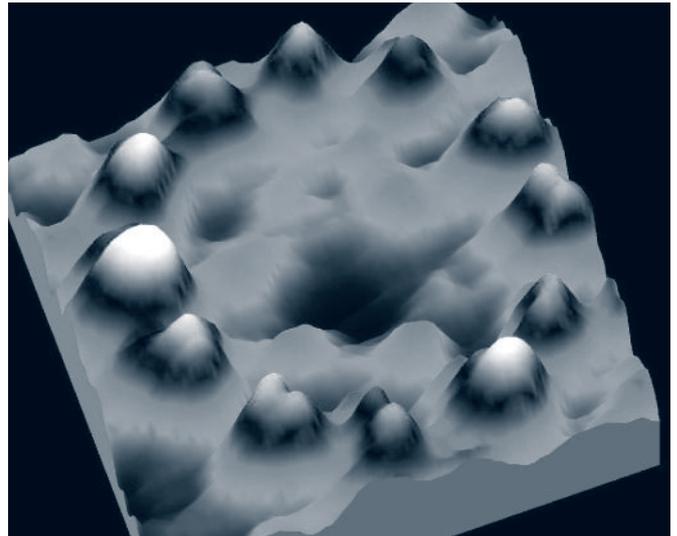


Imagen de microscopio de efecto túnel: círculo de átomos de Bromo sobre substrato de Silicio.

Sin embargo, desde el punto de vista de las leyes fundamentales, la cosa sí que se reduce –esto es el anhelo estético-filosófico de la ciencia– a términos bastante más simples: a la escala del hombre funciona con buena aproximación la Física Clásica, mientras que sus células están gobernadas por la bioquímica, o sea el resultado –se supone– sobre complejísimos sistemas de trillones y trillones de átomos de las leyes cuánticas que los gobiernan. La exploración desde el átomo para abajo requiere energías más altas y esto introduce en el juego a la relatividad, pero hasta la frontera hoy alcanzable con el LHC y lo que se ve en la radiación cósmica, reina soberano el Modelo Estándar, que como decíamos es una QFT. Sí, hay también estructuras intermedias como los núcleos atómicos, los protones, neutrones y partículas inestables hechas de quarks, pero no leyes nuevas. ¿Y no hay más?

En cuanto a teorías fundamentales, realmente poco más se espera que haya, accesible a la observación directa, más allá del Modelo Estándar. Únicamente allá por los 10^{-33} m, a sólo dos órdenes de magnitud de la escala de Planck, se debería manifestar alguna Teoría de Gran Unificación (GUT), modelo con los mismos protagonistas elementales y un grupo de simetría más amplio que implicaría la existencia de nuevas fuerzas entre aquéllos. Sería un reino demasiado lejano, de interés casi sólo filosófico, si no se esperara encontrar indicios observables a las modestas energías que nos es dado alcanzar. El principal efecto de las GUT sería la desintegración de protón, o sea la inestabilidad de la materia ordinaria –“los diamantes no serían para siempre”– pero nada se ha visto hasta hoy. De las supercuerdas² aún tenemos menos evidencias, aunque las partículas supersimétricas y las dimensiones extra serían indicios también clamorosos. Añadamos que en el cuadro de las GUT son concebibles partículas exóticas como los “Monopolos magnéticos” y Axiones, nunca observados tampoco, pero nuestra ignorancia sobre la constitución de tres cuartas partes del cosmos, componente obligada por la expansión acelerada que se observa, se halla en

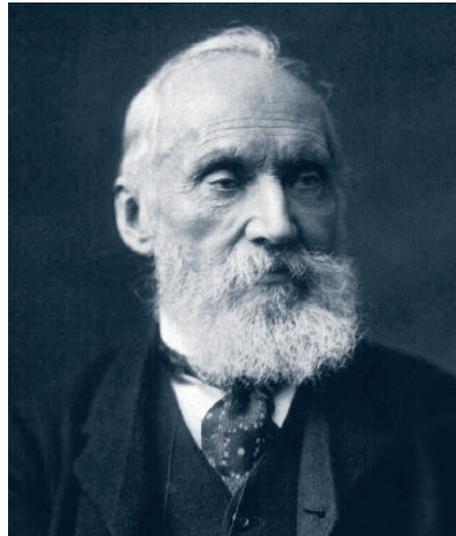
desesperada búsqueda de candidatos. Volviendo a poner los pies en la tierra, a la vuelta de la esquina del LHC y hasta la escala de energía de las GUT se prefigura un desierto de una docena de órdenes de magnitud en el que no se espera ver ninguna física fundamental nueva.

No queremos cerrar este apartado con una nota tan pesimista pues la naturaleza acostumbra a sorprendernos. Buscando el éter como medio en el que se propaga la luz se desveló la relatividad, y los misterios de la radiación del cuerpo negro alumbraron la teoría cuántica. Hoy la expansión acelerada del universo plantea enigmas aún más profundos que enlazan con el objeto de la investigación con aceleradores de partículas. En el camino de la verificación del Modelo Estándar aparecieron “partículas” inesperadas como las resonancias J/Psi, hoy interpretadas como efímeros nuevos estados ligados de algunos quarks. Ya el propio bosón de Higgs recién observado parece presentar algunas características intrigantes y quién sabe si persiguiendo las partículas supersimétricas o indicios de dimensiones extra, dentro del rango de los 14 TeV de energía del LHC, puede abrirse la ventana a nuevos escenarios insospechados. Apostar por ello con una futura máquina aún más potente y costosa no parece en cambio una propuesta muy factible en los tiempos que corren.

Desde el punto de vista teórico la situación parece sin embargo tan cerrada como insatisfactoria. El mundo físico conocido se describe, al nivel de las partículas elementales en la perspectiva reduccionista, con elevada precisión mediante el Modelo Estándar, y más allá de éste –GUT y teoría de cuerdas por antonomasia– todo es especulación, innecesaria para las necesidades experimentales. Por otro lado el modelo contiene numerosos parámetros empíricos, tales como la carga del electrón, su masa, la de los quarks, y un largo etcétera que supera la veintena, de modo que es poco creíble como teoría última, y más aún al dejar de lado la gravitación. Alguna realidad más fundamental debe haber, y el problema de la misteriosa materia oscura y otras sustancias cosmológicas que hay que invocar parece un indicio muy fuerte, sólo que la próxima revolución teórica, si ha de llegar, puede tardar un tiempo imprevisible. Para proseguir con nuestra reflexión supondremos en cambio que el avance no se detiene y que vamos acercándonos a una TOE –la teoría de cuerdas u otra– que todo lo explique en un esquema cerrado y completo. ¿Es concebible tal cosa o incluso esta posibilidad es sólo el sueño de una noche de verano?

LA TENTACIÓN DEL PASO AL LÍMITE

Antes de aventurar una respuesta al anterior interrogante detengámonos en algunas lecciones de la historia de la ciencia moderna. Desde Galileo –por fijar una fecha convencional– hasta hoy, en repetidas ocasiones se ha creído tener en la mano la teoría universal definitiva, para luego ser puntualmente desmentida al intentar llevarla hasta sus consecuencias más extremas. El momento actual no parece ser distinto.



Lord Kelvin

Empezaremos por la justamente venerada Mecánica Clásica. El éxito de Leverrier y Adams en predecir la existencia y posición de Neptuno elevó el prestigio de la teoría literalmente más allá de los cielos, animando a muchos a abarcar ámbitos en los que al final salía tocada hasta la misma condición humana. El determinismo mecanicista absoluto, eficazmente formulado por Laplace, establecía, coherentemente con las ecuaciones de Newton, que una vez conocido el estado –posición y velocidad– de todas las partículas del universo en un instante dado, es posible conocer con exactitud su estado en todo instante posterior, y lo mismo se puede decir hacia el pasado. El problema, si acaso, es el práctico de la potencia de cálculo para resolver las ecuaciones de un sistema de muchos cuerpos, pero ya para el sistema solar esto se consigue para períodos hasta de 10.000 años adelante y atrás en el tiempo. Lo importante en esta visión es que la evolución de un sistema, y por extensión la del universo en su conjunto y la de los que formamos parte de él, sigue leyes completamente deterministas. Adiós libre albedrío, responsabilidad y moral, ciertamente, pero era el precio de un momento de plenitud en la comprensión del universo. Recordemos que en el Siglo XIX Maxwell había cerrado brillantemente la teoría del electromagnetismo y con Boltzman se había logrado la unión entre la termodinámica y la mecánica mediante la teoría cinética de los gases. La tentación del paso al límite, la sensación de posesión del fruto del árbol de la sabiduría, llevó a personajes de la estatura de Kelvin a anunciar que, a falta de algunos detalles menores, la física estaba prácticamente acabada y sólo quedaba la tarea de medir con precisión creciente las constantes universales. Sólo que ... el diablo se escondía precisamente en los detalles.

Una visión más atenta de la dinámica newtoniana de sistemas de tres o más cuerpos, o incluso tan simples como el péndulo doble, muestra que las cosas en realidad no son tan categóricas. En estos sistemas una pequeñísima diferencia en las condiciones iniciales se traduce en poco tiempo en evoluciones muy distintas e impredecibles, el llamado comportamiento caótico que ejemplifica el popular “efecto mariposa”. Salvar el paradigma determinista requeriría una precisión infinita en el conocimiento de esas condiciones, de nuevo una idealización

extrema, que además chocará enseguida con las leyes cuánticas. Así pues hay que aceptar que, salvo en contados sistemas muy simples, normalmente usados como ejemplos académicos, en los sistemas reales se da al menos una peculiar forma de indeterminismo. En el frente de la física estadística y la teoría de la radiación, última playa evolutiva de la vieja Termodinámica, el principio de equipartición de la energía en los grados de libertad también conducía a un absurdo: en la radiación térmica de los cuerpos casi toda ella debería emitirse a altas frecuencias, la llamada “catástrofe ultravioleta”, lo que por supuesto no se daba en la realidad. Para completar la crisis del sueño decimonónico, la suposición de que las ondas electromagnéticas se tenían que propagar necesariamente en un medio, análogamente a como lo hacen las olas en el agua o el sonido en el aire, requería invocar un “éter”, ligerísimo e impalpable, de modo que todo lo penetrase, pero al mismo tiempo mucho más rígido que el acero. Superfluo es decir que los experimentos encaminados a detectarlo, midiendo la velocidad del laboratorio (o sea de la Tierra) respecto del mismo, no condujeron a nada sino a una sorpresa aún mayor: que la velocidad de la luz era la misma se moviese como se moviese el laboratorio y la fuente de luz.

A grandes problemas, grandes soluciones, pero este fácil aforismo no se cumple sin el concurso de la chispa del genio creador, que acampa entre los humanos sólo cuando el destino quiere, y muchos siglos hubieron de pasar desde Aristóteles hasta Galileo. En este caso Planck, Einstein, y los que vinieron en su estela, alumbraron las teorías cuántica y relativista, con el conocido anecdotario de la no creencia del último en la primera. Es innecesario describir aquí el contenido y los éxitos, que duran hasta hoy, de estas teorías, pero nos detendremos en cambio en comentar las dificultades que surgen si cedemos a la tentación de llevar su aplicación hasta los límites extremos.

La Relatividad Restringida es la que sale mejor parada. Es una construcción bella y exquisitamente determinista como la mecánica newtoniana, a la que trasciende de manera muy elegante elevando a propiedad universal del espacio-tiempo la peculiar simetría que presentaban las ecuaciones del electromagnetismo de Maxwell. Hasta hoy no conoce fisuras ni inconsistencias teóricas de relieve, ni hay el menor indicio de que la naturaleza la viole en alguna rara situación. La recentísima polvareda mediática de la superación del límite de la velocidad “ c ” de la luz en el vacío por neutrinos disparados desde el CERN hasta los laboratorios del Gran Sasso en Italia, se ha disipado al hallarse la causa técnica del que habría sido un demoledor resultado y c sigue siendo una barrera absoluta. El mundo relativista implica que el tiempo fluye de manera distinta según los observadores, la simultaneidad se hace también relativa y hay aparentes paradojas como la de los gemelos, pero nada en esto es absurdo o inconsistente. Puede ser, a lo más, sorprendente, pero los laboratorios confirman las predicciones más allá de toda duda razonable.

Distinta es la situación con la Teoría Cuántica. Lo primero que hay que decir es que desde el punto de vista cuantitativo

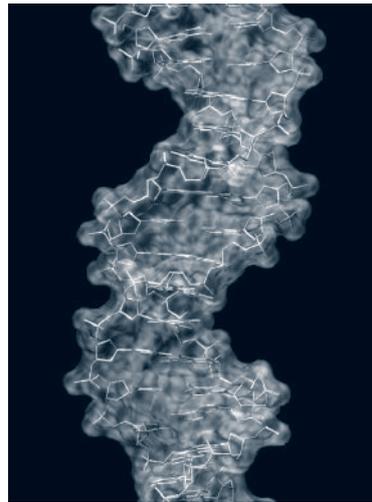
“funciona” mejor que ninguna otra, en los ámbitos para los que se creó, y se apunta éxitos en todos los frentes a pesar de paradojas como la del “gato de Schrödinger” y negar conceptos tan arraigados y naturales como el del realismo local. Puesta a prueba en este terreno (desigualdades de Bell), ha salido siempre victoriosa frente a alternativas con variables ocultas. Parece completa. Desmontó por su base el determinismo mecanicista al impedir conocer simultáneamente y con absoluta precisión la posición y la velocidad de una partícula, explicó la radiación térmica del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico y la estructura del átomo. La energía atómica, el láser, la microelectrónica, la RMN, los superconductores, hablan por ella. Muy bien, pero el inconveniente grave es que “no se entiende”, y ya el gran Richard Feynman dedicó palabras poco elogiosas a quienes se atreven a presumir de lo contrario. La interpretación canónica –la de la “escuela de Copenhague”– es de naturaleza estadística: la medición de una variable física la hace un observador externo –“clásico”, precisaríamos– sobre un conjunto de sistemas cuánticos idénticos, que se describe mediante una “función de onda”, y los posibles resultados se obtienen con determinadas probabilidades. Al medir, la función de onda “colapsa” –inevitable perturbación– en un estado particular para cada resultado, de manera postulada pero no explicada. Si en un sistema cuántico que tiene partes hacemos una medida o manipulación sobre una de ellas, la otra (se dice que está “entrelazada” con la primera) se entera instantáneamente por alejada que esté (fenómeno de la “no localidad” ejemplificado por la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen), creando problemas de conciliación con el dogma relativista. No es extraño que Einstein la hubiese mantenido siempre bajo sospecha a pesar de que en parte fuese hija suya.

Es en el paso a límite de la aplicación a la cosmología donde encontramos algunos de los problemas más llamativos del paradigma cuántico. Si la teoría ha de ser “universal”, o sea siempre válida, se ha de poder aplicar al universo como un todo, no sólo a los átomos. Salvo que invoquemos la existencia de universos paralelos –una de las soluciones al problema citado del colapso de la función de onda y de paso al del “principio antrópico”– nos encontramos con el primer escollo de que ahora tenemos sólo un sistema, no el conjunto estadístico anterior. Otra dificultad añadida sería que nosotros, los observadores que hacemos medidas, formamos parte de él. Si la “función de onda del universo” (o sea su estado cuántico primigenio) describe un conjunto de potencialidades de existir de diferentes formas (por ejemplo con distintas constantes físicas o incluso distintas dimensiones), entonces el universo que conocemos existe como resultado de un acto de observación, presumiblemente el efectuado por nosotros al escrutarlo. Con otras palabras, el universo viviría en un limbo de potencialidades y precipitaría (“colapsaría”) en la existencia real, o sea con características dadas, sólo cuando “alguien” lo observase. Queda menos claro si por observador se deba entender algún ser dotado de inteligencia o conciencia, o si bastaría un animal que mire con curiosidad el cielo estrellado. Los universos paralelos parecen una fantásica huída hacia delante, pero no es fácil encontrar soluciones más realistas sin recortar las alas a la teoría. Ha tenido notable eco mediático

otra reciente propuesta de Alexander Vilenkin según la cual en el Big Bang el universo habría saltado a la existencia desde algo equivalente a la nada a través de un “efecto túnel” cuántico. El tal efecto, bien conocido teórica y experimentalmente, obliga a suponer que la teoría cuántica precedería al universo. Llevando al límite otras ideas modernas, dado que esta teoría, como cualquier otra, es un corpus de leyes, o sea información codificada de alguna manera, cada bit de información necesita siempre de algún soporte energético mínimo. O sea que la nada primigenia no era la nada. Difícil dilema.

Antes de abordar el problema abierto de la conciliación entre el mundo cuántico y el de la gravedad, es obligada la mención del gran paradigma de la gravitación de la Teoría de la Relatividad General. Cumbre exclusiva de la genialidad einsteniana, catedral determinista que traduce la atracción gravitatoria a geometría no euclídea del espacio-tiempo, ha conocido y conoce espectaculares confirmaciones en astrofísica –los famosos “experimentum crucis”³ y la previsión de los agujeros negros y las ondas gravitacionales– pero su estructura está dotada de una belleza “clásica” que muchos consideran fatal al condenarla a reinar solitaria e incompatiblemente respecto del Modelo Estándar. Apuntaremos aquí solamente las perplejidades que surgen al aplicarla, de nuevo, al ámbito cosmológico. A parte de que la propia noción del tiempo se desdibuja aún más en él, es conocida la historia de la predicción de la expansión del universo, de la amargura de Einstein por haber introducido artificiosamente la “Constante Cosmológica” para evitarla cuando poco después las observaciones de Hubble la confirmarían. Quizá es menos conocido el descubrimiento reciente de que esa expansión se está acelerando y es aquí donde el paradigma de la RG nos lleva a las cosas más extrañas. Explicar el movimiento local de las galaxias exigía ya la existencia de una abundante y misteriosa “materia oscura” –además de invisible, en gran parte no hecha de átomos o partículas ordinarios– pero la aceleración observada de la expansión implicaría que tres cuartas partes del contenido del universo corresponden a una sustancia cosmológica –ya no se puede llamar materia a eso– que en parte puede resucitar a la polémica Constante y, por demás, estaría dotada de propiedades tan exóticas como presiones y temperaturas negativas. Son las llamadas “energía oscura” y “energía fantasma”, inevitablemente evocadoras de la peripecia del viejo éter.

Concluiremos esta sección con una incursión en las ciencias de la vida a través del Paradigma Probabilista, que permite el salto desde mundo elemental cuántico –la relatividad es normalmente prescindible en este ámbito– a la complejidad. Integra las visiones cuántica, la estadística de Boltzman y la de Darwin –implementada por la genética moderna basada en el ADN que Monod bien sintetiza en “El azar y la necesidad”– afirmando que bajo toda la realidad física, desde la partícula elemental al ser vivo, subyace el indeterminismo absoluto, el caso inmanente. Por mucho que le disgustase a Einstein, los dados serían definitivamente el juego preferido de Dios. Para sistemas suficientemente homogéneos, como un gas, la indeterminación, equiprobabilidad e independencia estadística del evento elemental,



La doble espiral del ADN. En su copia durante la división celular o por otros factores pueden producirse errores aleatorios.

produce leyes macroscópicas deterministas (Termodinámica), pero en sistemas más complejos, como la vida y su evolución, la casualidad de las mutaciones se traduce, mediante la selección natural, en la deriva genética y en una ausencia de finalidad, de proyecto, en ella. Afirma así –y aquí está la operación del paso al límite– nuestra contingencia absoluta y el sinsentido de la responsabilidad de nuestros actos. Sin duda para la evolución de las especies el esquema tiene gran eficacia descriptiva y captura una parte importante de la verdad, pero a nuestro entender adolece de los mismos eslabones débiles que presenta la cadena de factores de la fórmula de Drake, en la que la asignación de un valor a la probabilidad de que surja la vida en un ambiente prebiótico y una especie inteligente en una biosfera con animales superiores, es completamente arbitraria a falta de una suficiente muestra estadística de planetas con vida y de civilizaciones en el cosmos. De ambas cosas, hoy por hoy, sólo conocemos un ejemplo. En extrema síntesis, quedaría espacio para que, jugando a los dados, “Dios haga trampas” al servicio de un proyecto sin que podamos detectarlo científicamente, y la negación de esta posibilidad no pasa de ser un postulado o un ejemplo de “wishful thinking”.

¿UNA TEORÍA FINAL?

Porfiemos todavía en este obligado empeño que ha inspirado siempre el quehacer científico. Por encima del Modelo Estándar, o precisamente por sus éxitos –paragoraríamos el descubrimiento del bosón de Higgs al de Neptuno–, es más acuciante que nunca el problema de conciliar la teoría cuántica y la gravitación de forma matemáticamente consistente. Dejando aparte la cuestión general de la verificación experimental –o de la falsabilidad en el sentido de Popper– y la particular del tipo de gravedad que describe, la Teoría de Supercuerdas parece el más firme candidato para ello, de nuevo a falta sólo de resolver algunos “detalles menores”, y es seguramente la propuesta más completa, potente y atractiva. Aceptémoslo y añadamos los progresos habidos en la comprensión de la frontera entre los dos reinos con la evaporación cuántica de los agujeros negros y sus balances de entropía e información. Ante este escenario, Stephen Hawking volvía a manifestar, cien años

después de Kelvin, que la TOE está ya al alcance de la mano. Pero ¿qué significa tal cosa?

De una Teoría Final se debe esperar al menos una serie de virtudes: que dependa a lo sumo de una sola constante universal empírica –o mejor aún, que ésta sea deducible de relaciones topológicas o similares–, que sea capaz de predecir todo experimento u observación posible o imaginable ahora y en el futuro, y que esté formulada sobre un formalismo matemático consistente y posiblemente cerrado, pues para los humanos sigue vigente la sentencia galileana de que el libro de la naturaleza está escrito en esos caracteres. Una TOE debe ser pues “completa” en el sentido que se acaba de describir.

No parece que las cosas puedan ser así y ciertamente no lo están al menos en lo que se refiere a la completitud del soporte matemático. El lógico-matemático austriaco Kurt Gödel probó en 1931 que para sistemas formales que tengan al menos la complejidad de la aritmética, existen siempre proposiciones dotadas de sentido cuya veracidad o falsedad no se puede decidir con los axiomas y reglas del sistema. Este demoledor resultado, respuesta negativa a un famoso problema planteado por David Hilbert, ha pasado a la historia como el “Teorema de incompletitud de la lógica”, sin duda una cumbre del pensamiento humano de todos los tiempos a la que se ha dado muy poco relieve, probablemente porque desmonta muchos mitos. En el terreno contiguo de la computabilidad algorítmica otros lógicos han demostrado además que el de las las funciones no computables supera al de las computables.

En estas condiciones parece claro que es indemostrable que la naturaleza no nos pueda sorprender nunca con un comportamiento nuevo, o sea fuera de las previsiones de la presunta TOE en vigor, precisamente porque involucre alguna proposición indecidible para el soporte matemático de esa TOE que, como mínimo, incluirá a la aritmética. El problema de la misteriosa correspondencia entre las matemáticas –universo platónico de entes de razón– y la realidad física nos llevaría



Stephen
Hawking

demasiado lejos y supera a estas reflexiones y a su autor. Nos limitaremos a constatar que para algunos la Teoría Final es un sueño apetecible mientras para otros sería una jaula asfixiante. Estimamos que lo importante es trabajar en pos de ella con el entusiasmo de la fe en poder alcanzar tan elevada meta, o con la convicción de que la aventura va a continuar eternamente con puertas abiertas al misterio y a sorpresas, pero siempre con cautela hacia los peligros de los apresurados y seductores pasos al límite que acechan en el camino. ■

NOTAS

¹ El Modelo Estándar unifica las interacciones Electromagnética y Nuclear Débil en una sola, llamada “Electrodébil”, e incluye a la “Cromodinámica Cuántica” que describe la interacción Nuclear Fuerte. Es un ejemplo concreto de Teoría Cuántica de Campos.

² Existe una evolución de las GUT que une la gravedad con las otras interacciones en una QFT llamada Gravedad Supersimétrica (SUGRA). Cumple varios requisitos matemáticos de consistencia, pero ya al precio de invocar nuevas partículas “supersimétricas” y dimensiones espacio-temporales extra. Sería la teoría efectiva más inmediata a la Teoría de Cuerdas, la realmente fundamental en este sentido, y, a los efectos de nuestras reflexiones, no las distinguimos.

³ Se trata de i) la precesión del perihelio de las órbitas planetarias, observable en el caso de Mercurio, ii) la curvatura de los rayos de luz por los campos gravitacionales, observada en la luz procedente de estrellas cerca del disco solar, iii) el “corrimiento al rojo” gravitacional, modificación de la frecuencia de la radiación observada por efecto Mossbauer en rayos gamma y crucial para la sincronización del sistema GPS. Mayores explicaciones en Internet con esas palabras clave.

BIBLIOGRAFÍA

Nosotros y el Universo, A. Tiemblo, Ed. Edaf, Madrid, 2011.

Excursión por los distintos ámbitos teóricos del macro y microcosmos desde la perspectiva de la aventura humana del conocimiento.

Los científicos y Dios, A. Fernández-Rañada, Ed. Nobel, Madrid, 2000.

Muestrario de Premios Nobel y pensadores de la historia donde creyentes y no creyentes argumentan sus posiciones sobre los límites del conocimiento humano.

La nueva mente del emperador, R. Penrose, Ed. Delbolsillo, Barcelona, 2009.

Exposición de los grandes paradigmas de la física, con un relevante capítulo autocontenido dedicado al Teorema de Gödel.

The trouble with Physics, Lee Smolin, Penguin, UK, 2007.

Discusión de las limitaciones de la teoría de cuerdas, en particular su no inclusión de la gravitación en la forma “background-independent” propia de la Relatividad General, y descripción de otras propuestas teóricas alternativas.

El azar y la necesidad, J. Monod. Ed. Barral. Barcelona. 1971.

Texto paradigmático sobre la explicación de la evolución biológica basada en la aleatoriedad de las mutaciones en la transmisión del patrimonio genético, codificado en el ADN, y la presión selectiva favorecedora de las variantes más aptas para la supervivencia.

Internet. Para numerosas cuestiones específicas y términos clave en este trabajo es útil la información disponible en Internet, con la obligada cautela sobre la fiabilidad y el rigor de la misma.

La percepción social de la ciencia en un contexto de crisis económica.

Lo que la ciudadanía aprecia y por quién

JUAN CARLOS OLEA

Director de la Cátedra de Psicología de la Convivencia del Instituto Humanista Comunicación para el Bienestar. Director del Instituto Ciencia y Sociedad. Presidente de www.Convivir.info

La percepción social de la ciencia es un tema de gran actualidad en estos tiempos en que los denominados “medios” inundan nuestras actividades diarias, y además concomitante con algunos de mis más cotidianos quehaceres. Cierta número de documentos de coyuntura han visto la luz recientemente al respecto y por ello nos podemos permitir un diagnóstico actualizado, aunque modesto en su formato y alguna reflexión que lo complementa en relación a temas de los que empezamos a escuchar discurrir hace más de 30 años. España, hoy, es una nación desarrollada y una región que coadyuva junto a muchas otras a la sostenibilidad de Europa: el lugar en el que mejor se vive en el mundo. Ahora bien, dentro de ese marco de relativo bienestar, diferencia a nuestra sociedad la educación y la ciencia. Cierta es que, respecto a lo que nos ocupa, desde 1998 hasta 2005, el gasto en investigación y desarrollo, (I+D) se duplicó y que en los dos años siguientes creció un 35% llegando a incrementos del 40% en el ámbito empresarial, pero también es cierto que, a pesar de ello, al segundo milagro español, (turismo, fondos de cohesión y ladrillo) le ha sobrevivido una cultura productiva subyacente en la que el fracaso educativo y la indolencia innovadora, efectos ambos del corporativismo, medran, por razones suficientemente conocidas.

En 2007 la productividad en España era un 25% más baja que la de Estados Unidos y un 20% más baja que la del conjunto de la Europa del euro. Ahora aumenta debido a los niveles de paro. Sabemos que investigación y desarrollo científico, innovación, productividad, competitividad, empleo..., tienen bastante que ver y eso la ciudadanía lo aprecia.

La V Encuesta Bianual de Percepción Social de la Ciencia realizada, a finales de 2010, por la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, (FECYT) señala que Ciencia y Tecnología ocupan el cuarto lugar entre las prioridades ciudadanas para implementar el gasto público, frente al sexto lugar que ocupaban en la II encuesta realizada en 2006. Hoy, El 77% de la población es partidaria, a pesar del contexto económico, de aumentar o mantener el presupuesto en I+D.

Desde 2008, año de realización de la IV encuesta FECYT, el interés de la población española por la ciencia ha crecido un

36%, pasando del 9,6% al 13,1%. Además, desde dicho año ha crecido un 10% el número de personas que asocian el progreso científico al desarrollo económico y un 20% los que lo asocian al empleo. También se ha incrementado un 25% el porcentaje de españoles que piensan que la ciencia contribuye a reducir las diferencias entre países ricos y pobres. La ciudadanía aprecia, pues, el potencial económico de la ciencia y entiende que sin I+D no hay salida, ya, a ninguna crisis.

En 2000 el estallido de la burbuja punto-com dejó un inmenso capital suelto. Tras el 11-S los americanos tiraron el precio del dinero para animar a un sistema económico en estado de shock. La confluencia de ambas circunstancias, dinero barato y necesidad de colocarlo, abrió el crédito a sectores escasos de solvencia. Se titulizaron esos créditos y se comercializaron por todo el mundo. Menudeó el apalancamiento. Se recalentó la economía. Creció la inflación. Subieron los tipos de interés para controlar la inflación. La gente no podía pagar al banco. Los embargos devaluaron activos. Los títulos no valían nada. Crack. Se corta el crédito y “catacrack”. El que vivió por encima de sus posibilidades es el sistema financiero.

Casi todas estas cosas se nos ocurren dándole alguna vuelta a lo que los tertulianos nos han venido diciendo de 2008 a 2010. Y los tertulianos y los expertos que se habían equivocado, que son los que había, también decían, cuando les invitaban a las tertulias, que durante la bonanza económica no se hizo, en España, lo suficiente por la educación y por la ciencia y en eso no se equivocaban y hablaban, atemorizados, de un pacto por la educación y de una nueva ley de la ciencia.

Eso es lo que refleja la V Encuesta Bianual de Percepción Social de la Ciencia realizada, a finales de 2010, por la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, (FECYT) al mostrar un espectacular aumento del interés de los ciudadanos por dichos temas. Sin embargo, cuando esto pase, olvidaremos. Ojalá no se pierda otra década. Se perdió una entre milenios.

Por primera vez desde que se realiza el sondeo FECYT son más los españoles que consideran aceptable la educación recibida en ciencias, que aquellos que creen que ha sido escasa. ¿Ayudará esa sensibilidad latente a no olvidar, a pesar de que la supongamos ausente en el 26% de los adolescentes educandos, superdotados incluidos, que, año a año, engrosan las bolsas del fracaso escolar? ¿Estaremos capacitados para ajustar

nuestro nivel de productividad a nuestro nivel de vida o viceversa? Esas dudas las expresan algunos ciudadanos cuando se preguntan: así ¿podremos vivir mejor?

Los resultados señalan que los consultados aseguran tener menos información sobre ciencia y tecnología de la que les gustaría. La encuesta pone de manifiesto un desfase entre el interés que manifiestan los encuestados y la información que poseen en temas de ciencia y tecnología. La televisión es la fuente más importante de información científica y tecnológica, pero Internet duplica en cuatro años su penetración como canal predilecto. El 66,8% califica la información científica en internet de suficiente y ya es el canal más usado entre los menores de 34 años.

La consulta destaca el prestigio de los científicos que son, con los profesionales de la salud, los más valorados. La percepción de los encuestados sobre Ciencia y Tecnología es moderadamente positiva. Seis de cada diez consideran que los beneficios de la Ciencia y la Tecnología son mayores que los perjuicios. En cuanto a las áreas en las que los ciudadanos piensan que deben concentrarse los esfuerzos en investigación, la salud es señalada de forma prioritaria, seguida de fuentes energéticas y medioambiente. El dato sobre áreas nos hace apreciar un cierto sesgo tecnológico al respecto. Verbi gracia, leímos en internet y oímos en alguna televisión que podemos vivir más y más saludablemente y ahora queremos tener larga vida y salud. Eso es demanda de innovación.

Innovación, que es concepto fuerza en el marco de la percepción social de la ciencia, tal y como el sondeo de la FECYT manifiesta. Sabemos quienes transitamos nuestra publicación. No obstante, por si algún ejemplar fuese a parar a la sala de espera de un consultorio clínico, lo cual nos honraría, fijaremos unas mínimas bases conceptuales, utilizando para ello fuentes convencionales (Diccionario de la Real Academia de la Lengua, Manual de Frascati...). La "racional exuberancia" del quehacer científico coetáneo, globalizado y en aceleración histórica sin precedentes, dada su difusión, nos lo aconseja.

Conocimiento científico es el que proporciona el método científico. *Método científico* es el procedimiento fijado de antemano por una disciplina con el fin de alcanzar conocimientos válidos. *Investigación científica* es la búsqueda de conocimiento mediante métodos científicos. *Ciencia* es, en sentido amplio, el conocimiento sistematizado referido a cualquier campo. *Técnica* es un procedimiento o conjunto de reglas, normas o protocolos, que tienen como objetivo obtener un resultado determinado en cualquier actividad. *Tecnología* es el conjunto de conocimientos técnicos, ordenados científicamente. *Las actividades científicas y tecnológicas*, (UNESCO) son la investigación y el desarrollo experimental, I+D más la enseñanza y formación científica y técnica y los servicios científico y técnicos, siendo estos últimos las actividades de ciencia y tecnología de bibliotecas y museos, traducción y edición de literatura en ciencia y tecnología, control y prospectiva, recogida de datos

sobre fenómenos socioeconómicos, ensayos, normalización y control de calidad, asesoramiento a clientes y servicio de asesoría, actividades en materia de patentes y licencias a cargo de las administraciones públicas. *La I+D* comprende el trabajo creativo llevado a cabo de forma sistemática para incrementar el volumen de conocimientos incluido el conocimiento del hombre, la cultura y la sociedad y el uso de esos conocimientos para crear nuevas aplicaciones. La investigación (I), en el marco de la I+D, se clasifica, según sus características, en investigación básica, investigación orientada e investigación aplicada. *La investigación básica* consiste en trabajos experimentales o teóricos que se emprenden fundamentalmente para obtener nuevos conocimientos acerca de los fundamentos de fenómenos y hechos observables, sin pensar en darles ninguna aplicación o utilización determinada; esta referencia es crucial, ya que el ejecutor puede no conocer aplicaciones cuando hace la investigación o responde a encuestas. *La investigación básica orientada* se lleva a cabo con la idea de que producirá una amplia base de conocimientos susceptibles de constituir un punto de partida que permita resolver problemas ya planteados o que puedan plantearse en el futuro. *La investigación aplicada* está dirigida fundamentalmente hacia un objetivo práctico específico. Este tipo de investigación implica la consideración de todos los conocimientos existentes y su profundización, en un intento de solucionar problemas concretos.

El desarrollo experimental es un trabajo sistemático, basado en el conocimiento existente obtenido de la investigación y de la experiencia práctica, que va dirigido a la producción de nuevos materiales, productos o dispositivos, a la puesta en marcha de nuevos procesos, sistemas y servicios, o a la mejora sustancial de los ya existentes.

Hay muchos problemas teóricos y prácticos, asociados a estas categorías, las cuales parece que atribuyen a las actividades de I+D una secuencia y una separación que raramente se dan con nitidez. Por ejemplo, la distinción, en algunos casos, entre investigación básica orientada e investigación aplicada. Por ello, en un informe que he tenido la satisfacción de realizar para COTEC, plantease conceptualizar la investigación aplicada como investigación aplicada orientada a desarrollo experimental.

Innovación es un cambio basado en conocimiento científico que genera valor económico. Las actividades de innovación son un conjunto de etapas científicas, tecnológicas organizativas, financieras y comerciales, incluyendo las inversiones en nuevos conocimientos que llevan o que intentan llevar a la implementación de productos y de procesos nuevos y mejorados. La investigación, el desarrollo experimental y la innovación (i), articulan el denominado I+D+i.

La I+D+i es una actividad económica, entendiéndose por tal a aquella que da lugar a la producción de bienes y servicios para su venta.

El sistema de innovación es una herramienta de análisis, una forma de ver el proceso innovador como un conjunto de agentes o subsistemas que interactúan entre sí para la creación y uso del conocimiento económicamente útil. Los dos principales son el tejido empresarial y el entorno, configurado, este último, por la interacción de las instituciones educativas, financieras, legislativas, el mercado y la cultura de la población, los servicios, la investigación pública, el tejido productivo, las administraciones. La innovación puede ser implícita o explícita.

Nos atrevemos a relacionar la innovación implícita con las actitudes creativas de actores implicados en procesos productivos. Debemos fomentarla en su lugar, es decir en el impulso de una cultura y un orden productivos, en los que la creatividad sea un valor a favorecer y a entrenar de forma explícita.

En el ámbito de la innovación explícita, la que se despliega en unidades insertadas en el sistema de Innovación, la investigación básica orientada, aplicada, el desarrollo experimental y la innovación sólo adquieren sentido, articuladas proactiva y retroactivamente en dicho sistema.

Aunque la investigación básica no se ocupe de su aplicabilidad más allá de los procesos que le son propios, sin ella no sería posible la I+D+i. Este último párrafo no lo aprecia la ciudadanía. ¿Le interesa a la investigación básica cambiar esa tendencia?

Cerca de dos mil quinientos investigadores de más de 160 instituciones y organismos científicos has suscrito, en marzo de 2011, una carta presentada al Presidente del Gobierno de España, a la Comisión de Ciencia y Tecnología del Congreso y difundida en agencias de noticias, medios de comunicación y en Facebook. Todos ellos coinciden en que los recortes presupuestarios decididos como consecuencia de la crisis económica van a provocar pérdidas de competitividad y de credibilidad de la política científica española, lo que dificultará la configuración de un modelo productivo basado en el conocimiento.

Se insiste, así mismo, en que el recorte presupuestario no debe afectar desproporcionadamente a la I+D y en que se mantenga o aumente su porcentaje con respecto al producto interior bruto, PIB. Los firmantes de la misiva proponen un pacto de Estado que permita planificar a largo plazo los recursos humanos y financieros en investigación. Según la consulta FECYT, lo anterior sí lo aprecia la ciudadanía.

Alguna consideración, en fin, sustentada en un breve fragmento entresacado de la presentación del informe COTEC 2010 sobre Tecnología e Innovación en España. Allí se dijo: "A partir de ahora, entenderemos la innovación, como el proceso que hace que toda la sociedad contribuya a un mayor y mejor uso del conocimiento para lograr un mayor bienestar. Y entenderemos la tecnología, también en su sentido más amplio, es decir, tanto la procedente de las ciencias exactas y naturales, como la de las ciencias socioeconómicas y humanas. Todo es-

to, sin duda, nos va a obligar a una nueva lectura del modelo de sistema de innovación. Porque a partir de ahora, el agente central para todas las acciones, deberá ser el conjunto de la sociedad". Tras leerlo en internet pensé: algunos tocan a arrebatado..., y me parece bien.

¿Acudirá la comunidad educativa? ¿Acudirán los medios de comunicación? ¿Acudirán las otras organizaciones productivas?

¿Competitividad y bienestar social irán de la mano?

Nosotros afirmamos con emoción: Convivencia Social basada en conocimiento científico.

Así como las gramáticas unifican las lenguas, las epistemologías unifican las ciencias. Hablamos, pues, de ciencias, métodos y técnicas. Esa diversidad, donde los sistemas democráticos y las economías de mercado confluyan, es la que proporciona obvia influencia a las opiniones pública informadas, para modelar las características más concretas de lo que hemos dado en llamar modelo productivo.

Escribo estas líneas mientras se sitúa en primerísimo plano de la actualidad la crisis nuclear en Japón, consecuencia de un terremoto descomunal y un tsunami devastador. El trágico escenario augura novedades, estructurales o no, en el balance entre grupos de interés cuyas cuentas de resultados económicos y sociales, dependen, en buena medida, de la I+D+i. En Occidente, las actitudes de la ciudadanía expresadas desde su condición de usuarios y puestas en valor por conveniencia de los medios de comunicación y por las redes celulares y en internet, con el referente del consumo y de las urnas, serán la mano psicossocial que con su índice señale a quienes van a predominar. ■

REFERENCIAS

1. Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua.
2. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, (FECYT). V Encuesta Bianual de Percepción Social de la Ciencia, (2010).
3. Manual de Frascati, (2002). OCDE.
4. Manual de Oslo, (2005). OCDE-EUROSTAT.
5. Mulet Meliá, J. (2010) Otra forma de impulsar la innovación. El País 24-1-2010.
6. Olea Cañizares, J.C. Gandarillas Solinis, M.A. Martín Cabello, A. García Manso, A. (2010) ¿Es posible la investigación aplicada en ciencias sociales? Informe a COTEC.
7. Plataforma Investigación Digna, (2011). Carta abierta por el futuro de la Investigación en España.
8. Sánchez Asiaín, J.A. (2010). Presentación del Informe COTEC sobre Tecnología e Innovación en España.

El tren Talgo 250 híbrido

JOSÉ LUIS LÓPEZ GÓMEZ

Ex director de tecnología de Talgo

Actualmente asesor técnico de la presidencia de Talgo

Desde los años sesenta del siglo XX, los ferrocarriles de los países más avanzados, tecnológicamente hablando, se han venido esforzando para desarrollar una mejora en la calidad de los servicios interurbanos de viajeros. Entre dichos países hay que destacar Japón, Francia, Alemania, etc.

Hay que señalar que España no se quedó a la zaga, ya que en 1964 Renfe puso en servicio los trenes Talgo III fabricados por Patentes Talgo que fueron un hito tecnológico de la época, capaces de circular a 160 km/h, aunque por motivos de las infraestructuras, circularon a 140 km/h hasta 1980, y con las prestaciones más avanzadas en cuanto a calidad de marcha y confort de los viajeros.

Patentes Talgo, fiel a sus principios, de ofrecer soluciones a los problemas del transporte de viajeros por ferrocarril, en 1968 construyó el primer tren del mundo con cambio automático de ancho de vía, que hizo el primer viaje entre Madrid y París sin trasbordo de viajeros en la frontera.

Como es sabido, en la Península Ibérica tenemos distinto ancho de vía que en el resto de Europa. Nuestro ancho de vía es de 1.668 mm (figura 1) y el ancho estándar europeo es de 1.435 mm. Esto supone que los trenes del resto de Europa no pueden pasar a España y viceversa. Por tanto, era imprescindible hacer transbordo de viajeros en la frontera con Francia.

En 1969 entra en servicio el primer tren del mundo, con cambio automático de ancho de vía, entre Barcelona y Ginebra (figura 2). En éste tren desarrollado y fabricado por Talgo, las prestaciones fueron tales, que fue admitido en el prestigioso grupo de trenes Trans Europ Expres (TEE). Posteriormente, entraron en servicio otros trenes Talgo, que cruzan la frontera con Francia, haciendo automáticamente el cambio de ancho de vía, sin transbordo de viajeros, con destino a París, Zúrich, Milán, etc.

Hay que señalar, que el cambio automático de ancho de vía en los trenes, es un sistema "anti natura" en el ferrocarril, dado que, se modifica la distancia entre las ruedas de un mismo eje. Desde 1898, que consta la primera patente, se han llevado a cabo muchos intentos para modificar *automáticamente* el ancho de vía en los vehículos ferroviarios, pero sin éxito.

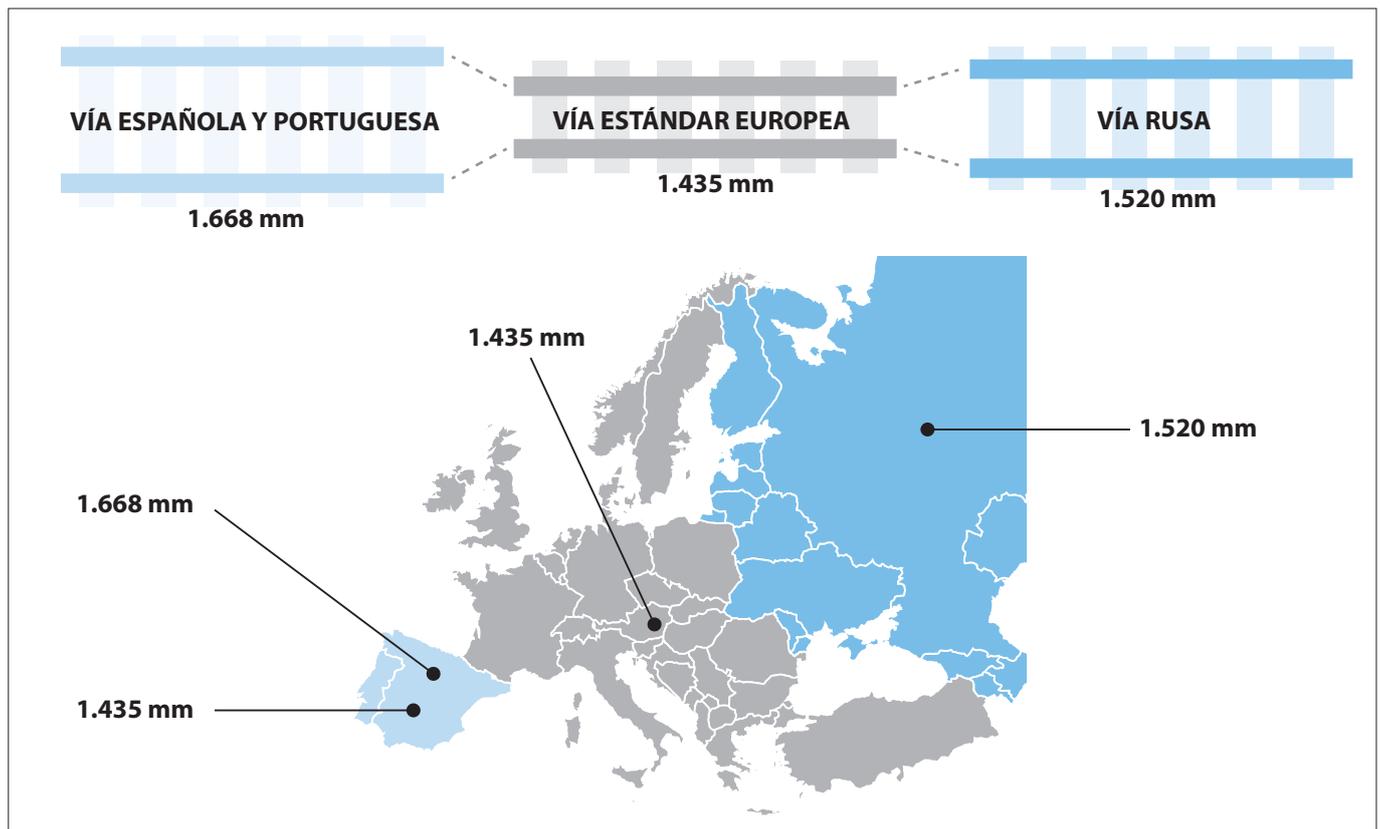


Fig. 1. Situación de los anchos de vía en Europa.



Arriba, fig. 2. Tren Talgo TEE con cambio automático de ancho de vía. Abajo, fig. 3. Locomotora Talgo eléctrica, primera en el mundo, con cambio automático de ancho de vía.

Ante la situación del problema, en 1965 la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) hizo un concurso de ideas para buscar soluciones. Talgo, con su sistema, se presentó fuera de concurso porque entonces solamente lo tenía desarrollado para rueda libre, que es la de los coches, recibiendo del jurado una mención especial, destacando su sencillez y su seguridad.

En los servicios internacionales, solamente era necesario que las ramas (coches de viajeros) tuvieran cambio automático de ancho de vía, dado que, ni locomotoras ni los maquinistas tenían, ni tienen, autorización para prestar servicio en los dos países. Las locomotoras por los equipos de señalización y los maquinistas por la autorización y especificaciones de cada país. Por ello, se cambia de máquina y de maquinistas en la frontera con Francia.

La complicación por la diferencia del ancho de vía fue aumentando, dado que, en 1989 se decidió construir la vía de Alta Velocidad Madrid-Sevilla en ancho estándar europeo y a partir de entonces todas las vías de la Alta Velocidad Española, AVE, se han construido con dicho ancho.

Para dar respuesta a esta situación, Talgo desarrolla y fabrica la primera locomotora del mundo con cambio automático de ancho de vía (figura 3), y así, ya dentro de España, tanto locomotoras como maquinistas podrían circular por ambas vías de Renfe, cambiando el tren completo de ancho de vía. Las mismas máquinas y maquinistas podrían circular por el ancho estándar de Renfe 1668 mm y por el ancho estándar de Alta Velocidad, que como hemos dicho, es el estándar europeo 1.435 mm.



Arriba, fig. 4. Tren Talgo 250 (S 130) con cambio automático de ancho de vía. Izquierda, fig. 5. Tren Talgo250 HIBRIDO (S730) y con cambio automático de ancho de vía.

Una vez resuelto el problema del cambio de ancho para la locomotora, Renfe encarga a Talgo, en 2005, 18 trenes Talgo 250- S130 (bitensión 3.000 V y 25.000 V) (figura 4) de Alta Velocidad con capacidad para circular por los dos anchos de vía, con dos cabezas motrices, una en cada extremo de los trenes. Con esta solución ya podían llegar los trenes de Alta Velocidad a todas las ciudades españolas que tuvieran vía de ancho estándar Renfe o de Alta Velocidad, con toma de corriente de catenaria a 3.000 V o 25.000 V.

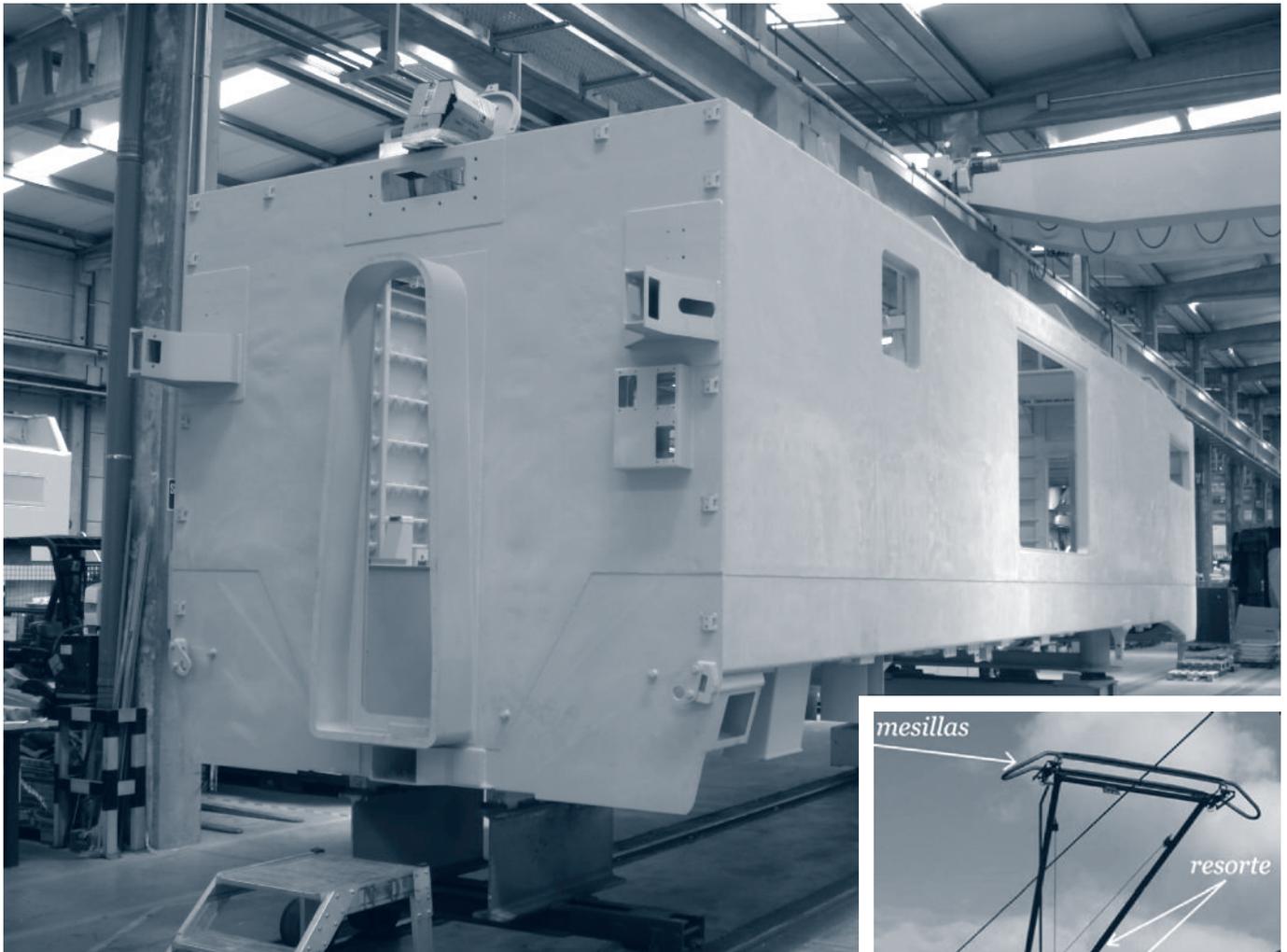
Las vías de Alta Velocidad Española están dotadas con tensión de alimentación de catenaria a 25.000 V y las estándar Renfe a 3.000 V.

Hay ciudades a las que llega la vía de ancho estándar Renfe, pero no están electrificadas, y dados los costes de

la electrificación, estas ciudades, en España, Europa, América, Asia, etc., tienen vía pero no está electrificada y no pueden llegar los trenes de altas prestaciones. Una vez más Talgo aporta la solución del TREN HIBRIDO (figura 5), cuyo objeto es que cualquier ciudad a la que llegue la vía pueda disfrutar de los trenes de altas prestaciones. En España, que es el caso que nos ocupa, hay ciudades como Almería, Coruña, Murcia, etc. que se verán beneficiadas por estos trenes.

El TREN UNIVERSAL (HIBRIDO) es un paso más a las necesidades del ferrocarril, ya que puede circular por vías de distinto ancho y además por vías electrificadas o no electrificadas. Para ello, se le añaden o sustituyen a los trenes S130 unos coches (figura 6) con grupos electrógenos que producen la corriente que suministraría a las cabezas motrices, a través, de la catenaria en las líneas electrificadas. En dichas líneas electrificadas, sobre unos postes, debidamente situados, se sustenta un cable que forma una catenaria (figura 7) y de éste, paralelo a la vía, un cable de contacto, de donde las regletas de contacto montadas en los pantógrafos toman corriente las locomotoras eléctricas.

Como ya hemos comentado, la catenaria de Alta Velocidad suministra la corriente a la tensión de 25.000 voltios y



Arriba, fig. 6. Coche generador del Talgo 250H, en proceso de fabricación. Derecha, fig. 7. Catenaria, hilo de contacto y pantógrafo.

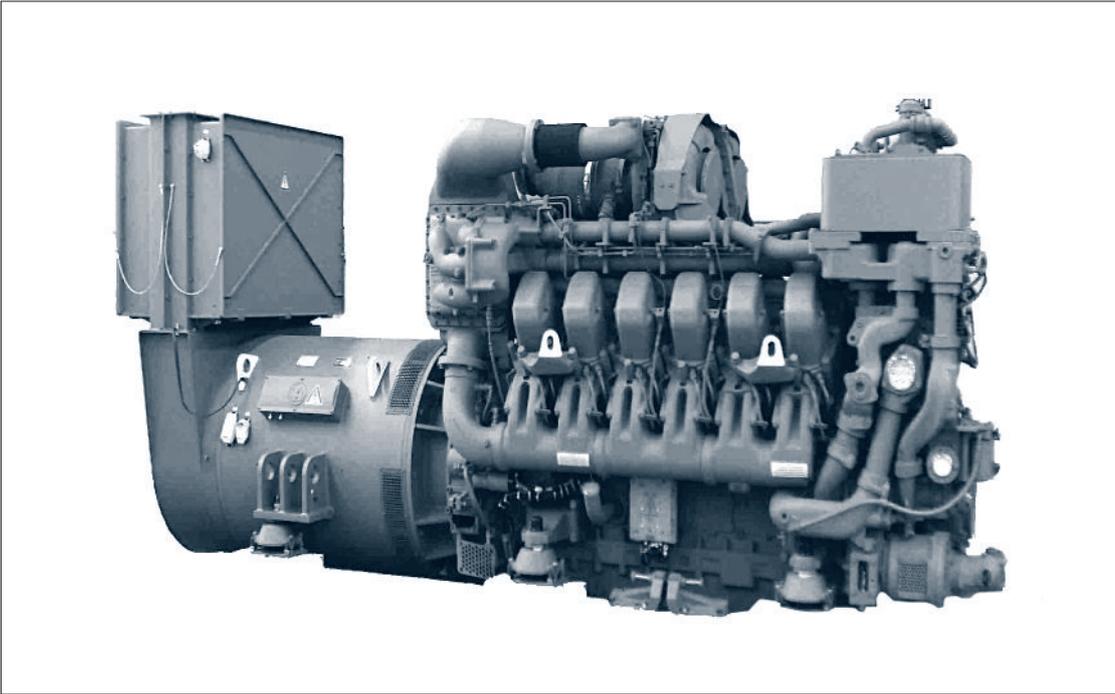
la catenaria de vías estándar Renfe la suministra a 3.000 V. Para las necesidades de potencia que suministran los grupos electrógenos, se tomó como base el suministro a 3.000 V. Por tanto, los grupos electrógenos (figura 8) y el equipo de regulación suministran a las motrices de los trenes la corriente eléctrica en las mismas condiciones que si la recibieran de la línea de contacto de la catenaria en vía de ancho Renfe.

Lógicamente, en estos trenes, todos los cambios son automáticos y el viajero no percibe el paso de un sistema a otro. Así, el cambio de ancho de vía se hace a 15 km/h y sin parar, el cambio de tensión de 25.000 a 3.000 V y, viceversa, tampoco lo percibe el viajero porque los motores de tracción de las cabezas motrices se convierten en generadores y producen corriente mientras se desplaza el tren para tomar corriente de una catenaria a otra. Cuando no hay catenaria se ponen automáticamente en marcha los grupos generadores y suministran la corriente para las necesidades de los viajeros y para la tracción en el trayecto que no hay catenaria. En estas condiciones y con los gru-

pos en marcha dando la potencia necesaria para tracción y servicios de viajeros estos trenes tienen una autonomía de 1500 km. Esto supone que las cargas de gasoil se realizarían una vez cada cinco viajes Madrid-Coruña ida y vuelta, dado que entre Madrid y Coruña hay 150 km de vía sin catenaria.

En la foto de la (figura 9) se puede ver el tren Talgo 250H circulando por vía de ancho estándar Rente con el pantógrafo abajo y con la corriente para tracción dada por los grupos electrógenos, montados en el coche contiguo a las cabezas motrices. En la figura 10 vemos el tren circulando con pantógrafo arriba, la corriente para tracción y servicios la capta el pantógrafo de la catenaria. El coche furgón es de rodadura BT, un bogie portante tipo BB, con cambio automático de ancho de vía, al lado de la cabeza motriz y un rodal tipo Talgo RD al lado de los coches Talgo.

Este furgón, como todos los vehículos que forman el tren Talgo 250H, es apto para circular a 250 km/h. Por vías de ancho estándar Renfe se limita la velocidad a 220 km/h.



Izquierda, fig. 8.
Grupo electrógeno
del Talgo 250H.
Abajo, fig. 9.
Talgo 250H
circulando con
pantógrafo bajado.



En la figura 11 se puede ver el motor diesel que se monta en el grupo generador; es un motor de 12 cilindros sobrealimentado con dos turbos y refrigeración del aire de sobrealimentación. Desde el punto de vista ecológico y de ahorro de energía, es de destacar que la rodadura de los trenes Talgo es la más silenciosa gracias a la rueda libre, ya que no hay microdeslizamientos. Y en cuanto a emisiones

de los motores diesel, cumplen la normativa europea. Sobre el ahorro de energía, hay que citar dos conceptos que se han cuidado mucho: Reducir todo lo posible el peso del tren, los coches Talgo son de aluminio con una estructura autoportante muy ligera y resistente, y elegir motores diesel potentes y de bajo consumo. El consumo del motor diesel de 190g/kWh; es de los más reducidos del mercado,

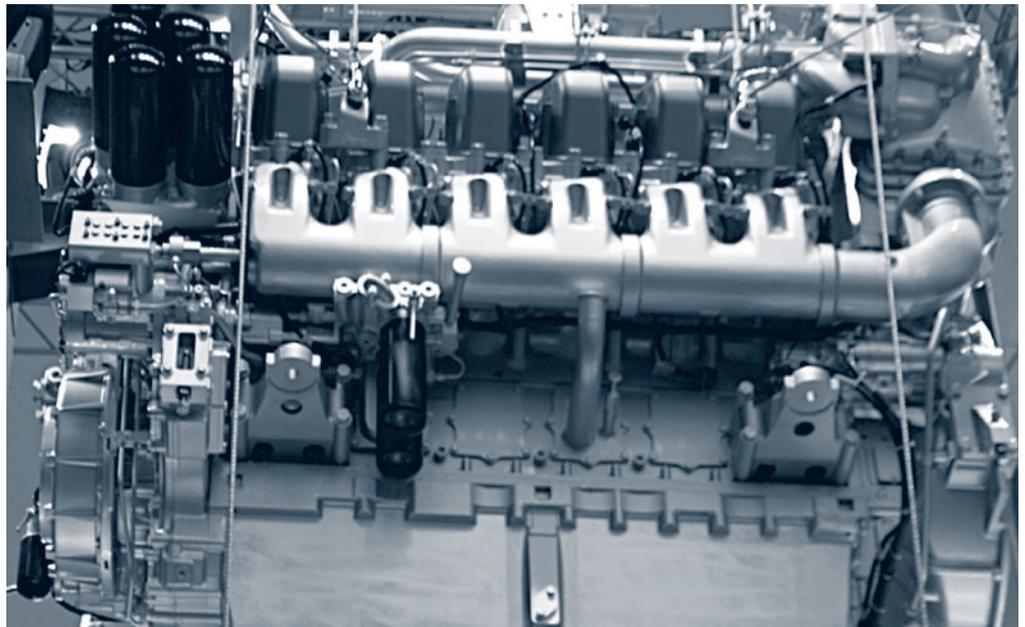


Arriba, fig. 10 . Talgo 250H circulando con pantógrafo arriba. Derecha, fig. 11 . Motor diesel del grupo generador.

gracias al sistema de inyección y sobrealimentación del motor.

En el motor diesel se aplica la tecnología de inyección *common rail*, figura 12 con lo que se inyecta la cantidad exacta de combustible en cada momento de la combustión, consiguiendo así buena combustión, baja contaminación y alto rendimiento.

Todos los equipos del tren están controlados desde la cabina del jefe del tren, desde allí se supervisan unos 1.500 puntos de control. Desde los cierres de puertas al antibloqueo (ABS), vibraciones o temperatura de rodamientos de cada rueda. Si todo está en orden, el sistema permite circular a 250 km/h. Si algún parámetro se sale de los márgenes, y no es de seguridad, p.e.: temperatura del aire acondicionado de un coche, el jefe de tren decide; pero si es un parámetro de los de seguridad, automáticamente reduce el tren la velocidad a valores que se han programado como adecuados.



En cuanto a la velocidad de circulación, por las líneas de Alta Velocidad, el tren va controlado por el puesto central con el sistema RTMS, de tal forma que el jefe del tren puede llevar el tren a velocidades inferiores a las que le marque el sistema, bien por vía mojada, viento, o por un tren que va delante que el jefe de tren no alcance a verlo, el sistema le indica la velocidad máxima a circular. Si la supera, el sistema corta la potencia, y, si es preciso, frena el tren. Por supuesto, el sistema puede llevar el tren en automático, con lo cual el jefe de tren sólo se ocupa de vigilar. Pero eso sí, si en 40 segundos el sistema no detecta ningún movimiento del jefe de

1. Generation, BR4000, SOD 1996

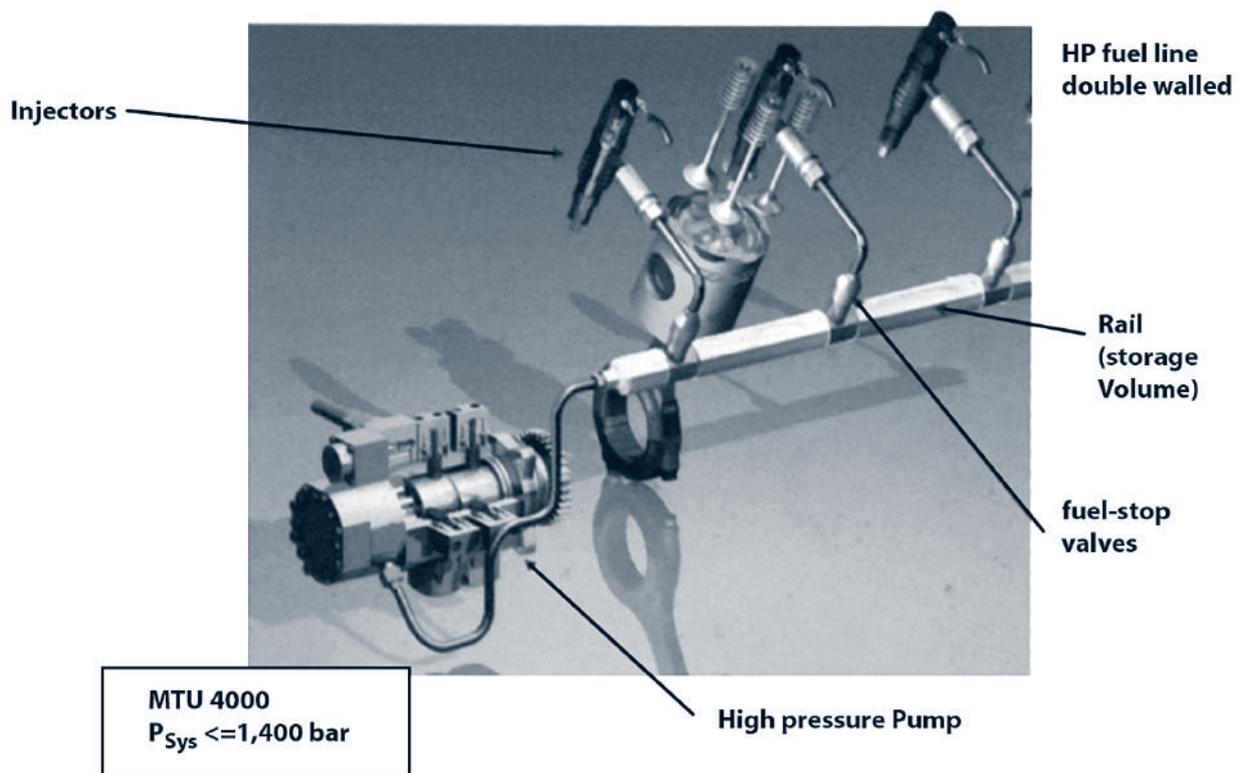


Fig. 12. Sistema de inyección Common-Rail.

tren, da un aviso sonoro de 10 segundos para que se mueva o pulse algún elemento de cabina, y si no se hace se paran todos los equipos y se frena automáticamente. Este equipo de control se denomina en el argot ferroviario “equipo de hombre muerto”.

Para finalizar, se expone una secuencia de los “trenes” incluidos en el tren Talgo 250H. Se parte de un tren de Alta Velocidad con ancho de vía 1435 mm; al hacerle eléctrico se le pone tensión de 25.000 V. Para que pueda circular por vías estándar de Renfe 1668 mm (ancha) hay que añadirle el sistema automático de cambio de ancho de vía, para que pueda circular en eléctrico por vías anchas de Renfe, hay que adaptar la toma de corriente a 3.000 V. Finalmente, para que pueda circular por vías anchas de Renfe sin electrificar, hay que añadir unos grupos electrógenos, para que estos trenes de altas prestaciones, puedan llegar a ciudades como Coruña, Almería, Murcia, etc., y así, los viajeros se beneficien de dichos trenes, que al circular, parte del recorrido, por vías de Alta Velocidad se reducen considerablemente los tiempos de viaje.

Todas estas dificultades que tenemos en España para la mejor comunicación entre las ciudades, y que se van superando con un gran esfuerzo de I+D+i por parte de Talgo,

estamos seguros que servirán para mejorar notablemente nuestra tecnología, y al mismo tiempo poderla exportar produciendo un adicional beneficio económico que repercute en la imagen y economía que nuestro país se merece como país del mundo desarrollado. ■

REFERENCIAS

Web de Talgo.- [w.w.w.Talgo.com](http://www.Talgo.com)

José Luis López Gómez, Talgo Atomatisches Umspursystem für den Personen und Güterverkehr. *Der Eisenbahn Ingenieur*, 1997, Dezember.

José Luis López Gómez, Talgo automatic gauge change system for freihwagons. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, vol.215, 2001, PartF, 13-24.

José Luis López Gómez, Trenes Talgo pendulares y de alta o muy alta velocidad, *Acta Científica y Tecnológica*, 2008, n° 15.

EN PORTADA, Serie 730 de Renfe, El tren dual de Talgo todo terreno, VIA LIBRE, 2011, junio, N°: 553.

DOSSIER, Talgo, liderazgo en alta velocidad, VIA LIBRE, 2011, noviembre, N°: 557.

SERVICIOS, Galicia, alta velocidad en ancho ibérico, VIA LIBRE, diciembre 2011, N°: 558.

Estación robotizada medioambiental para la misión de la NASA MSL (Mars Science Laboratory), REMS (Rover Enviromental Monitoring Station)

EDUARDO SEBASTIÁN MARTÍNEZ¹,
MARÍA-PAZ ZORZANO MIER¹,
JAVIER GÓMEZ-ELVIRA¹, JOSÉ MORENO²,
ANTONIO PEÑA², JAIME SERRANO²,
EQUIPO REMS

¹Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)

²CRISA (grupo EADS-Astrium)

1. EL INSTRUMENTO REMS

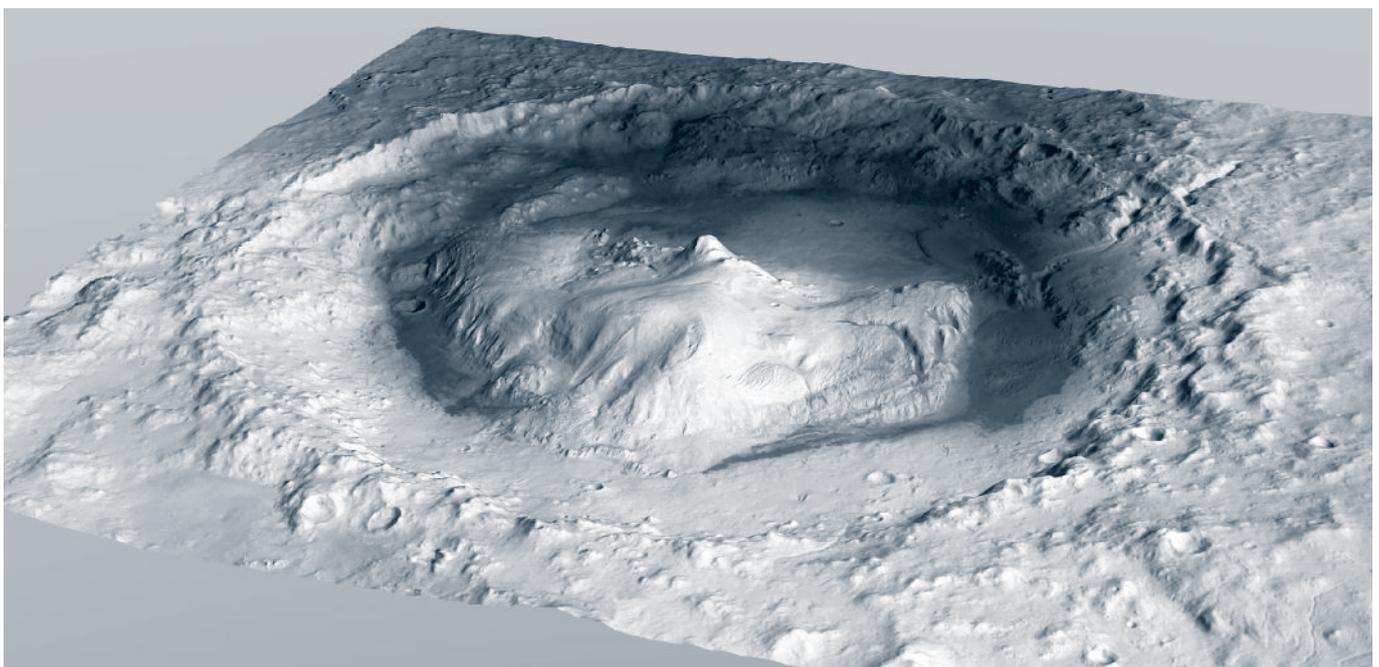
EN LA MISIÓN MSL DE NASA

El Rover Environmental Monitoring Station (REMS¹) es un instrumento desarrollado por el Centro de Astrobiología (INTA-CSIC) para explorar el medioambiente de la superficie de Marte a bordo del vehículo Mars Science Laboratory (MSL) de la agencia espacial NASA (2011). El MSL es un vehículo que determinará la habitabilidad del planeta y valorará si Marte fue o es todavía un entorno adecuado

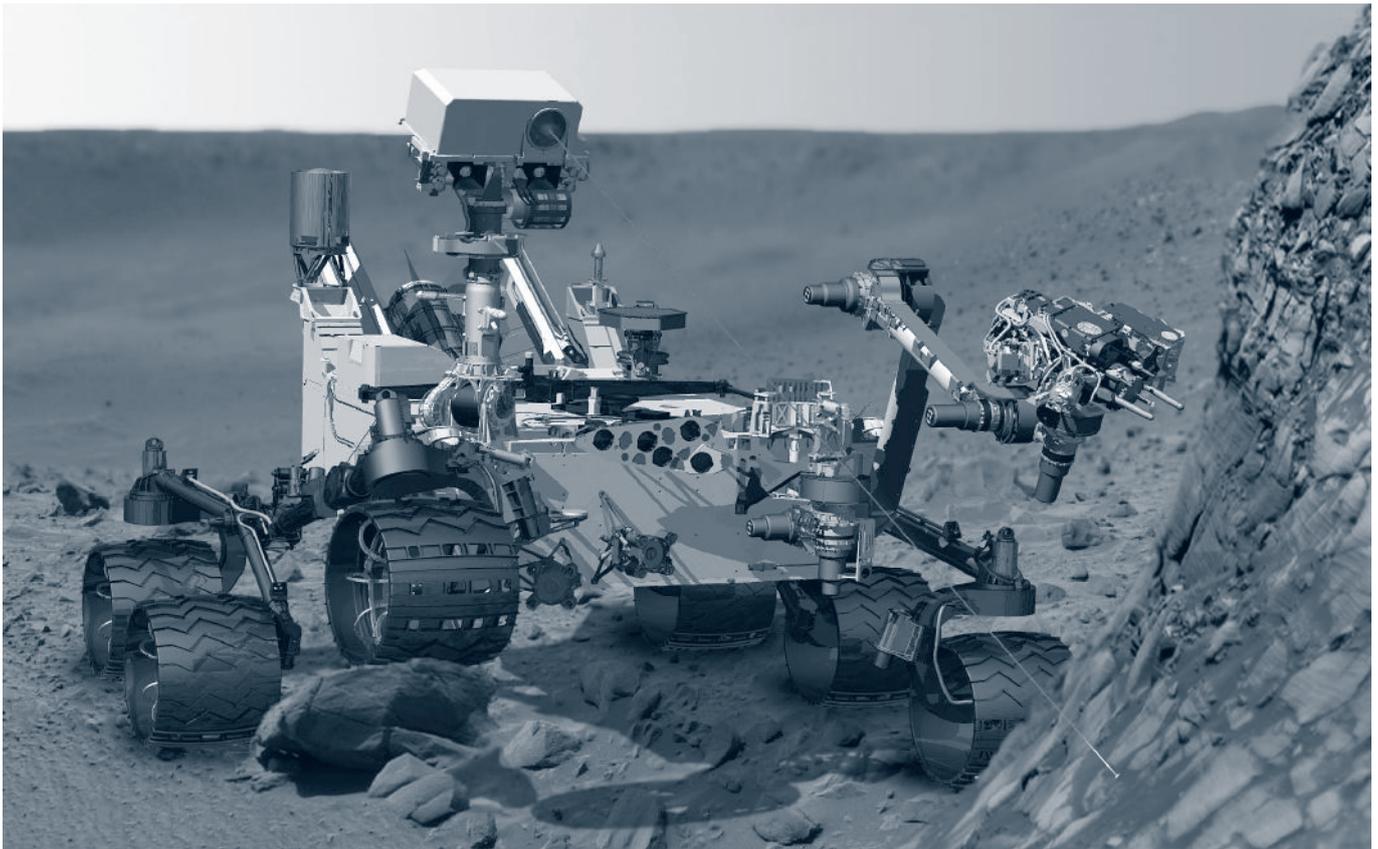
para sostener la vida microbiana. En su operación nominal, a lo largo de un período mínimo de dos años, REMS registrará, durante un intervalo de cinco minutos cada hora, la temperatura del aire, la presión, la humedad relativa, la temperatura del suelo, la velocidad y dirección del viento y la radiación ultravioleta (UV). El registro sistemático de dichas variables ambientales permitirá caracterizar, entre otros fenómenos, la dinámica de la capa límite de la atmósfera de Marte, el ciclo del agua y el polvo, y los niveles de radiación UV que alcanzan la superficie contribuyendo así a los objetivos fundamentales de la misión MSL. El vehículo MSL, bautizado con el nombre de "Curiosity" y lanzado el 26 de noviembre de 2011, es la versión más ambiciosa, grande y compleja de vehículo de exploración de superficie que se ha desarrollado hasta la fecha. En la actualidad viaja rumbo a Marte funcionando todo según lo esperado. El vehículo llegará a Marte y aterrizará en el cráter Gale, el 5 de agosto del 2012.

La plataforma MSL es en realidad un laboratorio autónomo móvil, del tamaño de un coche compacto del tipo

¹ <http://www.cab.inta-csic.es/remS>



(Cortesía NASA/JPL-Caltech) Recreación tridimensional del cráter Gale.

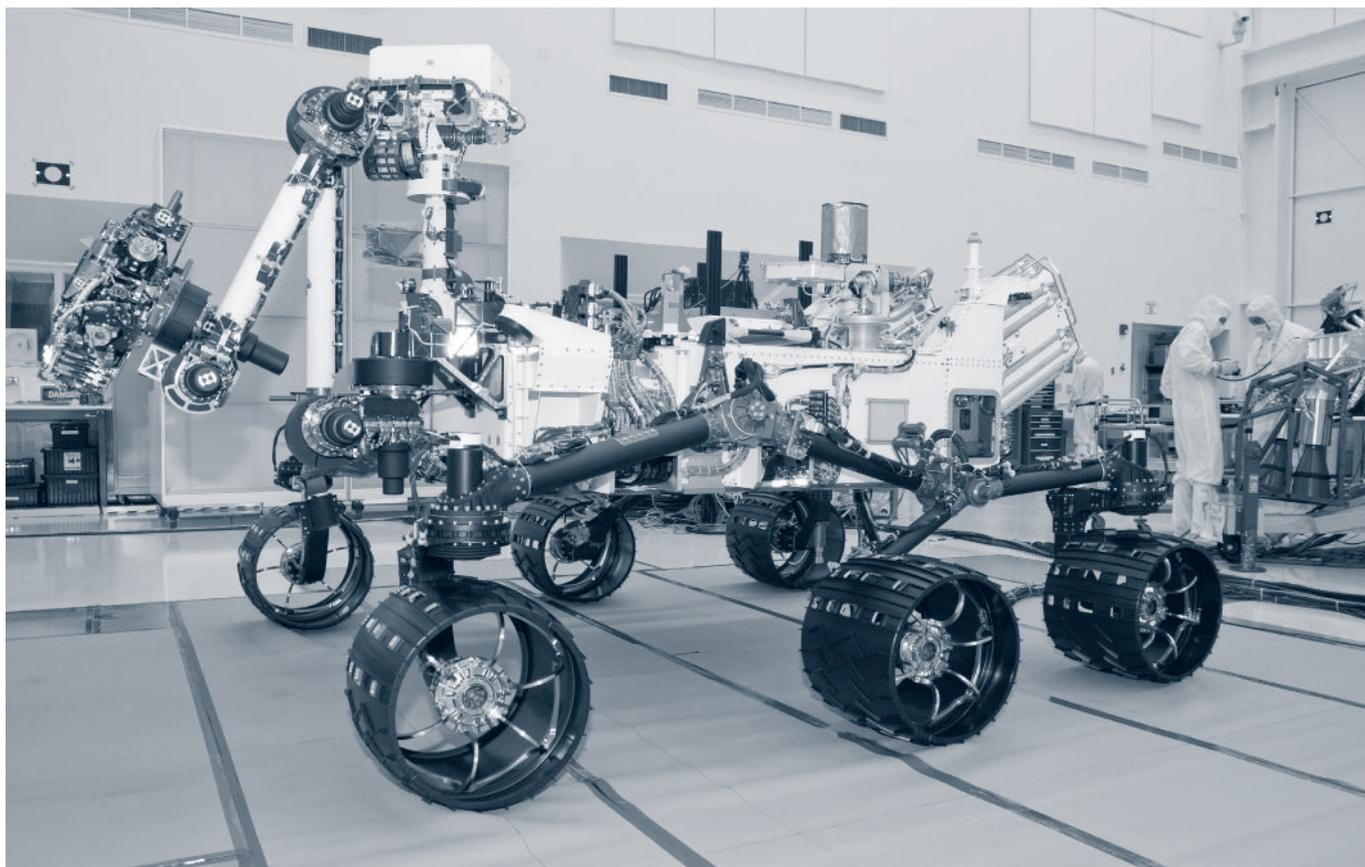


(Cortesía NASA/JPL-Caltech) Recreación de operación en Marte del robot Curiosity-MSL.

mini-cooper, que puede alcanzar una velocidad de 90 m/h, desde el cual operan conjuntamente varios instrumentos para caracterizar y valorar la habitabilidad del lugar de aterrizaje. Las mediciones de REMS proporcionarán información esencial para los objetivos científicos de la misión MSL: verificar el potencial biológico de la zona explorada por el *rover* investigando los procesos planetarios que ocurren en su superficie y que influyen en su habitabilidad, como por ejemplo el ciclo del agua y los niveles de radiación UV, así como los ciclos térmicos del suelo y aire. Por otra parte, REMS, a través de sus medidas, estudiará los fenómenos atmosféricos globales y mesoscales (frentes, chorros, etc), fenómenos de micro-escala (turbulencia en la capa límite, flujos de calor, etc), el ciclo hidrológico a nivel local (variaciones espaciales y temporales, difusión en el regolito, etc) y ciclo del polvo y niveles de radiación ultravioleta (relacionado con la fotoquímica atmosférica y los fenómenos de producción de radicales en superficie y oxidación etc) y la inercia térmica del entorno de aterrizaje.

La exploración in-situ de un planeta, esto es desde su superficie, es tecnológicamente más compleja que la exploración desde un orbitador pues requiere superar ciertas condiciones estresantes añadidas. Tanto la plataforma como los instrumentos han de superar junto con las fases críticas de lanzamiento y trayecto en el espacio (fases que son propias también de los orbitadores), las fases de aproximación a la órbita, entrada y aterrizaje y finalmente

la operación propiamente dicha en superficie. Las misiones de exploración planetaria in-situ están sujetas además a los estrictos controles de protección planetaria, destinados a evitar la contaminación "forward", o hacia adelante, del planeta explorado con moléculas orgánicas y microorganismos de origen terrestre. Por otra parte las condiciones ambientales de operación de instrumentos en el espacio son, hasta cierto punto, independientes del cuerpo alrededor del que orbite la plataforma y relativamente constantes a lo largo de su vida útil en términos de presión y temperatura y niveles de radiación. Esto hace que las tecnologías desarrolladas para detección remota estén muy consolidadas y sean adaptables con ciertas modificaciones de una misión a otra. En contraste con esta larga tradición de instrumentación espacial remota, los instrumentos y las misiones de operación in-situ han de ser diseñados específicamente para operar en una atmósfera con una presión y composición específica, en un planeta con una gravedad e insolación diferente, y adaptadas a fuertes oscilaciones térmicas asociadas con los ciclos diurnos y estacionales. Concretamente, en la superficie de Marte, el entorno de operación de superficie es hostil ya que existen amplios ciclos térmicos diarios (del orden de 70°C) y la instrumentación y el vehículo están expuestos a la deposición de aerosoles atmosféricos (polvo mineral), lo cual degrada su operatividad e incluso su vida útil en el caso de los paneles solares. Hasta la fecha las únicas misiones de exploración in-situ de la superficie de Marte realizadas



(Cortesía NASA/JPL-Caltech).

con éxito han sido los dos landers Viking (1975) y el pequeño *rover* Pathfinder (1996), seguidos por los MER Spirit y Opportunity (2004) y finalmente el lander polar Phoenix (2008); todas ellas de la agencia espacial NASA, con sondas relativamente pequeñas que incluían poca carga de instrumentación científica.

El diseño, construcción, calibrado y prueba del instrumento REMS ha sido dirigido por el Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA), en colaboración con la empresa CRISA del grupo EADS-Astrium, la Universidad Politécnica de Cataluña, el Instituto Meteorológico Finlandés (FMI), la Universidad de Alcalá de Henares y diversas instituciones norteamericanas como el Massachusetts Institute of Technology (MIT, EE.UU.), las universidades de Michigan y NASA AMES.

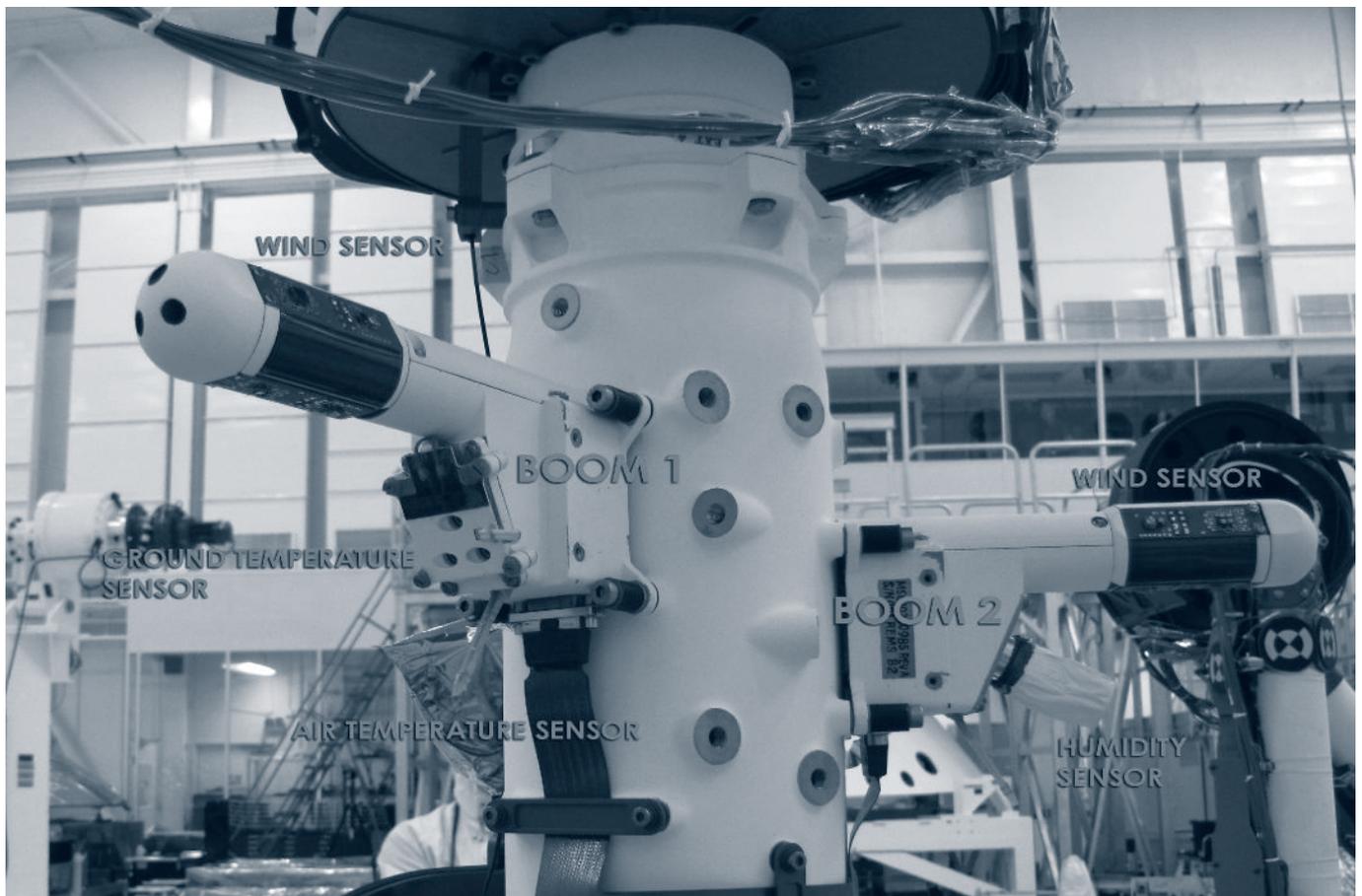
2. SISTEMA SENSORIAL DE REMS

La estación medioambiental REMS se compone de seis sensores: humedad, temperatura atmosférica, temperatura del suelo, dirección y velocidad del viento, presión atmosférica y radiación ultravioleta. Dichos sensores están distribuidos en distintos módulos: un controlador principal, situado en el interior del cuerpo del *rover* en la denominada *zona caliente*, un espacio dedicado a albergar instrumentación y sistemas electrónicos críticos y cuya tempe-

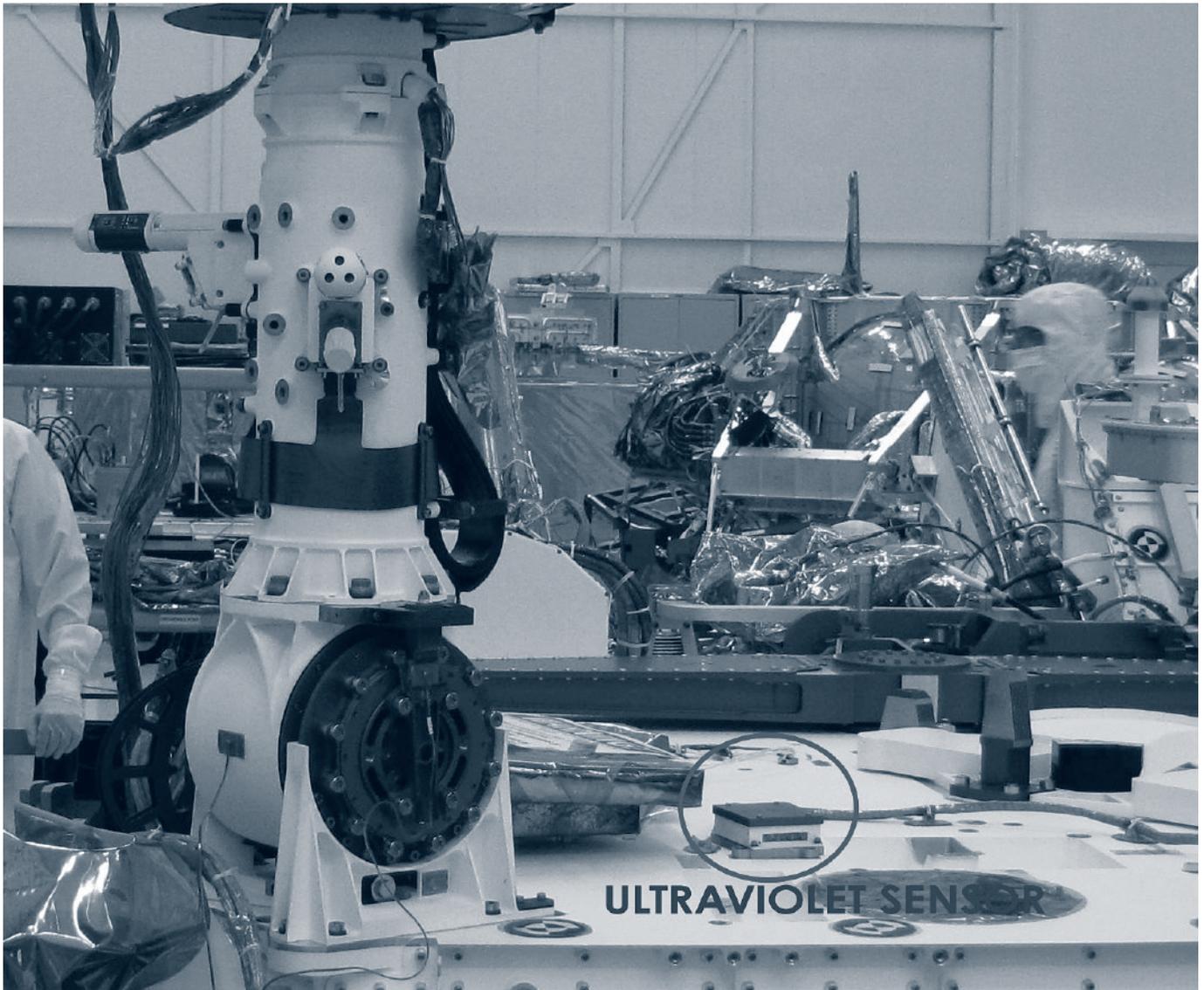
ratura estará siempre por encima de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$; un pequeño módulo ultravioleta situado en el exterior sobre el cuerpo principal del *rover* y que estará mirando al cielo de Marte; y dos estructuras alargadas, denominadas *booms*, que se encuentran desplegadas en el mástil principal del *rover* a una altura de 1,6 m sobre el suelo, formando entre sí un ángulo de 120° . La localización en los distintos módulos de los sensores de REMS se ha realizado atendiendo a tres criterios: los requerimientos sensoriales para obtener señales con una menor incertidumbre, el intento por minimizar las perturbaciones de las medidas introducidas por el propio vehículo (flujos turbulentos del viento; influencia térmica del propio *rover*,...), y finalmente las restricciones de la propia misión.

El sensor de viento, *Wind Sensor (WS)*, diseñado en colaboración con la Universidad Politécnica de Cataluña, mide la dirección y velocidad del viento en tres dimensiones (3D). Está compuesto por tres transductores alojados en tres placas dispuestas a 120° en la parte externa de los dos *boom*. Dichos transductores son detectores independientes que miden la dirección y velocidad local del viento en dos dimensiones (2D). Cada transductor a su vez está formado por cuatro pequeños anemómetros térmicos de dado caliente. Los dados calientes son pequeños circuitos integrados de silicio, que incluyen un conjunto de resistencias eléctricas y que se encuentran montados sobre unos pedestales de fibra de vidrio aislante.

SENSOR	RANGO	EXACTITUD	RESOLUCIÓN
Wind Sensor (WS)	Horizontal 0-70 m/seg	1 m/seg	0.5 m/seg
	Ángulo horizontal 0-360°	30°	
	Vertical 0 to 20 m/seg	1 m/seg	0.5 m/seg
Ground Temperature Sensor (GTS)	150-300 K	10 K	2 K (promediando 1 minuto)
Air Temperature Sensor (ATS)	150-300 K	5 K	0.1 K
Pressure Sensor (PS)	1 -1150 Pa	10 Pa (20 al final de vida útil)	0.5 Pa
Relative Humidity Sensor (HS)	0- 100%	3%	0.5-1%
Ultraviolet Sensor (UVS)	210 - 360 mm Total 215 - 277 nm (UVC) 279 - 320 nm (UVB) 315 - 370 nm (UVA) 230 - 298 nm (UVD) 311 - 343 nm (UVE)	5%	0.5%



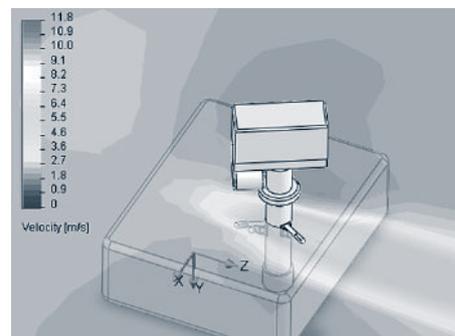
(Cortesía NASA/JPL-Caltech).



(Cortesía NASA/JPL-Caltech).

El WS obtiene la velocidad local del viento en cada uno de los transductores 2D utilizando los resultados de calibración del sensor y del sistema electrónico de medición del suministro de potencia (cuanto más potencia haya que inyectar para mantener el dado caliente a una temperatura dada, más fuerte estará soplando el viento). Sin embargo, debido a las perturbaciones introducidas por el mástil y el cuerpo del *rover*, estos datos deberán ser post-procesados para proporcionar las velocidades reales del viento en 3D. Para ello se utilizan complejas técnicas de ajuste de hiper-superficies 3D que incluyen datos de ensayos y modelos aerodinámicos de todo el conjunto.

El sensor de temperatura de suelo, *Ground Temperature Sensor* (GTS), está alojado en el *boom* 1, enfocando un área del suelo de Marte de 100 m². El GTS es capaz de medir temperaturas integrando la radiación infrarroja (IR) irradiada por el suelo de Marte en tres distintas longitudes de onda. Para ello utiliza tres pequeños detectores ópticos IR de tipo *termopila*. El sensor cuenta con un novedoso sistema

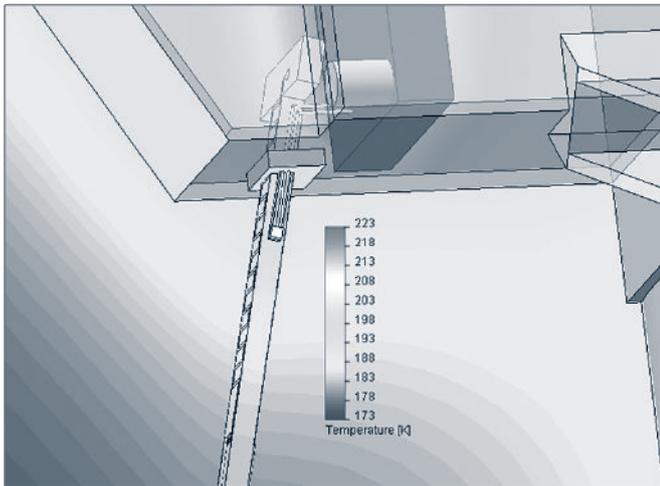


(Cortesía CAB)
Simulación
CFD del sensor
de viento.

de calibración en vuelo que le permite compensar la degradación causada por la deposición de polvo de la atmósfera marciana sobre la óptica de los detectores.

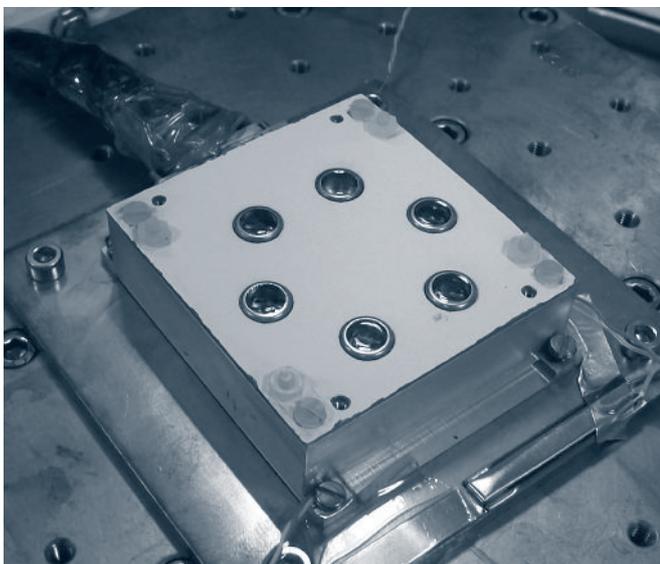
La medida de la temperatura atmosférica es realizada por el *Air Temperature Sensor* (ATS), el cual está formado por tres termoresistencias, alojadas a lo largo de una varilla de fibra de vidrio. Dicha varilla se encuentra situada en la parte inferior de los dos *boom*. La utilización de tres

sensores permite compensar las perturbaciones causadas por la incidencia directa sobre los detectores de radiación proveniente del Sol, así como la contaminación térmica del propio *boom*. Por otra parte, la longitud de la varilla pretende alejar al detector del extremo de la influencia térmica del *boom*.



(Cortesía CAB) Simulación del sensor ATS y la influencia térmica del *boom*.

Los sensores de presión y humedad atmosféricas han sido desarrollados en colaboración con el *Finnish Meteorological Institute* (FMI) basándose en la tecnología de *Vaisala*, herencia de los sensores de las misiones *Phoenix* y *Beagle 2*. El de presión, *Pressure Sensor* (PS), se encuentra situado en el interior del módulo principal dentro de la zona caliente. El sensor presenta un conducto que lo pone en contacto con la atmósfera marciana. Su transductor es un MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) de tipo capacitivo.



(Cortesía CAB) Sensor UV antes y después de un ensayo de deposición de polvo (efecto de los imanes).

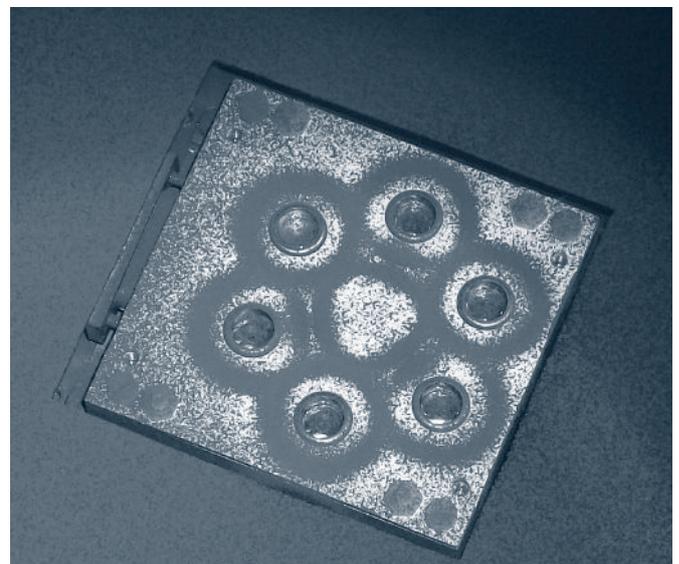
Por otra parte el sensor de humedad, *Humidity Sensor* (HS), tiene forma cilíndrica y está alojado en el *boom 2* para mitigar la contaminación térmica del *rover* y mejorar el contacto con la atmósfera marciana. El detector mide la concentración de agua en la atmósfera con niveles diez mil veces inferiores a los terrestres, para lo cual utiliza un transductor basado en un polímero higrófilo cuya capacidad eléctrica varía con la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera.

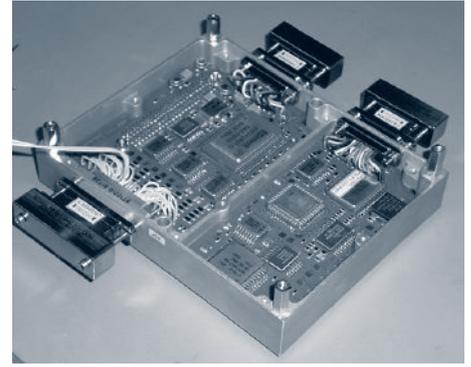
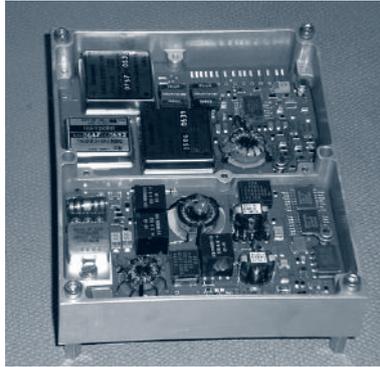
Por último, el sensor ultravioleta, *Ultraviolet Sensor* (UV), se encuentra alojado en un módulo en forma de caja situada sobre la parte superior del *rover*. Está formado por 6 fotodiodos de SiC que miden dicha radiación en seis bandas distintas. El sensor incluye unos imanes de forma toroidal, cuyo campo magnético desvía la trayectoria del polvo marciano en movimiento y mitiga la deposición de polvo sobre la óptica de los fotodiodos. Además, una de las cámaras del *rover* será utilizada para calibrar el posible efecto remanente de la deposición de polvo sobre los diodos y compensar su efecto.

3. SISTEMA ELECTRÓNICO

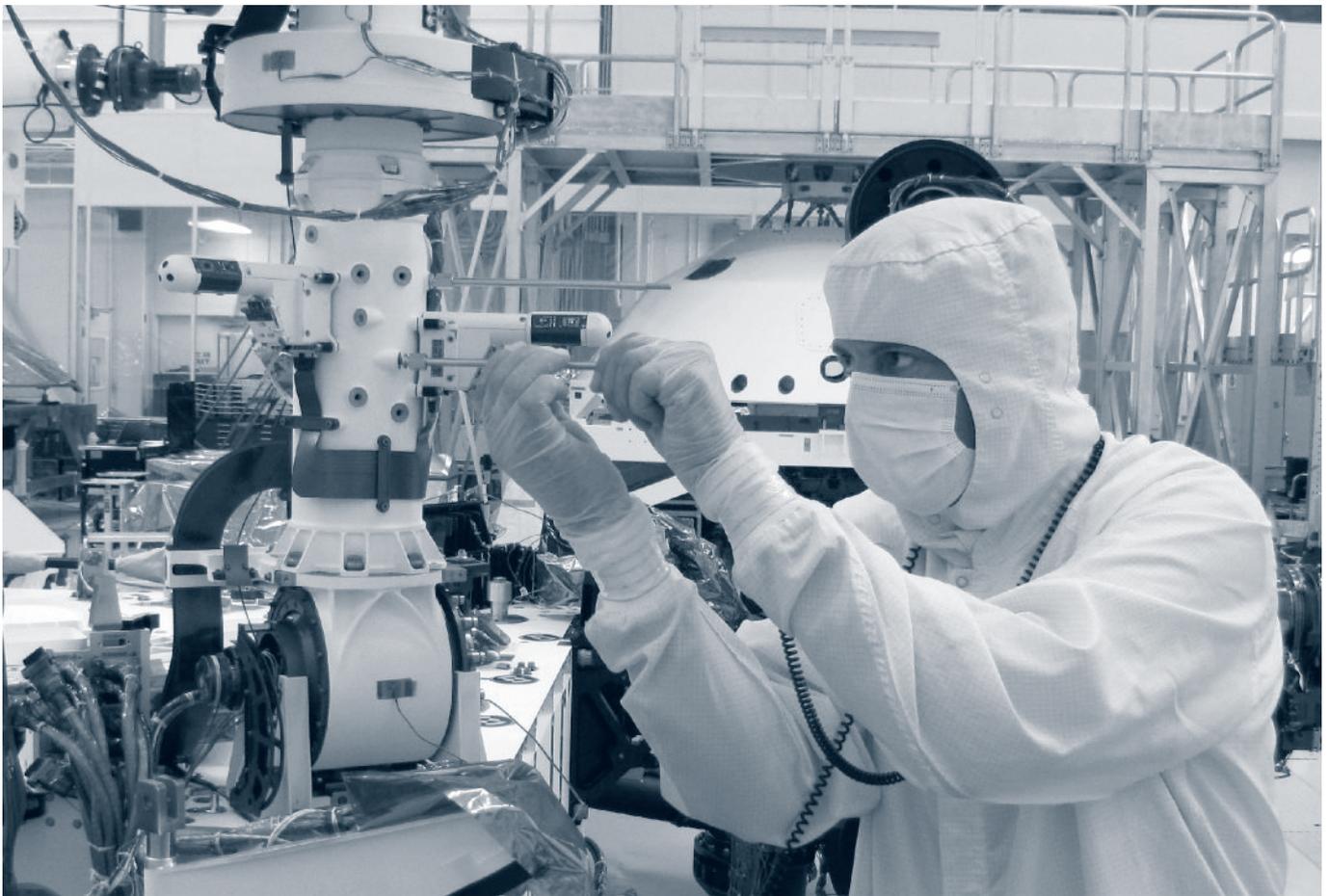
DE LA ESTACIÓN MEDIOAMBIENTAL.

El instrumento está compuesto por los sensores descritos en el apartado anterior y por el controlador situado en el interior del *rover* MSL. Dicho controlador es la unidad *Instrument Control Unit* (ICU), verdadero cerebro del instrumento y en cuyo interior se ejecuta el software de control que gobierna toda la operativa de REMS. La ICU está compuesta por tres submódulos; un módulo de control de alimentación, una cadena de adquisición que permite digitalizar datos del sensor UV y adquirir otras telemidas y un computador especializado.





(Cortesía CRISA) ICU y dos de sus módulos, convertidor DC/DC y computador.



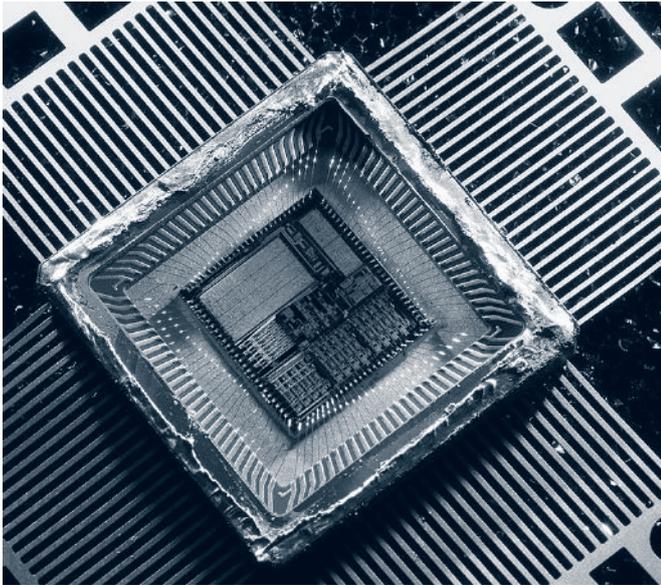
(Cortesía NASA/JPL-Caltech).

El computador de la ICU ha sido diseñado totalmente a medida para esta misión y se encarga de funciones como comunicar el instrumento con el computador del *rover*, almacenar todos los datos científicos adquiridos por los sensores y que serán descargados posteriormente al computador principal del *rover* para ser transmitidos hacia la Tierra y ejecutar las planificaciones de adquisición de datos científicos enviadas previamente desde Tierra, como consecuencia de las tareas de operación del instrumento.

La energía en el *rover* es un bien escaso, por lo que en el interior de la ICU hay un módulo de alimentación que incluye

un pequeño convertidor DC/DC miniatura. Este convertidor alimenta a REMS en los periodos en los que el instrumento está dormido, esperando la orden para despertar y ejecutar la siguiente sesión de adquisición. En ese modo de bajo consumo, tan solo hay una pequeña función electrónica trabajando que actúa como un despertador, para ordenar a REMS despertar cuando corresponda y adquirir datos. Una vez se hayan adquirido los mismos (una sesión típica dura cinco minutos), el instrumento vuelve a dormirse automáticamente.

La autonomía de REMS es muy alta con objeto de reducir el consumo de potencia. Se da la circunstancia que es



(Cortesía CRISA) Fotografía del ASIC con el encapsulado abierto mostrando los circuitos de silicio del interior y sus interconexiones.

posible que REMS trabaje cuando el computador principal de MSL no le pueda atender (por estar por ejemplo también dormido), por ello, se requería una amplia memoria no volátil que almacenase los datos dentro del instrumento hasta que el computador del *rover* pudiese recibir los datos de REMS. Esta memoria está también en el interior de la ICU.

Dentro de la ICU se almacena y ejecuta un software que gestiona toda la operativa del instrumento. Han sido dos los paquetes diseñados para REMS; un complejo software de aplicación para la monitorización y control del instrumento, la planificación y ejecución de la toma de datos científicos y para comunicar con el ordenador principal del *rover* y un pequeño software de arranque que controla todas las funciones de bajo nivel del hardware. El software de aplicación puede modificarse durante la misión por medio de telecomandos enviados desde la Tierra.

La ICU se encuentra en el interior del cuerpo del *rover*, por lo que se puede afirmar que se encuentra en un ambiente "cómodo". Sin embargo, los sensores y la electrónica de adquisición local se encuentra expuesta a toda la crudeza del ambiente marciano. La electrónica capaz de resistir dicho ambiente, ha sido un elemento clave del desarrollo y un verdadero reto tecnológico.

La electrónica que lee los sensores ubicados en el mástil está basada en un 'ASIC mixto' (circuito integrado a medida que aglutina electrónica digital y analógica) y que realiza todo el acondicionamiento de las señales que generan los sensores ambientales. Estos circuitos se encargan de recibir las delicadas señales analógicas procedentes de los sensores y convertirlas en señales digitales que son enviadas a la ICU. La ICU interrogará periódicamente a estos dos ASICs

(uno por *boom*) para que estos envíen los datos ambientales medidos para su procesamiento y almacenamiento.

El requisito más reseñable es que los ASICs debían funcionar a temperaturas tan bajas como -130°C . Y a esa temperatura no había certeza de que el circuito funcionase correctamente, aparte que podían aparecer fallos por estrés térmico. La solución de diseño fue la inclusión de una función que permite pre-calentar los ASICs hasta una temperatura más confortable antes de encenderlos. De esa forma, se lleva el circuito a una temperatura de seguridad (típicamente -70°C) y entonces, se procede a aplicar alimentación al ASIC.

4. RETOS TECNOLÓGICOS

DEL DISEÑO DE UNA ESTACIÓN

MEDIOAMBIENTAL PARA MARTE

Son muchos los retos que ha habido que superar para obtener un diseño de instrumento capaz de cumplir los estrictos requisitos de una misión en la superficie a otro planeta. Si bien en una misión habitual de vuelo requisitos como el consumo de potencia, masa o rango de temperatura de funcionamiento ya dan dolores de cabeza, en una misión que debe aterrizar en otro planeta, los requisitos son, simplemente, extremos. La masa ha de ser reducida al máximo (pues impacta no solo en el coste del lanzamiento sino que también complica grandemente los problemas para el aterrizaje) y todo elemento saliente o desplegable supone un riesgo y una complicación durante las fases entrada, descenso, aterrizaje y operaciones iniciales en el planeta.

Eso llevó a requisitos como que la masa solicitada para el instrumento no debía superar los 1.3 kg, incluyendo sensores e ICU (al final se consiguió no pasar de 1,2 kg). La longitud de los *boom* no debía ser mayor que 15 cm y la superficie de la ICU debía ser menor que 100×100 mm.

En cuanto a energía disponible, ésta es muy pequeña y se debe repartir entre todos los instrumentos embarcados en el *rover*. De ahí que hubiese que optar por 'dormir' el instrumento durante buena parte de la misión y tratar de optimizar el diseño del sistema al máximo.

Las restricciones de montaje y ubicación, junto con la obsesión por maximizar la calidad de datos a nivel científico evitando o minimizando en lo posible las propias interferencias medioambientales generadas por el *rover*, llevaron a distribuir los elementos del instrumento por varias zonas del *rover* que siempre hace más dificultosas todas las tareas de diseño mecánico y eléctrico.

Otro problema adicional que plantea la superficie marciana es la deposición de polvo sobre todos los elementos.

Se requirieron estudios y prototipos específicos para solventar este problema. En concreto, había que buscar una solución para los fotodiodos del sensor UV, que se mostraron muy sensibles a la deposición de polvo.

También fueron numerosos los ensayos de ciclado térmico y análisis de resistencia de los materiales a las vibraciones. Había que demostrar que todos los sensores, materiales, tecnologías, etc. resistirían toda la vida de la misión (y con un factor de margen de x3 como requería la NASA). Se hicieron unos dos mil ciclos térmicos de ciertos elementos para garantizar que todo iría bien aunque la misión se prolongase a más del doble de su duración prevista. Algunos ensayos tuvieron que realizarse en ambiente marciano simulado usando CO₂ a baja presión y baja temperatura. Se hicieron pruebas de choque con niveles de más de 4000 g para alguno de los elementos del instrumento.

Por último, hay que citar las estrictas normas para evitar la posible contaminación biológica del planeta, que es lo que se conoce como *protección planetaria*. El objetivo es evitar contaminar el planeta con cualquier elemento biológico que pudiera ser transportado desde la Tierra. Por eso, la fabricación de los elementos más sensibles de REMS se ha realizado en salas controladas con de ambiente extremadamente limpio (niveles ISO-3), durante el montaje y ensayo de REMS se han seguido complejos procedimientos de limpieza y, antes de su lanzamiento, REMS ha sido sometido a un proceso de esterilización por calor. ■

AGRADECIMIENTOS

REMS ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de los proyectos (AYA2110-25720 / ESP2006-27267 / ESP2007-65862), el Centro de Desarrollo Industrial (CDTI) y del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

El instrumento REMS ha sido creado bajo responsabilidad de los Dr. Luis Vázquez (antiguo PI) y Dr. Javier Gómez-Elvira del Centro de Astrobiología (CAB INTA-CSIC) actuando como Investigadores Principales.

Crisa, una compañía del grupo EADS-Astrium en España, ha sido el contratista principal para el desarrollo del instrumento. Crisa ha liderado tanto la ingeniería a nivel de sistema y el diseño de detalle como la calidad y gestión del proyecto. Han sido varios los subcontratistas y colaboradores como el Finish Meteorological Institute (FMI, en Finlandia), la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC-GDS) en España, la compañía Italiana Sital (antigua Aurelia Microelettronica), el grupo Alter (España), el Instituto de Microelectrónica de Sevilla IMSE-CNM (España), las compañías 3D Plus y Astrium SAS (ambas en Francia), entre otros.

EQUIPO REMS

Armiens, Carlos – CAB (CSIC-INTA)
 Barrera, José – EADS-Crisa
 Blanco, Juan J. – Universidad de Alcalá de Henares (UAH)
 Castañer, Luis – Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
 de la Torre, Manuel - Jet Propulsion Laboratory
 Díaz, Fernando – EADS-Crisa
 Domínguez, Manuel – Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
 Ferrándiz, Ricardo – INSA
 Genzer, Maria – Finnish Meteorological Institute (FMI)
 Gómez, Felipe – CAB (CSIC-INTA)
 Gómez-Elvira, Javier – CAB (CSIC-INTA)
 Kahanpää, Henrik – Finnish Meteorological Institute (FMI)
 Kowaski, Lukas – Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
 Harri, Ari-Mati – Finnish Meteorological Institute (FMI)
 Haberle, Robert – NASA Ames Research Center
 Jiménez, Vicente – Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
 Lepinette, Alain – CAB (CSIC-INTA)
 Martín-Soler, Javier – CAB (CSIC-INTA)
 Martín-Torres, Javier – CAB (CSIC-INTA)
 Martínez-Frías, Jesús – CAB (CSIC-INTA)
 McEwan, Ian – Caltech
 Mora, Luis – CAB (CSIC-INTA)
 Moreno, José – EADS-Crisa
 Muñoz, Guillermo – CAB (CSIC-INTA)
 Navarro, Sara – CAB (CSIC-INTA)
 Pablo de, Miguel Ángel – Universidad de Alcalá de Henares (UAH)
 Peinado, Verónica – CAB (CSIC-INTA)
 Peña, Antonio – EADS-Crisa
 Polkko, Jouni – Finnish Meteorological Institute (FMI)
 Ramos, Miguel – Universidad de Alcalá de Henares (UAH)
 Rodríguez-Manfredi, José Antonio – CAB (CSIC-INTA)
 Renno, Nilton – University of Michigan
 Ricard, Jordi – Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
 Richardson, Mark – Caltech
 Romeral, Julio – CAB (CSIC-INTA)
 Scodary, Anthony - Jet Propulsion Laboratory
 Sebastián, Eduardo – CAB (CSIC-INTA)
 Serrano, Jaime – EADS-Crisa
 Sobrado Vallecillo, Jesús Manuel – CAB (CSIC-INTA)
 Torrero, Francisco - EADS-Crisa
 Torres, Josefina – CAB (CSIC-INTA)
 Urquí, Roser – INSA
 Velasco, Tirso – EADS-Crisa
 Verdasca, José – CAB (CSIC-INTA)
 Zorzano, María-Paz – CAB (CSIC-INTA)

Recubrimientos protectores de proyección térmica para la industria aeronáutica

N. CINCA, J.M. GULEMANY

Centro de Proyección Térmica (CPT)

Departamento de Ciencia de los Materiales

e Ingeniería Metalúrgica. Facultad de Química

Universidad de Barcelona

1. INTRODUCCIÓN: MATERIALES EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA

1.1 Consideraciones Generales

En el presente estudio se trata de hacer una revisión de los materiales utilizados en el sector aeronáutico, haciendo especial énfasis en el uso de recubrimientos que puedan proporcionar una mejora de las propiedades superficiales en aquellas estructuras que lo requieran debido a las condiciones de servicio a que se ven sometidas.

La ingeniería aeronáutica intenta conseguir que la relación entre la sustentación y la resistencia total sea lo más alta posible, lo que se obtiene teóricamente al igualar la resistencia aerodinámica (producida por la fricción que se opone a que los objetos se muevan en el aire) con la inducida (resultado de la sustentación producida por las alas de la aeronave), pero dicha relación en la práctica está limitada por factores como la velocidad y el peso admisible de la célula del avión ^[1].

Actualmente la investigación en este sector trata el estudio de nuevas configuraciones de la aeronave, aerodinámica avanzada, materiales y estructuras, tecnologías de motores, sistemas mecánicos, eléctricos e hidráulicos, mejoras de las condiciones ambientales de la cabina y utilización de servicios multimedia para incrementar la comodidad de los pasajeros, así como una mejora del impacto ambiental en lo que se refiere a emisiones y ruido y, una mejora en la seguridad.

Para aquellos componentes donde es decisivo que confluyan resistencia y ligereza (componentes estructurales, secciones de compresor o bastidores de motor), se emplean diversas aleaciones de aluminio y titanio. Las aleaciones de cromo, níquel y cobalto se emplean donde se requiere resistencia a la corrosión y a altas temperaturas (cámara de combustión y secciones de turbina) ^[2]. La figura 1 establece aquellas propiedades tecnológicas que deben

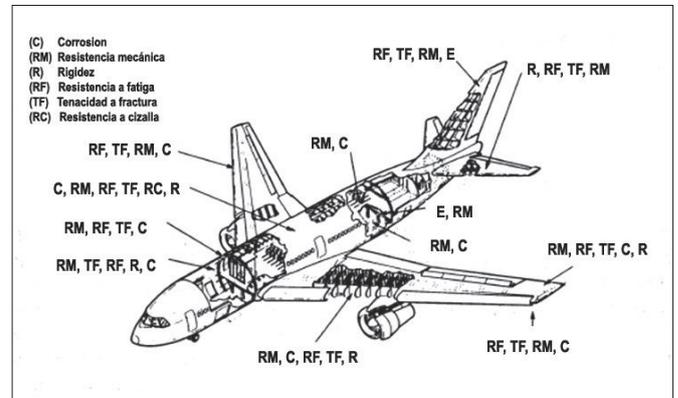


Fig 1. Propiedades tecnológicas requeridas en las distintas partes de una aeronave.

ofrecer los materiales que componen cada una de las partes de un avión.

Es importante ver el auge de los materiales compuestos. Para proporcionar una mejora en las propiedades ya se han integrado materiales compuestos de matriz metálica (MMCs). En cuanto a la matriz, se ha investigado la utilización de distintas aleaciones, sin embargo, las aleaciones de aluminio son las más utilizadas. Para los refuerzos, se incluyen básicamente cerámicos como SiC, Al₂O₃, B₄C, TiC, TiB₂, grafito, etc y, en menor medida, metales como wolframio y acero. Además del tipo de material para la matriz y el refuerzo, otra variable importante a considerar es la geometría del refuerzo (partículas, láminas o barras) ^[3, 4, 5]. La figura 2 muestra el progreso de incorporación de

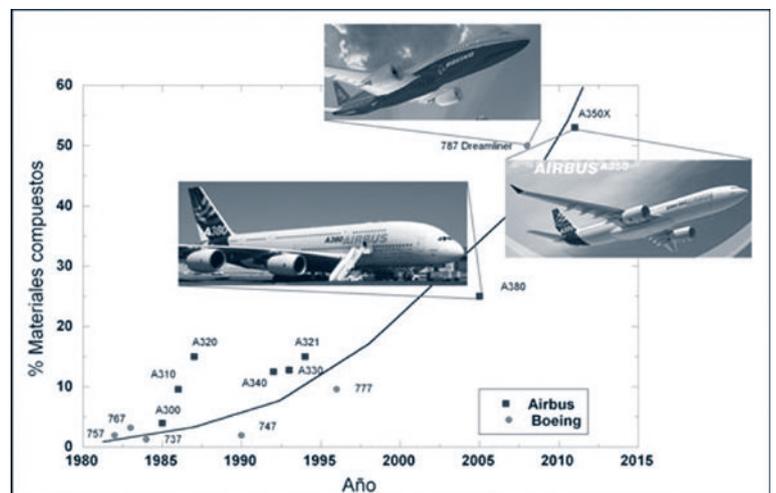


Fig 2. Tendencia de los materiales compuestos usados en el sector aeronáutico ^[6].

los materiales compuestos en los aviones Airbus y Boeing a lo largo de los años.

Las innovaciones en este sector se han concentrado en la nanotecnología adquiriendo especial relevancia en el mundo de los materiales. Así es el caso de la estadounidense Boeing que ha trabajado en el desarrollo de compuestos nanoestructurados para aligerar el peso del fuselaje de su avión 787. Según informó la empresa en 2008 [7], esta aeronave está formada hasta un 50% de metales y aleaciones y el resto por materiales compuestos, que no son más que laminados base fibras de carbono y resinas, cuyos beneficios, al reducir su peso, significarán alcanzar velocidades de 900 km/h; reducir el consumo de combustible en 20% y los costos de mantenimiento en 30%. Además, la presurización será menor, y habrá más oxígeno y humedad en el interior.

También se ha investigado en la utilización de un material compuesto a base de nanotubos de carbono que es 100 veces más resistente que el acero y seis veces más ligero que el aluminio. Toyota ha sido una de las automotrices más adelantadas en la experimentación con nanotecnología. Hace más de una década introdujo en la industria automotriz un compuesto de nylon con nanoarcillas en las bandas del engranaje de distribución, logrando mayor estabilidad y resistencia al calor.

Pero más allá de los avances que está aportando la nanotecnología a las industrias de automoción y aeroespacial, están los beneficios de la seguridad, pues al contar con materiales más resistentes e inteligentes será posible evitar accidentes. Significa entonces que la adopción de esta tecnología irá acompañada no sólo de menores costos de producción, sino de confort y, sobre todo, seguridad, ya que además sus componentes serán más respetuosos con el medio ambiente y a menores precios finales.

A nivel de recubrimientos, hay que tener en cuenta las condiciones extremas que deben soportar; se puede diferenciar entre exteriores para lo cual se usan principalmente materiales poliméricos y aquellos más específicos. Algunas de dichas condiciones que deben soportar los recubrimientos exteriores se podrían resumir en:

- Estos recubrimientos están expuestos a velocidades que van de 450 km/h pasando por los 900 km/h y llegando hasta los 1500 km/h, dependiendo de si es una aeronave no presurizada, de pasajeros propulsada por turbinas o una aeronave de combate.

- Pueden estar expuestos a temperaturas que oscilan entre los -10°C y los 45°C en pista y hasta los -54°C en vuelo. Además, cabe tener en cuenta el desgaste que pueden sufrir por abrasión debido a las partículas que impactan durante el vuelo, el despegue y aterrizaje, o bien a im-

pactos por sólidos enviados por otras aeronaves, que son arrastradas por la potencia de los motores o turbinas de aquellas que se encuentran delante de ellas.

- Las condiciones de humedad debido a las velocidades de las aeronaves generan un efecto cortante en los recubrimientos, particularmente en zonas como los bordes, por lo que su adherencia es de vital importancia.

- Resistencia química de los recubrimientos a productos tales como combustibles, fluidos hidráulicos, hollín, detergentes y otros elementos como el lodo y la lluvia ácida.

1.2 Materiales en una Turbina a Gas para Aeronáutica

Una de las partes del avión que resulta más atractiva y desafiante con respecto a las posibles mejoras de los elementos que la componen, es la turbina a gas, o turbo-reactor, del avión (Fig. 3). Ésta se ve sometida en general a todo tipo de condiciones extremas: altas temperaturas, gases corrosivos, vibraciones, fatiga térmica y esfuerzos mecánicos [8,9]. Las aleaciones más idóneas para satisfacer muchas de las condiciones extremas señaladas son materiales base níquel, tales como las superaleaciones. Sin embargo, las superaleaciones de níquel presentan limitaciones a temperaturas elevadas ($T > 1100^{\circ}\text{C}$); por este motivo, los componentes de la propia cámara de combustión, donde se alcanzan temperaturas de dicho orden, se construyen alternativamente con aleaciones de cobalto. Estas aleaciones se utilizan también para fabricar los álabes del estator de las secciones de la turbina más próximas a la cámara de combustión. Las aleaciones de cobalto no gozan de la resistencia mecánica que sí poseen las superaleaciones de níquel, pero mantienen su resistencia a temperaturas más elevadas, debido, principalmente, a la distribución de carburos refractarios; también contienen niveles elevados de cromo, lo que aumenta la resistencia

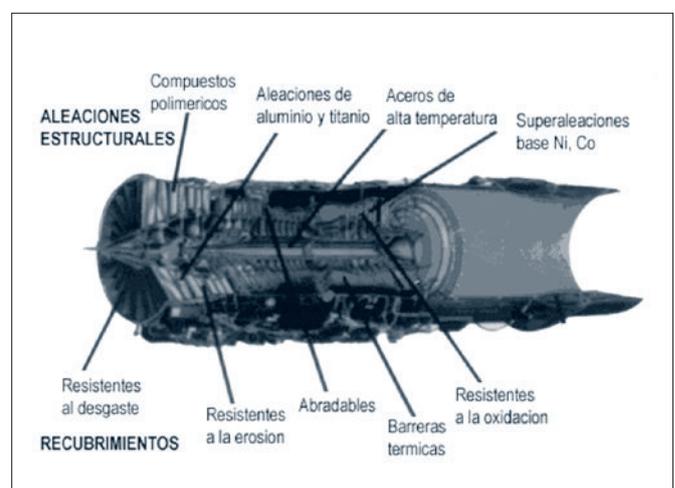


Fig 3. Materiales comúnmente empleados en una turbina.

a la corrosión provocada por la presencia de los gases calientes de combustión.

En ciertos casos, el peso de cada componente puede llegar a ser tanto o más importante que la resistencia mecánica y la consistencia a elevadas temperaturas. Tal es el caso de los álabes y de los discos de las turbinas de los aviones situados en la zona de entrada del compresor, donde la temperatura y la presión son moderadas. Las aleaciones de titanio se han revelado como las más idóneas para esta aplicación. Estas aleaciones tienen mucha menor densidad que las de cobalto y que las superaleaciones de níquel, y, por lo tanto, una mayor relación resistencia/peso para temperaturas inferiores a los 500 °C. A pesar de los numerosos progresos llevados a cabo en el campo de las técnicas de aleación, de los tratamientos térmicos y de los trabajos mecánicos, la máxima temperatura de trabajo que resisten las aleaciones de titanio es todavía demasiado baja. Éstas pierden su resistencia mecánica calentándolas a temperaturas absolutas del orden de la mitad de su punto de fusión, mientras que las superaleaciones la mantienen hasta aproximadamente siete u ocho décimos de su temperatura de fusión.

Debido a las demandas del sector aeronáutico, en materiales resistentes, tenaces y dúctiles a altas temperaturas, una posibilidad incipiente pero prometedora para superar la limitación de temperaturas, es el que ofrecen determinados materiales intermetálicos que podrían llegar a sustituir a las superaleaciones y hacen que la investigación en dicho campo esté recibiendo un fuerte impulso. Hasta el momento, sus aplicaciones se ven limitadas a pequeños componentes donde las ventajas respecto al titanio incluyen mayor resistencia y rigidez específica, así como mejor resistencia a altas temperaturas.

Los aluminuros de níquel, hierro y titanio son los intermetálicos más prometedores para ser utilizados a escala industrial, en aplicaciones estructurales donde se requiera una buena relación resistencia mecánica/masa y resistencia a la oxidación a elevadas temperaturas ^[10]. La mayor parte del trabajo que se está llevando a cabo en aleaciones TiAl, se centra en compuestos bifásicos TiAl/Ti₃Al ya que son más dúctiles que el compuesto monofásico. Las aleaciones γ -TiAl son utilizadas por la industria aeroespacial y del automóvil por su baja densidad, alta relación resistencia-peso y elevada rigidez, que permiten un ahorro de peso de hasta el 50%. Estos compuestos se han aplicado ya en la obtención de compresores y de anillos del estator de turbinas; un anillo de titanio-aluminio del estator es casi un 43 % más ligero que un anillo fabricado con una superaleación convencional de níquel. Sin embargo, estas aleaciones no resisten temperaturas superiores a 800°C, mientras que las aplicaciones futuras que planean dichas industrias exigen trabajar a temperaturas entre 900 y 1000°C, por lo cual la aplicación de recubrimientos supondría una mejora en las propiedades.

1.3 Problemática de los Componentes Estructurales en Servicio

Como se ha podido constatar en los apartados anteriores, el estudio en el área de ciencia de materiales para desarrollar nuevos componentes en el sector aeronáutico implica una estrecha colaboración entre los distintos centros de investigación y la industria. Los nuevos conocimientos dan solución a muchos problemas pero a la vez plantean nuevos retos, siempre brindando la máxima seguridad y extendiendo al máximo la vida útil. La resistencia a mayores cargas para conseguir una mayor capacidad pero a la vez el uso de materiales ligeros, o bien el desarrollo de nuevas aleaciones o recubrimientos resistentes a altas temperaturas que permitan a los motores trabajar a mayores potencias, son algunos de los temas de interés actuales en los que está involucrado el Centro de Proyección Térmica (CPT) de la Universidad de Barcelona.

Muchos de los componentes de una aeronave se encuentran sometidos a diferentes mecanismos de desgaste; para hacer frente a tal problema, las piezas suelen recubrirse con materiales que presentan buenas propiedades tribológicas. Las técnicas comúnmente utilizadas son las de Proyección Térmica; se trata de mejorar las propiedades superficiales del componente para su servicio sin tener que recurrir a un material macizo ^[11].

2. LA PROYECCIÓN TÉRMICA COMO INNOVACIÓN EN LA MEJORA DE COMPONENTES EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA

El sector de la aeronáutica es y ha sido uno de los grandes usuarios en cuanto a la aplicación de estas tecnologías, no solamente en referencia a las etapas de fabricación de las piezas originales sino también durante la reparación y el reacondicionamiento de las mismas.

La figura 4 presenta las secciones de una aeronave que sería necesario recubrir como consecuencia de las condiciones a que se encuentran sometidas en servicio.

Los componentes que se encuentran sometidos a desgaste y corrosión en general son los que componen el tren de aterrizaje. Los amortiguadores del tren de aterrizaje absorben y disipan la energía del impacto del aterrizaje y reducen las tensiones en el fuselaje. Las juntas del tren de aterrizaje deben ser capaces de trabajar en condiciones de estanqueidad exigentes y resistir temperaturas extremadamente bajas durante el vuelo, que pueden llegar hasta -54°C durante largos periodos de tiempo. Los sistemas del tren de aterrizaje deben resistir miles de ciclos durante la vida en servicio del avión, por lo cual el material que forme el recu-

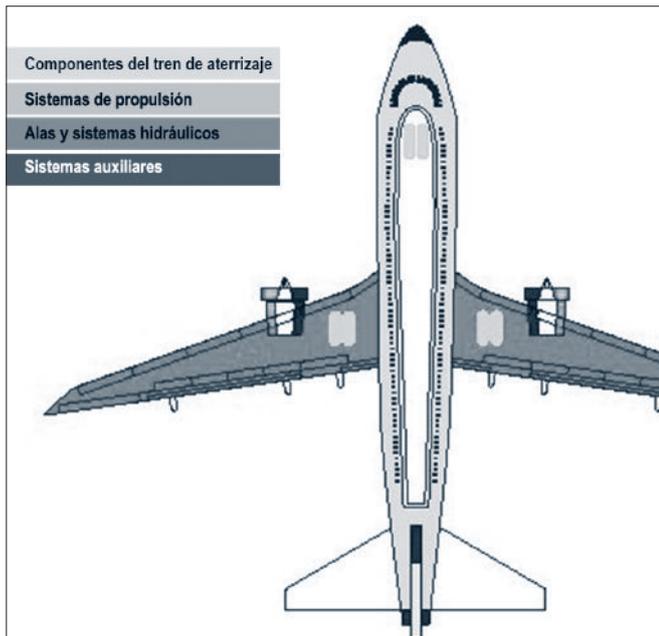


Fig 4. Partes de un avión que es necesario proteger.

brimiento debe tener una alta resistencia a la fatiga. Muchos de los componentes del tren de aterrizaje están recubiertos con cromo duro como la superficie interna de deslizamiento del cilindro. Sin embargo, la normativa medioambiental exige la sustitución de aquellos recubrimientos en que sea necesaria la utilización de cromo hexavalente. Ante esta exigencia, los recubrimientos obtenidos por proyección HVOF constituyen hoy día una alternativa viable, mejorando incluso las prestaciones obtenidas con los recubrimientos de cromo duro clásicos, tanto de resistencia al desgaste como de resistencia a la corrosión. En especial, se suele recurrir a la proyección de WC-Co, WC-CoCr ó Cr_3C_2 -NiCr por HVOF, es decir, recubrimientos consistentes en una matriz metálica reforzada con inclusiones cerámicas de alta dureza (CERMETS) [12, 13]. Estos recubrimientos permiten aumentar la carga permisible y la temperatura de operación en las juntas de fricción. Pueden mejorar también su respuesta a la fricción si se agrega hasta un 30% en volumen de una fase lubricante sólida; por ejemplo, grafito, MoS_2 , PbS o CuSn. Los recubrimientos de este tipo permiten alcanzar unas temperaturas de operación de hasta 900°C, soportan presiones de hasta 1200 MPa y poseen coeficiente de fricción de sólo 0.01 (80 veces inferior al acero).

Otros sistemas también habituales en aeronáutica como protección contra el desgaste por ludimiento (fretting) son: TiN (en los cojinetes), CuNiIn y bronce de aluminio (en las palas del compresor cuando las superficies de acoplamiento son de acero, titanio, níquel u otra aleación) con el objetivo de proteger también del desgaste por deslizamiento severo (galling) o, Co- Al_2O_3 en la sección de la turbina que incluye los alabes giratorios y estáticos, las cubiertas del estator de la turbina. También en el interior de los turbocompresores, se aplican recubrimientos abrasables, relacionados con la mi-

nimización de tolerancias entre partes móviles [14, 15]. Éstos se caracterizan por una matriz relativamente blanda, que envuelve una segunda fase, mucho más débil mecánicamente, que presenta propiedades de lubricación sólida.

Entre los recubrimientos abrasables más significativos aplicados por proyección térmica, se puede distinguir como sustitutos del teflón y los lubricantes sólidos.

1. AlSi-Polyester \Rightarrow Se suele aplicar a través de la técnica de proyección por plasma (APS) y es un abrasable de gran calidad usado en la sección del compresor para motores de aeronaves. Se utiliza a temperaturas hasta los 325 °C.

2. Ni-grafito \Rightarrow Aplicación por llama. Autolubricante. Se utiliza a temperaturas hasta los 480°C.

3. $Ni_{14}Cr_5Al_4BN$ \Rightarrow Características similares a los dos anteriores y especialmente usados para reducir la fricción en los cojinetes de los motores.

4. Al_2O_3 y $Al_2O_3-TiO_2$, CrC-NiCr, entre otras mezclas resistentes a la abrasión.

5. Al-Si- Polietileno y Al-Si- Poliamida como materiales autolubricantes recientemente introducido en la patente [16] por el Centro de Proyección Térmica.

A modo de resumen, en la siguiente tabla se presentan los diferentes problemas que pueden presentar cada una de las partes de un avión, juntamente con las posibles soluciones en cuanto a recubrimientos de proyección térmica.

Además de contribuir en la mejora de propiedades en servicio para componentes en aviones comerciales, la proyección térmica también presta sus servicios a aplicaciones más específicas en otros sectores aeronáuticos como en pequeñas aeronaves y helicópteros [17].

La eficacia del combustible aumenta con la eficiencia de los componentes y de los ciclos y, con la resistencia de los materiales escogidos para resistir elevadas temperaturas. Cuanta más alta sea la temperatura, más problemas de corrosión aparecen. Así mismo, problemas de fluencia y fatiga térmica también pueden contribuir al fallo de los álabes de turbina. Por este motivo, las técnicas de proyección térmica son una excelente solución ya que proporcionan unos recubrimientos eficaces frente a unas condiciones tan agresivas.

En cuanto al uso de recubrimientos para la mejora del rendimiento de la combustión, deben protegerse de la oxidación todas aquellas piezas expuestas a gases calientes. El concepto TBC (Thermal Barrier Coating) está basado en la colocación de una capa aislante térmico entre el componente metálico y el gas caliente de la fuente de calor para reducir la transferencia de este calor al componente. Consiste en

Tabla 1. Materiales con los que se suelen recubrir las principales partes afectadas en un avión.

Principales objetivos de los recubrimientos	Material	Zona afectada
Resistencia al desgaste, a corrosión y a fatiga	WC-Co	Componentes del tren de aterrizaje
Resistencia a la corrosión	WC-Co, Cr ₃ C ₂ -NiCr	Sistemas de propulsión
Resistencia al desgaste por ludimiento (fretting)	WC-Co	Sistemas hidráulicos y componentes de las alas
Resistencia al desgaste por deslizamiento		
Resistencia al desgaste abrasivo y erosivo	WC-Co, Al ₂ O ₃	Sistemas auxiliares
Resistencia a la corrosión a altas temperaturas	Aleación de Co	
Compatibilidad con un cierre de carbón	Cr ₃ C ₂ -NiCr	Turbo reactor: cojinetes y accesorios
Resistencia al desgaste por deslizamiento y ludimiento (fretting)	TiN, WC-Co, Cr ₃ C ₂ -NiCr, WC-NiMoCrFeCo, WC-Co-Cr, WC-CrC-Ni	
Resistencia al deslizamiento severo (galling) y ludimiento (fretting)	Bronce de aluminio	
Resistencia al desgaste y a la corrosión	NiAl	Turborreactor: compresor
Prevenir sobrecalentamiento y desgaste	Al ₂ O ₃ -TiO ₂ , Al ₂ O ₃	
Resistencia al desgaste por ludimiento (fretting)	WC, CrC, Co- Al ₂ O ₃ , WC-NiMoCrFeCo, WC-CoCr, WC- Cr ₃ C ₂ -Ni	Turbo reactor: turbina
Proporcionar aislamiento térmico	TBC (ZrO ₂ -Y ₂ O ₃)	Tubo reactor: zona de combustión

una capa de anclaje metálica de NiAl (50 µm), PtAl₂ o Ni/CoCrAlY (100-200 µm), que protege al sustrato de la corrosión en caliente y ayuda al anclaje posterior de una capa de cerámica (ZrO₂ estabilizada con 6-8% Y₂O₃) como aislante térmico aumentando así la vida útil del componente. Los recubrimientos aplicados por tecnologías de plasma aíslan el calor producido reduciendo así las pérdidas de energía y aumentando la eficacia del proceso [18,19].

Las barreras térmicas base cerámicas, proporcionan protección de los componentes metálicos que sufren degradación por corrosión, oxidación o carga de calor excesiva durante servicio en ambientes térmicamente drásticos que pueden llegar a temperaturas de hasta 2000 °C. Los gases de combustión se encuentran a temperaturas superiores a 1000 °C y las superaleaciones tienen puntos de fusión entre 1200-1315°C. Por lo tanto, las barreras térmicas se usan ampliamente para aislar las superaleaciones de los álabes fijos y rotatorios del flujo de gas caliente dando así lugar a un aumento de la vida media de dichos componentes, un aumento de la eficiencia (temperatura de trabajo), disminución del uso de combustibles (hasta 20%), disminución de uso de refrigerante (hasta 36%) y reducción de tensiones en el material estructural.

Otro beneficio que ofrece la aplicación de TBC en los pistones, es que al reducir la temperatura alcanzada, se re-

duce su expansión térmica. Esto permite mantener constante la tolerancia entre la superficie de los anillos y la pared del cilindro, aumentando el sellado.

Sobre estas partes, se suelen aplicar recubrimientos base cobalto, MCrAlY, PtAl₂ y las diferentes posibilidades que ofrecen las barreras térmicas, especiales para la protección contra la corrosión a alta temperatura debido a su baja conductividad térmica.

Otros recubrimientos metálicos usados para la protección a altas temperaturas y que presentan muy buena adherencia al sustrato son aleaciones: NiCr, NiCrAl, NiAl, entre otras.

3. ESTADO DEL ARTE: INVESTIGACIONES

E INNOVACIONES EN EL CENTRO

DE PROYECCIÓN TÉRMICA (CPT)

Dentro de los proyectos de investigación en las que está trabajando en la actualidad el Centro de Proyección Térmica, cabe destacar:

1. Recubrimientos Resistentes al Desgaste: Una amplia gama de polvos nanoestructurados y microestructurados de diferentes materiales (Cr₃C₂-NiCr, WC-Co, WC-Co +

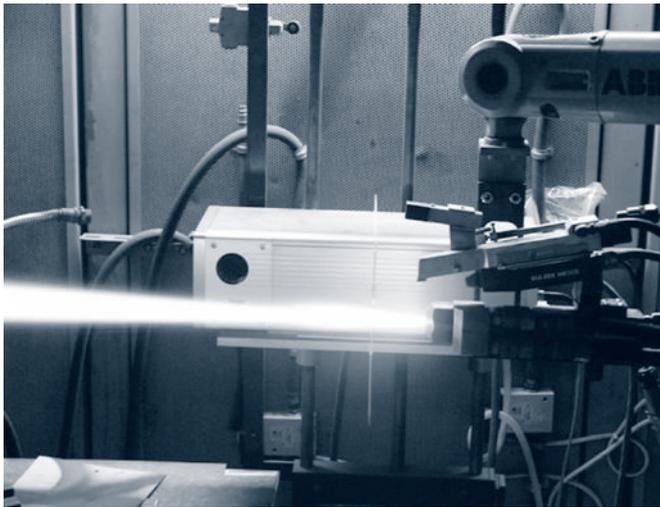


Fig 5. Instalaciones del Centro de Proyección Térmica.

NiCrBSi, NiCrBSi, y molibdeno), proyectados por HVOF o APS. Materiales como el Bronce-Aluminio (BzAl), WC-Co y WC-CoCr, con transformaciones en este rango de temperaturas son ensayados para estudiar la forma en que varía el coeficiente de fricción con la temperatura de trabajo.

2. Recubrimientos Resistentes a la Corrosión: Recubrimientos como el WC-Co, Cr_3C_2 -NiCr, WC-Co(Ni)Cr y TiC-NiTi, usando polvos nanoestructurados y microestructurados sobre un sustrato de acero y aleaciones ligeras base Al o Mg, son ensayados para detectar puntos débiles en su estructura y pérdida de permeabilidad debido a un medio agresivo o parámetros de proyección no optimizados. Recubrimientos metálicos como el NiCr, NiAl, NiCrAlY y aceros inoxidable han sido evaluados frente a electrolitos agresivos como el marino, o medios ácido o alcalinos. Los recubrimientos catódicos, como el Zn o el ZnAl y los polímeros poliamida y polietileno son también ensayados mediante técnicas electroquímicas (circuito abierto, resistencia a la polarización, voltamperometría cíclica e impedancia).

3. Recubrimientos Autolubricados: Los recubrimientos autolubricados presentan buenas propiedades antifricción ya que reducen su coeficiente de fricción. Se basan en introducir una dispersión de lubricante sólido en una matriz metálica. Estos recubrimientos han sido desarrollados para reemplazar los sistemas lubricados con aceites. Se han obtenido y estudiado recubrimientos convencionales de Níquel-grafito, AlSi-poliéster, NiCrBSi-grafito, Stellite-grafito, Cr_2O_3 - CaF_2 , y nuevas composiciones y mezclas como son el AlSi-poliétileno, AlSi-poliamida, AlSi-poliétileno-poliamida [20].

4. Sustitutivos del Cromo Duro: Anteriormente se ha mencionado el uso de este tipo de recubrimientos en componentes de los trenes de aterrizaje y su problemática ambiental. Para dar solución a esta incompatibilidad, se han desarrollado recubrimientos por HVOF de Cr_2C_3 -NiCr ; WC-Ni y WC-CoCr [21].

5. Barreras Térmicas: Se ha desarrollado un sistema gradual de NiCr-ZrO₂ que reduce el daño por desgaste e incrementa la dureza después de varios tratamientos térmicos. Algunos recubrimientos graduales producidos en el CPT muestran mejoras (por encima del 150%) en prestaciones y vida en

servicio bajo ciclos de choque térmico. La corrosión y oxidación a alta temperatura de circona parcialmente estabilizada (PSZ) y de alumina (Al_2O_3) sobre una gran variedad de recubrimientos de anclaje ha sido estudiada, así como el efecto de tratamientos térmicos severos (por encima de 1100°C) en las propiedades mecánicas y la microestructura. La figura 6 muestra la microestructura típica de una barra térmica. Asimismo también se han realizado estudios de tensiones residuales y adherencia en sistemas del tipo barra de anclaje-cerámica (NiCoCrAlY / CoNiCrAlY con 8/20% YSZ) con el fin de optimizar las condiciones para aumentar la vida del componente [22,23].

6. Recubrimientos Intermetálicos: Como innovación tecnológica, cabe mencionar la investigación en la obtención de recubrimientos intermetálicos ya que se ha comprobado sus buenas propiedades a altas temperaturas. Asimismo se ha iniciado el estudio del sistema Fe-Al en cuanto a la aplicación de recubrimientos para la protección de componentes estructurales. De acuerdo a los estudios realizados en este sector, la proyección del material se ha llevado a cabo mediante la técnica de HVOF intentando producir recubrimientos con la mínima porosidad y oxidación posibles con el fin de obtener una fase mayoritaria FeAl (40% at Al), que es la que proporciona las mejores propiedades [24, 25]. La figura 7 muestra uno de los recubrimientos de FeAl desarrollados en el CPT.

Cabe añadir que últimamente se está también investigando en la viabilidad del uso de la Proyección Fría (Cold Gas Spray) para la obtención de recubrimientos útiles en el sector aeronáutico. Hay algún estudio realizado en el tema de barreras de anclaje, así como el CPT ha realizado recubrimientos de bronce de aluminio, inconel y aleación de stellite con resultados exitosos [26, 27, 28]. Esta técnica, a diferencia de las convencionales, permite obtener recubrimientos

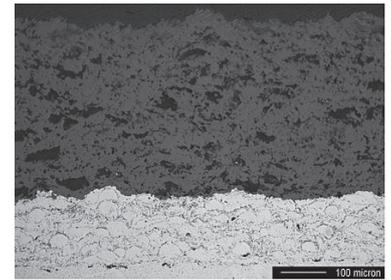


Fig 6. TBC: recubrimiento formado por una capa de anclaje CoNiCrAlY (HVOF) y superficialmente una capa de ZrO_2 - Y_2O_3 (APS).

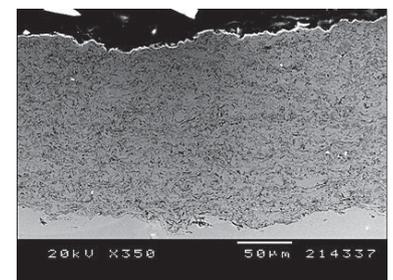


Fig 7. Recubrimiento de FeAl proyectado por HVOF.

más densos, sin oxidación ni presencia de fases indeseables ya que se mantiene la estructura del material de partida original.

A nivel de estrategias a seguir en el Centro de proyección Térmica en el sector aeronáutico, cabe destacar que desde el conocimiento de la microestructura, propiedades y prestaciones de los materiales, el centro ofrece experiencia en todos los aspectos de aplicaciones de los mismos, particularmente en la ingeniería de superficies.

El centro de Proyección Térmica tiene además instalaciones para la caracterización de materiales, cubriendo un amplio espectro de materiales. Este hecho proporciona la capacidad de asumir contratos de investigación para consorcios o clientes individuales.

El CPT como centro universitario pionero en la proyección térmica en España, es miembro de la red de Innovación (CIT) de la Generalitat de Catalunya y desde 2007 certificado por Messier-Dowty como centro experto en recubrimientos de Proyección Térmica para la industria aeronáutica. ■

BIBLIOGRAFIA

- Navegación Aerea (<http://centros5.pntic.mec.es/ies.arzobispo.valdes.salas/alumnos/navega1/aero.html>)
- B. Cameron. Construcción y mantenimiento aeroespacial. Industrias del transporte.
- W. H. Hunt, D. R. Herling. Aluminium Metal Matrix Composites. *Advanced Materials & Processes*, 162 (2) 2004.
- T. Burg, A. Crosky. Materials for Aeronautical Engineering. School of Materials Science and Engineering, University of New South Wales (2001).
- Los materiales compuestos. Dinamismo e innovación. Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. N° 158- febrero 2002
- <http://www.madrimasd.org/informacionIdi/analisis/analisis/analisis.asp?id=38324>
- <http://www.cnnexpansion.com/manufactura/tendencias/nanomateriales-el-futuro-automotriz>
- Metales Aeronauticos (http://www.ing.unlp.edu.ar/aeron/catedras/materiales/materiales_aeronauticos.pdf)
- V. Sovolev, J M Guilemany, J. Nutting, "High velocity oxy-fuel spraying". W. S. Maney and Son Ltd., Leeds, UK. ISBN 1902653726. (2004).
- A. Lasalmonie, *Intermetallics: Why is it so difficult to introduce them in gas turbine engines?* *Intermetallics* 14 (2006) 1123-1129
- J.M.Guilemany, J.Nin .Surface Coatings for Protection Against Wear., Edited by B.G.Mellor. Chapter "Thermal Spraying Methods for Protection Against Wear". Woodhead Publishing Limited. Abington, Cambridge. ISBN 1 85573 767 1.The Institute of Materials, Minerals and Mining. 448p. London. UK. (2006).
- J.M.Guilemany, N. Espallargas, P. H. Suegama, A. Botifoll, Recubrimientos de Cr3C2-NiCr obtenidos mediante Proyección Térmica de Alta Velocidad (HVOF) frente a recubrimientos de cromo duro. *Revista de soldadura y tecnologías de unión* 105 (2007) 16-20.
- N. Espallargas, J. Berget, J.M.Guilemany, A. V. Benedetti, P. H. Suegama, Cr3C2-NiCr and WC-Ni thermal spray coatings as alternatives to hard chromium for erosion-corrosion resistance, *Surface and Coatings Technology* 202 (2008) 1405-1417.
- J.M.Miguel, N.Cinca, S.Dosta, C.Lorenzana, J.M. Guilemany, Tribological Behaviour of Bronze Composite Coatings Obtained by Plasma Thermal Spraying, *Tribological letters* 42 (2011) 263-273.
- J.M.Guilemany, J. Navarro, C. Lorenzana, S. Vizcaino, J. M. Miguel, Tribological behaviour of abradable coatings obtained by Atmospheric Plasma Spraying (APS), *International Thermal Spray Conference 2001*. Singapore. ISBN 0-87170-737-3, pp. 1115-1118.
- Mezcla de polvos para Proyección Térmica, Procedimiento para la obtención de recubrimientos y recubrimiento obtenido. J. Sánchez, J. M. Guilemany, J- Fernández, J. R. Miguel, J. Navarro, D. Fernández, J. Nin. Patente de Invención n° 200301316 (2003). En Explotación por Sociedad Española de Carburos Metálicos S. A.- Centro de Proyección Térmica, UB. España. Solicitud Patente Internacional n° PCT/IB2004/0017
- PRAXAIR, www.praxair.com
- A. Gray, E. R. Sampson. Coating Solutions for Military Applications. *Advanced Materials & Processes*, 160 (5) 2002.
- A. Agüero, Recubrimientos contra la corrosión a alta temperatura para componentes de turbinas de gas, *Revista de Metalurgia*, 43 (5) (2007) 384-398.
- Mezcla de polvos para Proyección Térmica, Procedimiento para la obtención de recubrimientos y recubrimiento obtenido. J. Sánchez, J. M. Guilemany, J- Fernández, J. R. Miguel, J. Navarro, D. Fernández, J. Nin. Patente de Invención n° 200301316 (2003). En Explotación por Sociedad Española de Carburos Metálicos S. A.- Centro de Proyección Térmica, UB. España. Solicitud Patente Internacional n° PCT/IB2004/001705.
- P.H.Suegama, N.Espallargas, J.M.Guilemany, J.Fernández, A.V.Benedetti, Electrochemical and Structural Characterization of Heat Treated Cr3C2 - NiCr Coatings, *Journal of Electrochemical Society.The Electrochemical Society*.153 (10).B434- B445. UK. (2006).
- C. R. C. Lima, J. Nin, J. M. Guilemany. Evaluation of residual stresses of thermal barrier coatings with HVOF thermally sprayed bond coats using the Modified Layer Removal Method (MLRM). *Surface and Coatings Technology* 200 (2006) 5963-5972.
- C. R. C. Lima, J. M. Guilemany. Adhesión improvements of Thermal barrier coatings with HVOF thermally sprayed bond coats. *Surface and Coatings Technology* 201 (2007) 4694-4701.
- J.M. Guilemany, C.R.C. Lima, N. Cinca and J.R. Miguel. Studies of Fe-40Al coatings obtained by high velocity oxy-fuel. *Surface and Coatings Technology* 201 (2006) 2072-2079.
- J.M. Guilemany, N. Cinca, S. Dosta and C.R.C. Lima. High-temperature oxidation of Fe40Al coatings obtained by HVOF thermal spray. *Intermetallics* 15 (2007) 1384-1394.
- J. M. Miguel, S. Vizcaíno, S. Dosta, N. Cinca, C. Lorenzana, J. M. Guilemany Recubrimientos de materiales compuestos metal-cerámico obtenidos por nuevas tecnologías de proyección térmica: Proyección fría (CGS) y su resistencia al desgaste, *Revista de Metalurgia*, 47:5 (2011) 390-401.
- S. Dosta, N. Cinca, J. M. Guilemany, <<Structural and properties relationship of Alumina reinforced Inconel Cold Gas Sprayed coatings>>, *International Thermal Spray Conference 2012*, Houston (USA).
- N. Cinca, E. López, S. Dosta, J. M. Guilemany, Study of stellite-6 deposition by cold gas spraying, *Journal of Thermal Spray Technology* (per review).

MEDICINA Y SALUD

Valor nutritivo de los insectos comestibles

J. TELLO, A. MORENO DÍAZ, C. RUIZ OLMOS
Y A. BOIX RUIZ

Universidad de Almería. E-mail: jtello@ual.es

En un artículo anterior hacíamos referencia a la ingente biomasa que representan los insectos en el planeta. Y nos preguntábamos sobre cuales eran sus cualidades nutritivas.

De manera consciente o inconsciente la humanidad ha consumido y se alimenta con los insectos. Estos animales aprovechan, invaden y “contaminan” los productos que los seres humanos destinan a su alimentación. No es infrecuente encontrar insectos, en cualquiera de las fases de su desarrollo, en los alimentos que consumimos, sean éstos frescos o en conserva. Por tanto, sin ánimo de exagerar, podríamos

decir que todos consumimos insectos. Sin duda este hecho repugnará a más de un lector, que a cambio gustará de la miel que las abejas, tan laboriosas y ordenadas, producen. Este es un ejemplo más de la ambivalencia mantenida por la cultura europea sobre estos animales.

Los insectos se consumen en todos sus estadios vitales. Como huevos, larvas, pupas y adultos. Se consumieron en la antigüedad y se aprovechan en la actualidad. Son objeto de comercio y exportación: enlatados, fritos, en almíbar, envueltos en chocolate, al mojo de ajo, etc. Constituyen “delicatessen” para “gourmets”, que los pagan a precios astronómicos para su placer gastronómico. Hay investigaciones recientes que tienden a mostrarlos como los “buenos samaritanos” para paliar el hambre del mundo. Tal es la línea

de investigación emprendida por la Universidad Nacional Autónoma de México: “Los insectos como una fuente de proteínas en el futuro”. Los resultados demuestran que poseen una gran riqueza proteínica y vitamínica (especialmente del grupo B) y un alto contenido de minerales (sodio, potasio, fósforo y calcio).

Para considerar que un animal es apto para el consumo humano, debe evaluarse no sólo su valor nutricional sino, también, la eficiencia mediante la cual convierte el alimento que consume en peso de su propio cuerpo. De los animales que el hombre utiliza en su alimentación convencional, el pollo es el más eficiente en dicha conversión alimenticia. En este sentido, los insectos son comparados satisfactoriamente con el pollo.

Foto 1: Hormigas mieleras (*Myrmecocystus*). Apréciase la gota de miel que es deliciosa y de la cual se produce una bebida alcohólica por fermentación.



Cuadro 1: Valor nutritivo de los insectos comestibles (se expresa en g/100g de insecto)

ORDEN	Proteínas	Grasas	Sales minerales	Fibra cruda	Extracto libre de nitrógeno
Odonata (libélulas)	56'22	22'93	4'20	16'61	0'02
Orthoptera (langostas y saltamontes)	77'63	4'20	2'40	12'13	4'01
Hemiptera (chinchas)	62'80	9'67	8'34	10'46	8'70
Lepidoptera (mariposas)	58'82	6'80	6'09	26'22	1'98
Diptera (moscas)	35'81	5'80	31'12	22'00	5'18
Coleoptera (escarabajos)	31'21	34'30	1'72	32'72	0'05
Hymenoptera (hormigas, abejas y avispas)	60'60	10'61	5'36	10'18	13'14

El Cuadro 1 resume algunos componentes nutritivos de los insectos. Dentro de cada orden se han seleccionado los de mayor valor en proteínas.

La variabilidad en los insectos es muy grande. Es, por lo tanto, comprensible que el Cuadro 1 no sea más que un resumen indicativo. Es decir, que dentro de la misma familia de insectos los contenidos en nutrientes varíen de una especie a otra. Es más, que dicho contenido sea más o menos ricos según el régimen alimentario de los insectos. En cualquier caso, y pese a la simplificación, el cuadro nos informa sobre la riqueza proteínica de los insectos. Especialmente llamativo es el caso de las langostas y saltamontes: por cada gramo de insectos más del 70% está constituido por proteína. Como lo es el contenido en grasa de las orugas de los escarabajos, grasa que es siempre elevada en los estadios larvarios de los insectos en general. Pese a la cantidad indicada en el caso de las hormigas, abejas y avispas, la cifra menor en proteínas se alcanzan en las hormigas mieleras que poseen, en compen-

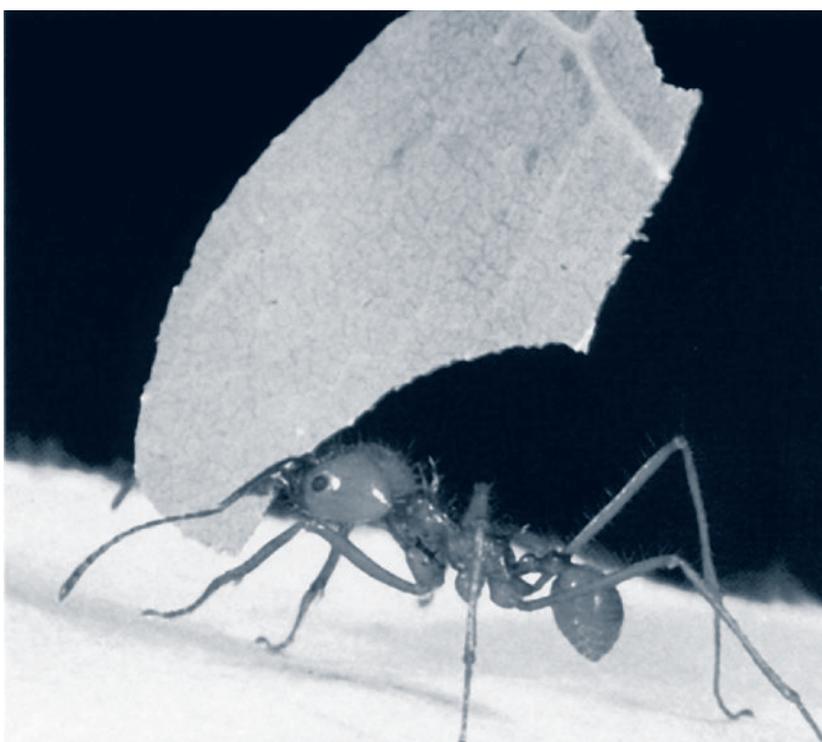
sación, un elevado contenido en carbohidratos y es, precisamente, por ellos por lo que se consume.

¿Qué calidad tienen las proteínas de los insectos comestibles?. Dicha calidad está en función de los aminoácidos esenciales que poseen y que deben ser ingeridos en la dieta cotidiana ya que no pueden ser formados durante el metabolismo de los alimentos consumidos. Los aminoácidos esenciales son entre otros: lisina, valina, leucina, treonina, isoleucina, metionina, cisteína, triptófano y fenilalanina. Son prescindibles en la dieta: histidina, ácido aspártico, serina, ácido glutámico, prolina, glicina, alanina y arginina. En el CUADRO 2 se expresa la riqueza de algunas especies comestibles. Riqueza que supera el patrón establecido por la FAO para la ingesta de aminoácidos esenciales o indispensables.

Hasta aquí hemos presentado muy someramente la riqueza proteínica de los insectos y el alto contenido de dicha proteína en aminoácidos esenciales. Pero deberíamos conocer la digestibilidad de dicha proteína. Las cifras obtenidas para algunas especies son bien elocuentes. Oscilan entre un 33% y un 95,94%. Un alimento cuya digestibilidad proteínica esté por encima del 60% se considera un *concentrado proteínico*. ¡Casi nada!. ¡Lo saltamontes o las pupas del gusano de seda son un concentrado proteínico como el que se nos oferta en las farmacias!.

Finalmente, no basta el contenido proteínico en un alimentos. Hay que considerar la eficiencia con la que convierte el animal lo que come en peso de su propio cuerpo. A nadie se le escapa que para la producción de huevos, leche o carne en los países más desarrollados es, frecuentemente, necesario gastar más energía que la contenida en los productos finales

Foto 2: Hormiga cortadora de hojas (*Atta*).



Cuadro 2: Contenido de aminoácidos en insectos comestibles (mg/16g)

	ORTHOPTERA	HEMIPTERA		COLEOPTERA
	Saltamontes	Chinches		Escarabajos
	<i>Sphenarium histrio</i>	<i>Euchistus Strennus</i>	<i>Krizousacorixa spp</i> <i>Notonecta spp (*)</i>	<i>Sciphophorus acupunctatus (**)</i>
1. Aminoácidos esenciales				
Isoleucina	5'3	3'9	5'0	4'82
Leucina	8'7	7'8	8'0	7'82
Lisina	5'7	5'0	3'5	5'35
Metionina + Cisteína	3'3	7'5	1'5	4'69
Fenilalanina + Tirosina	19'0	14'3	14'5	10'96
Treonina	4'0	3'9	4'0	4'04
Triptófano	0'6	0'6	1'1	0'81
Valina	5'1	5'9	6'0	6'20
TOTAL	51'7	48'66	43'6	44'69
2. Aminoácidos dispensables				
Histidina	1'1	3'3	3'3	1'47
Ácido aspártico	9'3	9'2	-	9'14
Serina	5'1	4'9	-	6'59
Ácido glutámico	4'3	12'1	-	15'65
Prolina	7'2	7'0	-	5'37
Glicina	5'3	8'1	-	6'07
Alanina	7'7	9'8	-	6'52
Arginina	6'6	3'3	7'7	4'40
TOTAL	46'6	57'7	-	55'21

(*) se valora en los huevos que es lo que se consume. (**) se valora en pupas y larvas.

comestibles. Para las vacas, por ejemplo, se preparan raciones alimenticias que bien podrían servir como alimentos humanos: maíz, trigo, sorgo, etc. Cuando se compara el contenido proteínico de los insectos con el de las plantas o productos vegetales de los cuales se alimentan, el resultado de la eficiencia alimentaria es bien sorprendente. Algunos ejemplos son muy significativos, aunque no permitan una generalización. Las orugas del taladro del maíz (*Heliothis zea*) contienen casi un 42% de proteínas, mientras que la planta de la que se alimenta no llega a 9%. Las orugas de otra mariposa que se nutre de chumberas o nopales (*Laniifera cyclades*), contienen cerca de un 46% de proteínas frente al 5% de la pencas que oradan. Las orugas del gusano blanco del maguey – ágave del cual se obtiene el pulque – y cuyo nombre para la ciencia es *Aegiale hesperiaris*, contienen el 31% de proteína frente a su hospedador que rebasa levemente el 8%.

Las antiguas culturas mesoamericanas no conocían, a buen seguro, estas cifras. Sin embargo eran – y son – buenas consumidoras de insectos. Y no sólo por hambre, como

se ha comentado anteriormente. Su valor nutritivo es bien notable. Son una excelente fuente de proteínas. El reclamo del restaurante berlinés con el cual comenzaron estos artículos no puede ser más que un esnobismo. Sin embargo, podemos asegurarles que algunas recetas son deliciosas. Las hormigas con chocolate, por ejemplo. Fuera de estas frivolidades, no cabe duda que la tradición azteca ofrece sugerencias nada desdeñables, pese a la cultural repugnancia que pueda surgir en no pocos lectores europeos. Repugnancia enraizada en nuestra educación. Los antropólogos nos ilustran con frecuencia sobre el beso entre enamorados. Nos dicen que en el subconsciente es el deseo de comerse al amado. Coloquialmente, sin analizar su alcance, decimos: te comería a besos. ¿Cuántos de nosotros estaríamos dispuestos al canibalismo?. Cuando en los Andes se estrelló un avión hace años, dos de los supervivientes del accidente se dejaron morir de hambre antes de consumir carne humana. El resto sobrevivió. La repugnancia a los alimentos tiene en numerosas ocasiones unos antecedentes culturales más que racionales. ■

Importancia de los telómeros y la telomerasa en cáncer, envejecimiento y medicina regenerativa

MIGUEL FORONDA, LUIS E. DONATE
Y MARIA A. BLASCO

Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO). Madrid

INTRODUCCIÓN

Los telómeros son unas estructuras celulares compuestas por repeticiones de secuencias de ADN localizadas en los extremos de los cromosomas, cuya función es proteger a éstos frente a la degradación que tiene lugar, de forma natural, durante la replicación de las moléculas lineales de ADN tras completarse cada ciclo de replicación¹. A dichas repeticiones se une un grupo de proteínas conocidas como *shelterinas*. Las *shelterinas* se encargan de proporcionar estabilidad y protección a los telómeros, y algunas de ellas participan activamente en su replicación y cohesión durante las distintas fases del ciclo celular².

La longitud telomérica es muy variable entre las distintas especies, y en cada ciclo replicativo los telómeros se acortan a causa del problema intrínseco de la replicación de los extremos de las secuencias de ADN lineales (fenómeno conocido en inglés como "end replication problem")³. Se ha postulado que los telómeros podrían funcionar a modo de "reloj biológico", reflejando el historial de las divisiones que cada célula ha experimentado a lo largo de su existencia⁴. De forma análoga, la longitud telomérica en cada tipo celular de nuestros tejidos disminuye con el tiempo, constituyendo por tanto una aproximación bastante representativa de la edad biológica de nuestros tejidos y órganos^{5,6}.

La telomerasa es una ribonucleoproteína cuya función enzimática es la de añadir repeticiones teloméricas *de novo* para así poder mantener una longitud telomérica estable a lo largo de la historia replicativa de determinados tipos celulares, aquéllos en los que se encuentra presente^{7,8}. La telomerasa se expresa durante el desarrollo embrionario, restringiéndose en el adulto a determinados compartimentos celulares tales como las células madre adultas, los órganos hematopoyéticos y las células reproductoras⁸⁻¹⁰. La activación de la telomerasa es suficiente para conferir un potencial replicativo ilimitado a las células, y, de hecho, es un evento frecuente durante la transformación tumoral¹¹⁻¹³.

El mantenimiento de la longitud telomérica, en consecuencia, requiere un delicado equilibrio entre erosión

y alargamiento, para evitar un acortamiento excesivo que daría lugar a la aparición de síntomas asociados al envejecimiento prematuro, o una actividad telomerasa aberrante que podría favorecer la inmortalidad de células malignas.

En esta revisión trataremos los aspectos más relevantes de la biología de los telómeros: en primer lugar describiremos en detalle su funcionamiento y el de las proteínas asociadas a ellos, así como la regulación de la longitud telomérica en el organismo; a continuación abordaremos la correlación existente entre los telómeros y el envejecimiento, incidiendo en algunas de las enfermedades humanas descritas asociadas a la disfunción telomérica, así como los modelos animales de estudio generados para estudiar la relación causal entre el acortamiento telomérico y la aparición de ciertos síntomas de envejecimiento prematuro; también trataremos la relación entre la integridad genómica y la homeostasis telomérica, y sus implicaciones en la aparición y progresión de distintos tipos de cáncer; y, finalmente, repasaremos los descubrimientos más recientes en la biología de las células madre y su estrecha relación con la actividad telomerasa y la longitud telomérica, así como las incógnitas que la investigación en el campo de la biología de los telómeros deberá tratar de resolver en los próximos años.

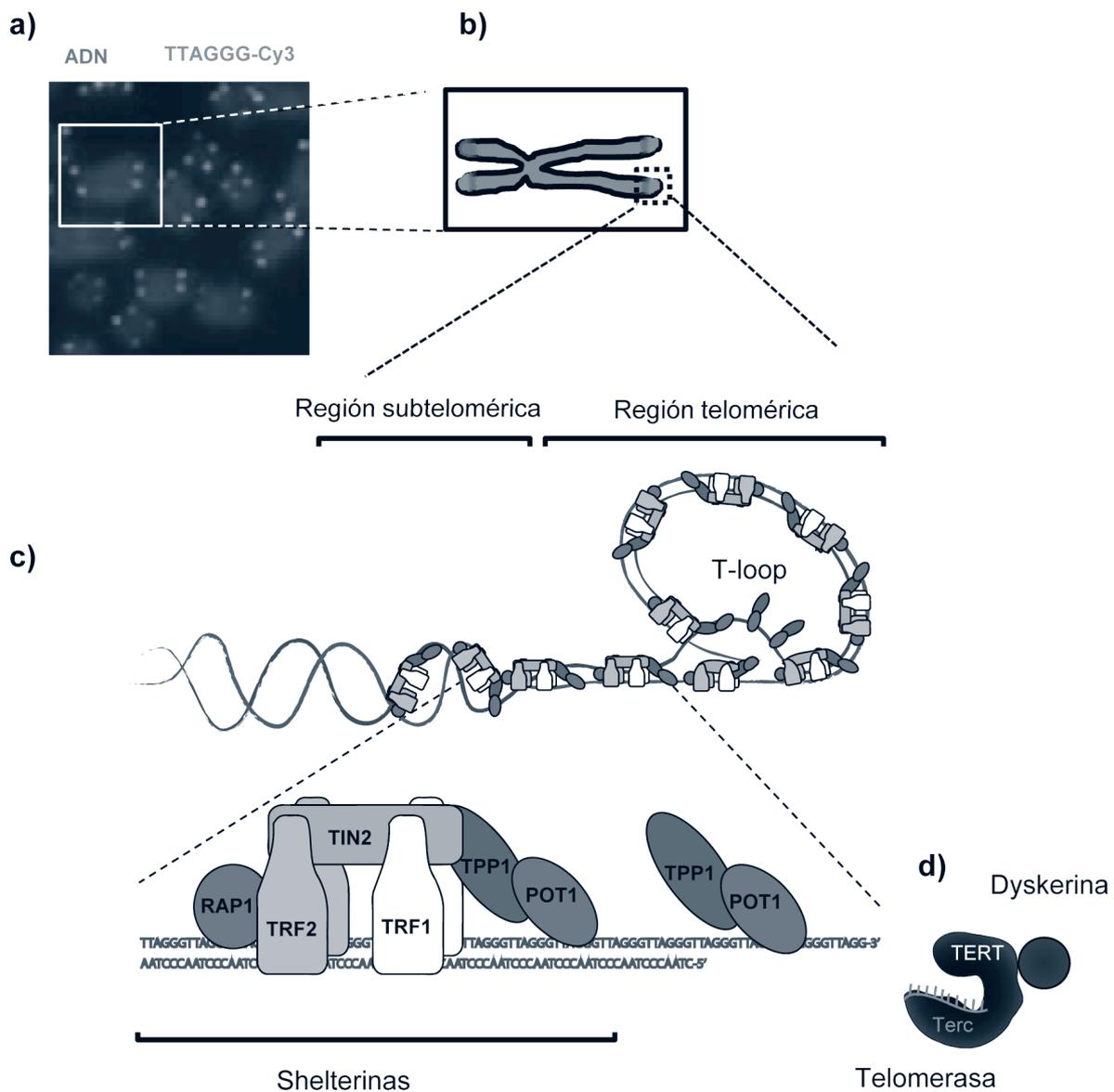
TELÓMEROS Y TELOMERASA.

ESTRUCTURA, FUNCIONAMIENTO

Y REGULACIÓN

Los telómeros son estructuras nucleoproteicas situadas en los extremos de los cromosomas, compuestas por repeticiones en tándem de una secuencia de doble cadena de ADN enriquecida en guanina (TTAGGG en todos los vertebrados), que en su extremo 3' presenta una estructura de cadena de ADN sencilla protuberante (denominada *G-strand overhang*). El ADN telomérico de los mamíferos se encuentra asociado a un complejo de seis proteínas denominadas *shelterinas* (del inglés *shelter*, refugio), compuesto por TRF1, TRF2, TIN2, RAP1, TPP1 y POT1. La principal función de las *shelterinas* es la de proteger a los telómeros de las actividades degradativas que se desencadenan a modo de respuesta ante las roturas de cadena en el ADN bicatenario y la subsecuente aparición de ADN expuesto de cadena sencilla¹⁴. Entre las funciones adicionales de las *shelterinas*,

Figura 1. Estructura de los telómeros



A) Imagen de microscopía de fluorescencia Metafase humana preparada a partir linfocitos de sangre periférica. La tinción de los cromosomas se realiza con DAPI (ADN, en azul), los telómeros, en los extremos de los cromosomas, se han marcado con una sonda telomérica de fluorescencia *in situ* (FISH) acoplada a un marcador fluorescente (TTAGGG-Cy3, en rojo).

B) Representación esquemática de un cromosoma.

C) Esquema de la composición y distribución del complejo de *shelterinas* en las regiones teloméricas y subteloómicas, así como de las secuencias repetitivas de ADN telomérico (TTAGGG). Los complejos POT1-TPP1 se unen preferentemente a las regiones de cadena sencilla, mientras que TRF1 y TRF2 reconocen secuencias de ADN bicatenario. TIN2 y RAP1 no presentan dominios de unión a ADN, por lo que ejercen su influencia sobre el telómero mediante la interacción con otras *shelterinas*: TIN2 une TRF1 y TRF2, y mediante un dominio distinto a los anteriores, es capaz de unirse a los complejos TPP1-POT1; RAP1 se une exclusivamente a TRF2. El telómero aparece representado en configuración en "Lazo-T" o *T-loop*, nótese la invasión de la hebra de cadena sencilla.

D) Representación esquemática de los principales componentes de la enzima telomerasa: polipéptido catalítico donde radica la actividad de polimerasa en reverso (TERT, en azul), molde de ARN para la adición de las repeticiones de ADN telomérico (TERC, en rojo) y proteína dyskerina de estabilización del componente ARN (en azul).

cabe mencionar las del reclutamiento de la telomerasa, la replicación de los telómeros, la cohesión entre las distintas shelterinas y la formación de estructuras terciarias de ADN que favorecen la estabilidad de los telómeros (el denominado *t-loop*)¹⁵⁻¹⁹ (Figura 1).

La telomerasa es una ribonucleoproteína cuya función es añadir *de novo* fragmentos de ADN con la secuencia repetitiva TTAGGG en los extremos de los telómeros. A tal efecto, la telomerasa se compone de una estructura proteica que presenta la actividad catalítica de polimerasa en reverso de ADN (el componente *TERT*, del inglés Telomeric End Reverse Transcriptase). También posee un fragmento de ARN de secuencia complementaria a las repeticiones teloméricas que se van a añadir, que la telomerasa utiliza a modo de molde sobre el que copiar los fragmentos que añadirá a las repeticiones preexistentes (el denominado componente *Terc*, del inglés Telomerase RNA component)²⁰⁻²². La telomerasa, por tanto posee una estructura y función análogas a las retrotranscriptasas virales. La actividad telomerasa constituye el principal mecanismo regulador de la longitud telomérica, si bien existen unos mecanismos alternativos para el alargamiento de la longitud telomérica que funcionan en ausencia de la telomerasa en ciertos tipos de cáncer como el osteosarcoma o el glioma multiforme²³. Las modificaciones epigenéticas en las regiones teloméricas y subteloméricas junto a la influencia de ARN teloméricos no-codificantes también influyen de forma drástica en la longitud telomérica y en su organización en dominios de cromatina, generando un nivel adicional de control de la longitud y función teloméricas^{15, 24-27}.

Los telómeros desempeñan una función de importancia crítica en el mantenimiento de la estabilidad genómica, y los efectos de su funcionamiento anómalo tienen un importante impacto en procesos vitales tan relevantes como son el envejecimiento o el cáncer²⁸. La función protectora de los telómeros fue descrita en el final de la década de los años 1930 de forma independiente y simultánea por los científicos Bárbara McClintock y Hermann Müller gracias a observaciones realizadas en sus diferentes modelos genéticos de estudio (*Zea mays* y *Drosophila melanogaster*, respectivamente), en los que detectaron que los extremos de los cromosomas era cruciales para asegurar una transmisión correcta y equitativa de la información genética a las células hijas durante el proceso de división celular²⁹. Los estudios posteriores de Hayflick^{30, 31} y Harley⁴ demostraron que durante la división celular los telómeros se acortan progresivamente en ausencia de expresión de telomerasa hasta alcanzar una longitud críticamente corta que desencadenaba respuestas de parada del ciclo celular y senescencia. Estas observaciones pioneras sentaron las bases sobre las que estudios posteriores relacionarían la aparición y el progreso de distintas patologías humanas y envejecimiento con el mantenimiento de la estructura y la longitud telomérica.

INTEGRIDAD TELOMÉRICA Y ACTIVIDAD

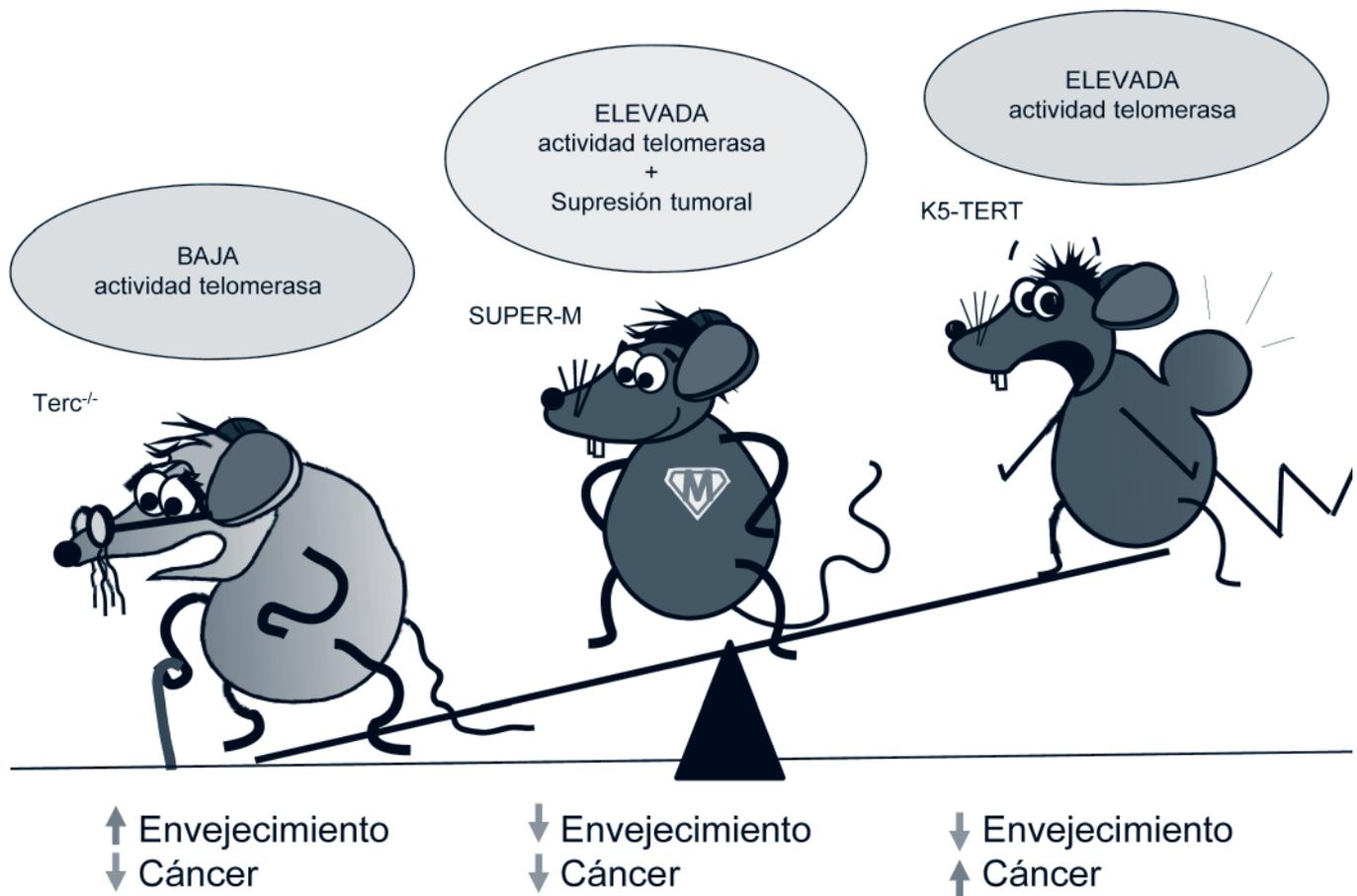
TELOMERASA EN ENVEJECIMIENTO

La generación de un ratón con delección genética en homocigosis del componente de RNA de la telomerasa (*Terc*^{-/-}) puso de manifiesto por primera vez la importancia de la telomerasa en el mantenimiento de la longitud telomérica en el contexto de un organismo vivo. Las células derivadas de la primera generación de ratones *Terc*^{-/-} (G1) mostraban un acortamiento telomérico acelerado, característica que se manifestaba de manera más acentuada en la segunda generación de ratones *Terc*^{-/-} (G2) y en las sucesivas.

Dicho acortamiento telomérico era también especialmente notable en los tejidos caracterizados por poseer unas elevadas tasas proliferativas como son la piel o el intestino, manifestándose a su vez en una reducción progresiva en las vidas máxima y media de dichos ratones en sucesivas generaciones (alcanzando ambos valores mínimos en la cuarta generación, G4, en la cual los ratones pierden su fertilidad y han tornado incapaces de generar descendencia). Los ratones *Terc*^{-/-} exhibían además numerosos síntomas de envejecimiento prematuro, tales como alopecia, pigmentación anómala de la piel, distrofia ungueal, anemia aplásica o leucoplaquia oral, recapitulando ciertas manifestaciones clínicas de algunos síndromes humanos asociados a la disfuncionalidad telomérica, como por ejemplo la diskertosis congénita (vinculada a la presencia de mutaciones en *diskerin*, proteína estabilizadora de *Terc*)³²⁻³⁶.

La caracterización de los ratones *Terc*^{-/-} sugiere que la actividad telomerasa es uno de los principales determinantes de la longevidad de un organismo. Por otro lado, la expresión ectópica de *TERT* en cultivos celulares primarios confiere potencial replicativo ilimitado, escapando por tanto al denominado límite de Hayflick, que establece que las células pueden confrontar una serie limitada de divisiones celulares, después de las cuales se desencadenan procesos de senescencia y parada en el ciclo celular. Para poder comprobar en un organismo vivo cuáles eran los posibles efectos de una actividad telomerasa incrementada, se generó el ratón K5-*TERT*, en el que se sobreexpresa en el epitelio estratificado el componente catalítico de la telomerasa³⁷. Los ratones K5-*TERT* disfrutaban de ciertos beneficios sistémicos ya que resultaban capaces de mantener una homeostasis tisular correcta durante más tiempo, y, en consecuencia, las patologías degenerativas asociadas al envejecimiento aparecían mucho más tarde que en los ratones control. Dichos ratones modificados presentaban, sin embargo, el inconveniente de haber adquirido una mayor susceptibilidad al desarrollo de tumores, inducidos por carcinógenos químicos o en presencia de mutaciones en los genes supresores de tumores. Para contrarrestar los efectos no deseados de la sobreexpresión de telomerasa, se generó un ratón que además de sobreexpresar *TERT*, tam-

Figura 2. Modelos animales para el estudio de la telomerasa



Influencia de la actividad telomerasa en la longevidad en diferentes contextos de supresión tumoral. En ratones con deficiencias en actividad telomerasa (izquierda, *Terc*^{-/-}) los telómeros se acortan de forma acelerada, provocando síntomas de envejecimiento prematuro y recapitulando algunas de las manifestaciones clínicas de síndromes humanos generados por mutaciones en telomerasa o en alguno de sus componentes. Los ratones *Terc*^{-/-}, sin embargo, presentan menos predisposición a desarrollar cáncer. En contraposición al modelo *Terc*^{-/-}, los ratones K5-TERT (derecha) con sobreexpresión de telomerasa en epitelio estratificado presentan un retraso en la aparición de síntomas de envejecimiento pero sin embargo son más susceptibles a la inducción de tumores por exposición a carcinógenos químicos. Finalmente, el modelo de ratón SUPER-M presenta alta actividad telomerasa combinada con dosis adicionales de genes supresores de tumores (p53, p16 y p19/ARF); estos ratones presentan una homeostasis tisular incrementada a lo largo de su vida, prolongando la longevidad de los ratones y previniendo la aparición prematura de tumores.

bién contenía en su genoma dosis adicionales de los genes supresores tumorales más importantes en ratones: p53, p16 y p19/ARF. Éstos ratones transgénicos, que para abreviar fueron denominados ratones SUPER-M, presentaban un retraso notable en la aparición de patologías degenerativas (pérdida de coordinación neuromuscular, marcadores de daño en el ADN, estructura y función epitelial) y también en la aparición de tumores (145 semanas en los ratones SUPER-M y 110 semanas en los ratones control)³⁸. La sinergia de estos efectos en homeostasis tisular y prevención de la aparición de cáncer se traduce en los ratones SUPER-M en un aumento de la longevidad mediana (punto en el que en

un grupo de estudio de una edad determinada permanece con vida) en un 40% respecto a su grupo control. En consecuencia, los ratones SUPER-M son la primera demostración formal en un organismo vivo de que la sobreexpresión de la telomerasa es capaz de influir dramáticamente en la determinación de la longevidad intrínseca a ese organismo concreto.

Con posterioridad a los ratones SUPER-M se han generado numerosos modelos animales de estudio en los que se ha realizado la ablación genética de alguno de los componentes proteicos estructurales de los telómeros, las *shelterinas*. La

mayoría de estas deleciones genéticas en las shelterinas conducen a la letalidad en etapas muy tempranas del desarrollo embrionario, por lo que el estudio de la abrogación de las mencionadas proteínas sólo puede realizarse en contextos de deleción específica de tejido. Por ejemplo, la deleción de TRF1 en epitelio estratificado (ratones TRF1^{ΔΔ};K5-Cre) es letal en etapas perinatales debido a una degeneración masiva y extremadamente acelerada de la piel de estos ratones, lo cual se traduce en su deshidratación y malnutrición, además de en una hiperpigmentación cutánea y una reducción del tamaño de los animales al nacer³⁹. Dicha degeneración está precedida de un acortamiento masivo en la longitud telomérica de los cromosomas de los queratinocitos junto con una acumulación de aberraciones cromosómicas generadas por los telómeros disfuncionales (fusiones cromosómicas, recombinación de cromátidas hermanas, cromosomas carentes de señal telomérica, presencia de señales teloméricas múltiples, etc.) recapitulando de nuevo algunas de las enfermedades humanas asociadas a las mutaciones en componentes de la telomerasa. Finalmente, se observó que la letalidad perinatal de los ratones TRF1^{ΔΔ}; K5-Cre podía ser rescatada parcialmente en ausencia del factor de transcripción p53, sugiriendo que, ante situaciones que comprometan la integridad telomérica, se desencadena una respuesta ante daño en el DNA mediada por p53 que previene la proliferación celular. La ausencia de p53 en condiciones de disfunción telomérica rescata los síntomas de envejecimiento prematuro en estos modelos de ratón; la incidencia de cáncer en estos ratones, sin embargo, es mucho mayor debido a la aparición extremadamente temprana de carcinomas epiteliales como el carcinoma de células escamosas³⁹ (Figura 2a y 2b).

Estas observaciones plantean la necesidad de buscar inhibidores químicos de las telomerasa que puedan actuar de forma localizada y controlada, para poder así prevenir la aparición y el progreso de manifestaciones tumorales sin influir en detrimento de la longevidad ni la homeostasis tisular.

IMPORTANCIA DE LA LONGITUD TELOMÉRICA Y ACTIVIDAD TELOMERASA EN CÉLULAS PLURIPOTENTES

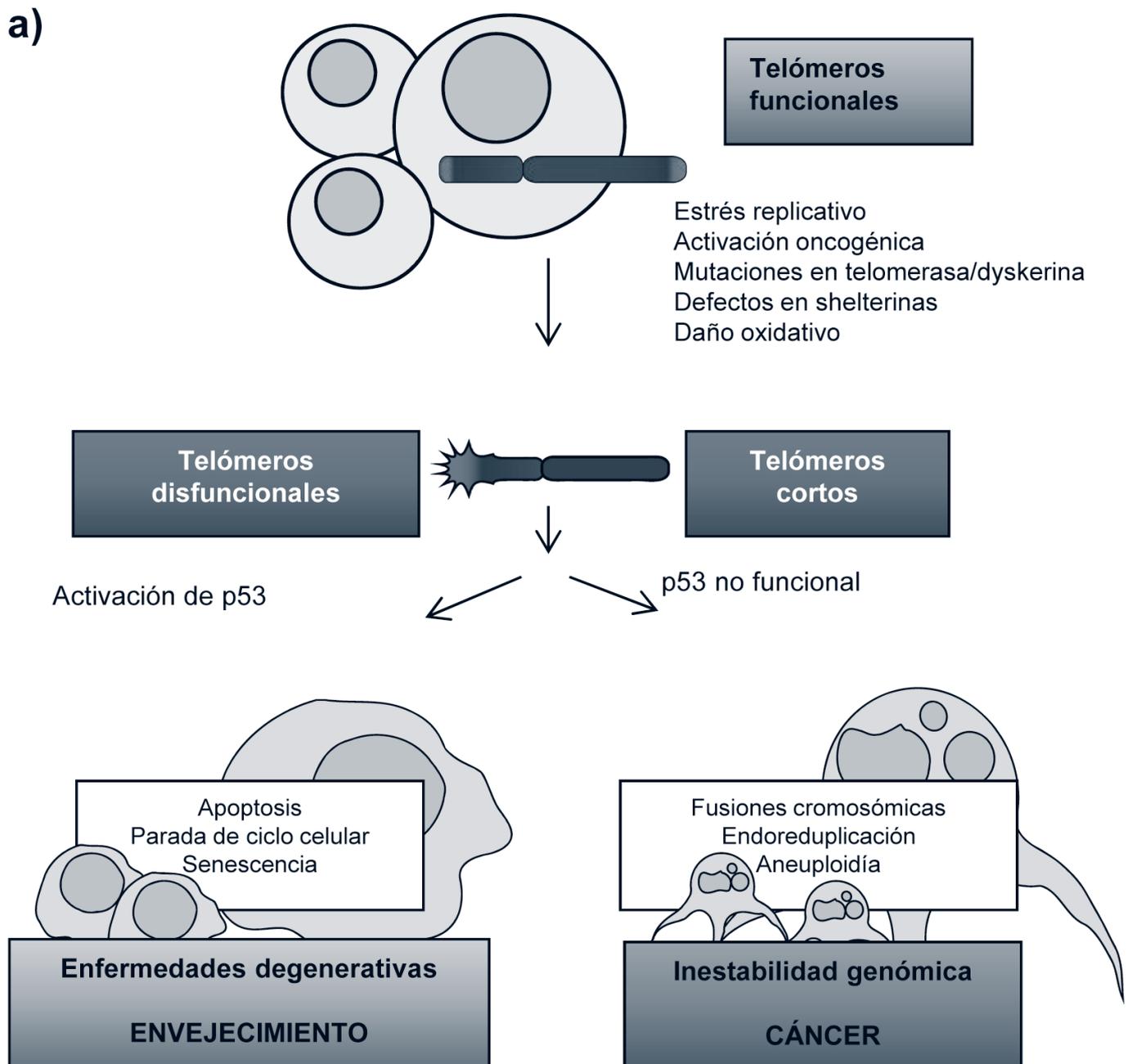
El estudio de la funcionalidad de los telómeros y la telomerasa en la biología de las células madre adultas y embrionarias es un campo a la vez fascinante, por su naturaleza joven e intrigante, y atractivo por el gran potencial de empleo terapéutico tanto en la medicina regenerativa como en los trataminetos de terapia génica. Las células tumorales y pluripotentes comparten numerosas características comunes, entre ellas la pérdida de diferenciación celular y la reactivación de la telomerasa. No es de extrañar, por tanto, que las células madre embrionarias presenten unos telómeros extremadamente largos en los estadíos de mórula

y blastocisto, así como en las células rederivadas en cultivos *in vitro* (si bien en estas condiciones existe una presión selectiva hacia las células con menor actividad telomerasa y los telómeros se elongan excesivamente de forma anómala)⁴³. A lo largo del desarrollo embrionario, la actividad telomerasa desaparece en la inmensa mayoría de los linajes celulares (produciéndose consecuentemente un acortamiento progresivo ya *in utero*) exceptuando las células madre adultas. Los estudios de longitud telomérica realizados mediante una técnica de hibridación de fluorescencia *in situ* (FISH) sobre secciones de tejidos (una metodología desarrollada en nuestro laboratorio y que hemos denominado *telomapping*) han demostrado que las células con los telómeros más largos en cada tejido corresponden a las células que presentan marcadores tradicionalmente asociados a las células madre adultas⁴⁴. La longitud telomérica en estas células que portan los telómeros más largos disminuye con la edad o con los tratamientos que fuerzan la diferenciación y/o proliferación, confirmando que la presencia de telómeros más largos es un rasgo distintivo y universal de las células madre adultas.

Utilizando la metodología de *telomapping* junto con trazadores de pulso-caza (como el BrdU) en los ratones Terc^{-/-} se pudo estudiar el comportamiento de las células madre que portaban telómeros cortos, y se observó que la capacidad de movilización de éstas se encontraba drásticamente reducida, y que dicho fenómeno era reversible en ausencia de una proteína p53 funcional⁴⁵. Por otra parte, las células madre epidérmicas de los ratones K5-TERT eran más propensas a moverse, lo cual anticipa los fenotipos observados en los ensayos de regeneración (cierre de heridas y crecimiento del pelo más rápidos)⁴⁶ (Figura 3a y 3b). p53 parece además tener una implicación importante en el control de la proliferación y la movilización de las células madre que portan telómeros no funcionales, previniendo la diseminación de células que albergan aberraciones genómicas. La ausencia de folículos pilosos y el ensamblaje aberrante de algunos marcadores de diferenciación en los ratones TRF1^{ΔΔ}; K5-Cre, ambos fenotipos reversibles de nuevo en ausencia de p53, confirman el importante papel que desempeñan la telomerasa y la integridad telomérica en la funcionalidad de las células madres, surrogado al control establecido por p53 ante la presencia de anomalías cromosómicas³⁹ (Tabla 1).

Finalmente, un campo extremadamente excitante es el de la generación de células madre pluripotentes inducidas o iPSC (induced-Pluripotent Stem Cells) a partir de células adultas diferenciadas^{47,48}. Esta tecnología es el pilar sobre el que se apoya el grueso de la investigación actual en medicina regenerativa y terapia personalizada. Las iPSC adquieren características propias de las células madre embrionarias (mESC), y entre ellas cabe destacar un "rejuvenecimiento" general de los telómeros, que incluye una reactivación de la telomerasa y un incremento en la expresión de las *shelterinas*, la adquisición de una conformación epigenética de los telómeros propia de mESC, el incremento en la transcrip-

Figura 3a. Disfunción telomérica como inductor de cáncer y envejecimiento



A) Cuando aparece daño en el ADN telomérico, en células sanas con telómeros funcionales, éste puede tener orígenes diversos. La activación oncogénica está asociada al estrés replicativo, puesto que puede producirse un acortamiento telomérico a causa de la pérdida de longitud telomérica intrínseca derivada del excesivo número de divisiones celulares. En células que poseen elevadas tasas proliferativas, como las células madre, las mutaciones en la telomerasa o la dyskerina impiden el mantenimiento de la longitud telomérica. La ausencia de shelterinas funcionales genera desprotección de los telómeros, que son reconocidos entonces como ADN disfuncional. Todos estos defectos en la estructura y la longitud telomérica desencadenan una respuesta a daño en el ADN, cuyo principal ejecutor es el factor de transcripción p53, que activa vías de reparación de ADN, parada del ciclo celular y senescencia; en el contexto de un organismo este tipo de respuestas celulares se manifiestan en forma de envejecimiento prematuro. Por el contrario, en ausencia de p53 funcional, las aberraciones cromosómicas se propagan induciendo la acumulación de mutaciones y aneuploidía, favoreciendo la aparición de tumores, cáncer y metástasis.

Tabla 1. Modelos genéticos para el estudio del papel de los telómeros y la telomerasa en cáncer y envejecimiento

Genotipo	Envejecimiento	Cáncer
Terc^{-/-}	Envejecimiento prematuro: alopecia, atrofia intestinal, infertilidad, aplasia en médula ósea, disfunción renal, disfunción cardíaca, tamaño corporal reducido; movilización de células madre adultas reducida, cierre de heridas y regeneración del pelo retardados	Menor susceptibilidad a desarrollar tumores por carcinogénesis química.
Terc^{-/-}; p53^{-/-}	Rescate de algunos de los fenotipos (tamaño del organismo, cierre de heridas, regeneración del pelo), supervivencia reducida	Mayor susceptibilidad a carcinogénesis espontánea e inducida
K5-TERT	Respuesta proliferativa incrementada en epidermis (cierre de heridas, regeneración del pelo), mayor facilidad de movilización de células madre adultas epidérmicas, mayor longevidad en el grupo que no desarrolla tumores	Mayor susceptibilidad a protocolos de carcinogénesis epitelial
K5-TERT/sP53/sP16/sP19ARF	Aumento de la longevidad media en un 40%, retraso en la aparición de síntomas de envejecimiento (pérdida de coordinación neuromuscular, pérdida de tolerancia a la glucosa), funcionalidad de barreras epiteliales incrementada	Resistencia a la aparición de cáncer
TRF1^{ΔΔ}; K5-Cre	Letalidad perinatal a causa de barrera epitelial deteriorada de forma prematura, ausencia de folículos pilosos y glándulas sebáceas, hiperpigmentación e hiperqueratosis	Aparición de lesiones pre-neoplásicas
TRF1^{ΔΔ}; K5-Cre; p53^{-/-}	Rescate de letalidad perinatal y de los defectos en desarrollo embrionario y piel	Mayor incidencia de carcinoma de células escamosas

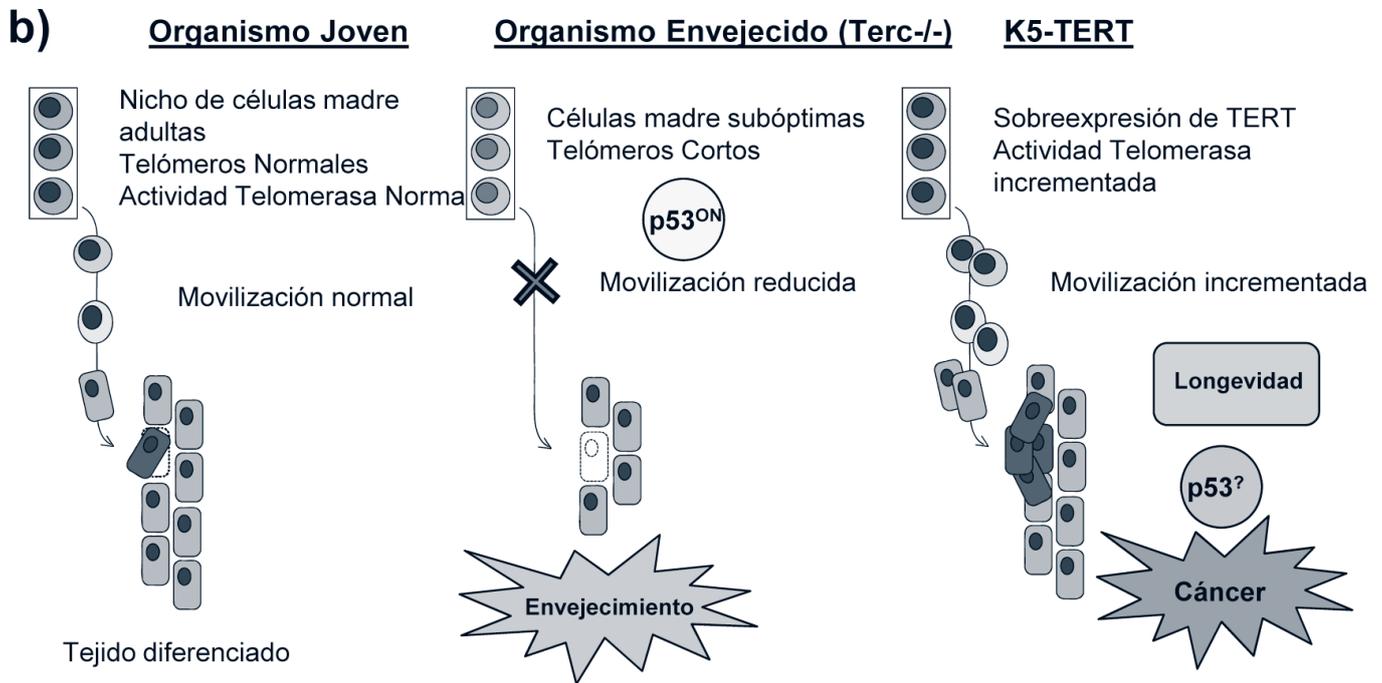
ción de los ARNs teloméricos (TERRAs) y el alargamiento de los telómeros hasta una longitud equivalente a la de las mESC⁴⁹⁻⁵².

Algunos de los escollos que dificultaban la generación de iPSC (un proceso extremadamente ineficiente por naturaleza) empiezan a esclarecerse, y entre ellos, de nuevo tenemos la longitud telomérica como una barrera para la reprogramación de células sub-óptimas dependiente de la activación de p53 y el establecimiento de una cromatina telomérica en conformación “abierta” propia de mESC. Estos descubrimientos son de gran importancia, dado que abren las puertas a la generación de tejidos a partir de iPSC ge-

neradas con células de pacientes con telómeros extremadamente cortos, por ejemplo, para así poder tratar de forma personalizada a pacientes afectados de *telopatías*.

El trabajo en los campos de cáncer, envejecimiento y medicina regenerativa ha avanzado en los últimos años a ritmos vertiginosos, y gran parte del conocimiento que poseemos en la actualidad en estos campos se debe a la generación y caracterización de modelos animales de estudios que han permitido entender los mecanismos moleculares que los gobiernan. La investigación en telómeros no ha sido una excepción, y el desarrollo de terapias orientadas a prevenir el acortamiento telomérico, para retrasar la aparición

Figura 3b. Disfunción telomérica como inductor de cáncer y envejecimiento



B) Modelo general para explicar los procesos de cáncer y envejecimiento en función de la funcionalidad de los telómeros y la telomerasa en las células madre. A pesar de la expresión de telomerasa en compartimentos de las células madre adultas en organismos jóvenes (izquierda), los telómeros se acortan con el tiempo y en los organismos longevos las células madre con telómeros extremadamente cortos (como sucede también en el caso de los ratones *Terc-/-*) pierden la capacidad de mobilizarse a sus tejidos diana, perdiendo por tanto su capacidad regenerativa. En presencia de una actividad telomerasa incrementada (como en el caso de los ratones K5-TERT) hay una movilización constante de células madre hacia sus tejidos destino. En condiciones normales, esta situación se traduce en una capacidad homeostática incrementada y en un aumento de la longevidad del organismo, pero en un contexto de supresión mutado (como *p53* no funcional) las células madre subóptimas son capaces de propagarse, favoreciendo procesos de tumorigénesis.

de enfermedades degenerativas, o bien para contrarrestar la actividad telomerasa, y así evitar la progresión tumoral, o tratar de mejorar las herramientas disponibles en medicina regenerativa constituirán el eje central de la investigación de los próximos años. ■

AGRADECIMIENTOS

MF posee una beca FPU del Ministerio de Educación (AP2008-00543) y el laboratorio de Maria A. Blasco tiene soporte económico del Ministerio de Ciencia e Innovación (SAF2008-05384 y CDS2007-00017), de la Unión Europea (Proyectos FP7 2007-A-201630 y 2007-A-200950 y ERC Advanced Grant GA#232854), Fundación Lily, Fundación Körber y Fundación Botín.

REFERENCIAS

1. Blackburn, E.H. Structure and function of telomeres. *Nature* **350**, 569-573 (1991).
2. Palm, W. & de Lange, T. How shelterin protects mammalian telomeres. *Annu Rev Genet* **42**, 301-334 (2008).
3. de Lange, T. How telomeres solve the end-protection problem. *Science* **326**, 948-952 (2009).
4. Harley, C.B., Futcher, A.B. & Greider, C.W. Telomeres shorten during ageing of human fibroblasts. *Nature* **345**, 458-460 (1990).
5. Canela, A., Vera, E., Klatt, P. & Blasco, M.A. High-throughput telomere length quantification by FISH and its application to human population studies. *Proc Natl Acad Sci U S A* **104**, 5300-5305 (2007).
6. Harley, C.B. *et al.* Telomerase, cell immortality, and cancer. *Cold Spring Harb Symp Quant Biol* **59**, 307-315 (1994).

7. Greider, C.W. & Blackburn, E.H. Identification of a specific telomere terminal transferase activity in Tetrahymena extracts. *Cell* **43**, 405-413 (1985).
8. Collins, K. & Mitchell, J.R. Telomerase in the human organism. *Oncogene* **21**, 564-579 (2002).
9. Liu, L. *et al.* Telomere lengthening early in development. *Nat Cell Biol* **9**, 1436-1441 (2007).
10. Harrington, L. Does the reservoir for self-renewal stem from the ends? *Oncogene* **23**, 7283-7289 (2004).
11. Vonderheide, R.H., Hahn, W.C., Schultze, J.L. & Nadler, L.M. The telomerase catalytic subunit is a widely expressed tumor-associated antigen recognized by cytotoxic T lymphocytes. *Immunity* **10**, 673-679 (1999).
12. Hahn, W.C. *et al.* Creation of human tumour cells with defined genetic elements. *Nature* **400**, 464-468 (1999).
13. Blasco, M.A. & Hahn, W.C. Evolving views of telomerase and cancer. *Trends Cell Biol* **13**, 289-294 (2003).
14. de Lange, T. Shelterin: the protein complex that shapes and safeguards human telomeres. *Genes Dev* **19**, 2100-2110 (2005).
15. Benetti, R., Schoeftner, S., Munoz, P. & Blasco, M.A. Role of TRF2 in the assembly of telomeric chromatin. *Cell Cycle* **7**, 3461-3468 (2008).
16. Blasco, M.A. Mouse models to study the role of telomeres in cancer, aging and DNA repair. *Eur J Cancer* **38**, 2222-2228 (2002).
17. Muñoz, P. *et al.* TRF1 controls telomere length and mitotic fidelity in epithelial homeostasis. *Mol Cell Biol* **29**, 1608-1625 (2009).
18. Tejera, A.M. *et al.* TPP1 is required for TERT recruitment, telomere elongation during nuclear reprogramming, and normal skin development in mice. *Dev Cell* **18**, 775-789.
19. de Lange, T. T-loops and the origin of telomeres. *Nat Rev Mol Cell Biol* **5**, 323-329 (2004).
20. Autexier, C. & Greider, C.W. Boundary elements of the Tetrahymena telomerase RNA template and alignment domains. *Genes Dev* **9**, 2227-2239 (1995).
21. Autexier, C. & Greider, C.W. Functional reconstitution of wild-type and mutant Tetrahymena telomerase. *Genes Dev* **8**, 563-575 (1994).
22. Bhattacharyya, A. & Blackburn, E.H. Architecture of telomerase RNA. *EMBO J* **13**, 5721-5731 (1994).
23. Lundblad, V. & Blackburn, E.H. An alternative pathway for yeast telomere maintenance rescues est1- senescence. *Cell* **73**, 347-360 (1993).
24. Benetti, R., Garcia-Cao, M. & Blasco, M.A. Telomere length regulates the epigenetic status of mammalian telomeres and subtelomeres. *Nat Genet* **39**, 243-250 (2007).
25. Blasco, M.A. The epigenetic regulation of mammalian telomeres. *Nat Rev Genet* **8**, 299-309 (2007).
26. Schoeftner, S. & Blasco, M.A. Chromatin regulation and non-coding RNAs at mammalian telomeres. *Semin Cell Dev Biol* **21**, 186-193.
27. Schoeftner, S. & Blasco, M.A. Developmentally regulated transcription of mammalian telomeres by DNA-dependent RNA polymerase II. *Nat Cell Biol* **10**, 228-236 (2008).
28. Blasco, M.A. Telomeres and human disease: ageing, cancer and beyond. *Nat Rev Genet* **6**, 611-622 (2005).
29. McClintock, B. A Correlation of Ring-Shaped Chromosomes with Variegation in Zea Mays. *Proc Natl Acad Sci U S A* **18**, 677-681 (1932).
30. Hayflick, L. The Limited in Vitro Lifetime of Human Diploid Cell Strains. *Exp Cell Res* **37**, 614-636 (1965).
31. Hayflick, L. & Moorhead, P.S. The serial cultivation of human diploid cell strains. *Exp Cell Res* **25**, 585-621 (1961).
32. Blasco, M.A. *et al.* Telomere shortening and tumor formation by mouse cells lacking telomerase RNA. *Cell* **91**, 25-34 (1997).
33. Herrera, E., Samper, E. & Blasco, M.A. Telomere shortening in mTR-/- embryos is associated with failure to close the neural tube. *EMBO J* **18**, 1172-1181 (1999).
34. Armanios, M. *et al.* Short telomeres are sufficient to cause the degenerative defects associated with aging. *Am J Hum Genet* **85**, 823-832 (2009).
35. Armanios, M. *et al.* Haploinsufficiency of telomerase reverse transcriptase leads to anticipation in autosomal dominant dyskeratosis congenita. *Proc Natl Acad Sci U S A* **102**, 15960-15964 (2005).
36. Chen, J.L. & Greider, C.W. Telomerase RNA structure and function: implications for dyskeratosis congenita. *Trends Biochem Sci* **29**, 183-192 (2004).
37. Gonzalez-Suarez, E., Geserick, C., Flores, J.M. & Blasco, M.A. Antagonistic effects of telomerase on cancer and aging in K5-mTert transgenic mice. *Oncogene* **24**, 2256-2270 (2005).
38. Tomas-Loba, A. *et al.* Telomerase reverse transcriptase delays aging in cancer-resistant mice. *Cell* **135**, 609-622 (2008).
39. Martinez, P. *et al.* Increased telomere fragility and fusions resulting from TRF1 deficiency lead to degenerative pathologies and increased cancer in mice. *Genes Dev* **23**, 2060-2075 (2009).
40. Martinez, P. & Blasco, M.A. Role of shelterin in cancer and aging. *Aging Cell* **9**, 653-666.
41. Cayuela, M.L., Flores, J.M. & Blasco, M.A. The telomerase RNA component Terc is required for the tumour-promoting effects of Tert overexpression. *EMBO Rep* **6**, 268-274 (2005).
42. Gonzalez-Suarez, E., Samper, E., Flores, J.M. & Blasco, M.A. Telomerase-deficient mice with short telomeres are resistant to skin tumorigenesis. *Nat Genet* **26**, 114-117 (2000).
43. Varela, E., Schneider, R.P., Ortega, S. & Blasco, M.A. Different telomere-length dynamics at the inner cell mass versus established embryonic stem (ES) cells. *Proc Natl Acad Sci U S A* **108**, 15207-15212.
44. Flores, I. *et al.* The longest telomeres: a general signature of adult stem cell compartments. *Genes Dev* **22**, 654-667 (2008).
45. Flores, I. & Blasco, M.A. A p53-dependent response limits epidermal stem cell functionality and organismal size in mice with short telomeres. *PLoS One* **4**, e4934 (2009).
46. Flores, I., Cayuela, M.L. & Blasco, M.A. Effects of telomerase and telomere length on epidermal stem cell behavior. *Science* **309**, 1253-1256 (2005).
47. Takahashi, K. & Yamanaka, S. Induction of pluripotent stem cells from mouse embryonic and adult fibroblast cultures by defined factors. *Cell* **126**, 663-676 (2006).
48. Takahashi, K. *et al.* Induction of pluripotent stem cells from adult human fibroblasts by defined factors. *Cell* **131**, 861-872 (2007).
49. Marion, R.M. *et al.* Telomeres acquire embryonic stem cell characteristics in induced pluripotent stem cells. *Cell Stem Cell* **4**, 141-154 (2009).
50. Marion, R.M. *et al.* A p53-mediated DNA damage response limits reprogramming to ensure iPS cell genomic integrity. *Nature* **460**, 1149-1153 (2009).
51. Marion, R.M. & Blasco, M.A. Telomeres and telomerase in adult stem cells and pluripotent embryonic stem cells. *Adv Exp Med Biol* **695**, 118-131.
52. Marion, R.M. & Blasco, M.A. Telomere rejuvenation during nuclear reprogramming. *Curr Opin Genet Dev* **20**, 190-196.

Más de 50 años de
experiencia internacional

Mas de 1.000 plantas
diseñadas y construidas



TECNICAS REUNIDAS

Referencias en
más de 50 países

Más de 6.000
profesionales

Investigamos, Diseñamos y Exportamos
tecnología española y bienes de equipo españoles

Petróleo y gas



Refino y petroquímica



Energía



Infraestructuras e industrias



www.tecnicasreunidas.es

Oficina central:

Arapiles 13 28015 Madrid (España)

Tel. +34 91 592 03 00 Fax +34 91 592 03 97 tr@tecnicasreunidas.es