CSN
ALFA
Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Consejo de Seguridad Nuclear
Número 66
Junio 2026



Chernóbil, 40 años después

Vida y adaptación biológica en la zona de exclusión

La franja de totalidad y el recorrido de la sombra lunar sobre España, en el eclipse de agosto

Radiación espacial: la variable invisible de la exploración más allá de la órbita baja terrestre

Entrevista a Ángel Luis Fernández Recuero, editor y consejero delegado de *Jot Down* y *Menéame*

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR



¡Conecta con nosotros!

https://twitter.com/CSN_es

https://www.youtube.com/c/ConsejoSeguridadNuclear

https://www.linkedin.com/company/consejo-de-seguridad-nuclear/

http://www.csn.es

TRANSPARENCIA › COMUNICACIÓN › DIVULGACIÓN

En este número de *Alfa* coinciden la biología de ambientes extremos, la mecánica celeste y la protección radiológica fuera de la Tierra. La portada está dedicada a Chernóbil, cuarenta años después del accidente. El reportaje recorre las evidencias acumuladas sobre mamíferos, anfibios, nematodos y microorganismos en la zona de exclusión, con atención a los trabajos de campo sobre melanismo en ranas y a los estudios genómicos recientes. La imagen que emerge no es la de un territorio devastado ni la de una recuperación completa, sino la de un escenario en el que radiación residual y ausencia humana operan como fuerzas simultáneas sobre organismos que persisten, varían y, en algunos casos, muestran indicios de respuestas adaptativas.

El eclipse solar total del próximo 12 de agosto, el primero visible desde la península ibérica en más de un siglo, ocupa el primero de los reportajes. El artículo recorre la geometría del fenómeno, la ciencia que solo es accesible durante la totalidad —desde el descubrimiento del helio hasta la verificación de la relatividad general— y la fisiología del daño retiniano, con las voces de investigadores del ámbito de la astrofísica, la oftalmología y la divulgación científica. La observación segura del eclipse y la comprensión de lo que ocurre en esos minutos vertebran un texto que combina mecánica orbital, física solar y salud visual.

Del cielo cercano al espacio profundo. El reportaje sobre radiación espacial examina qué ocurre cuando la Tierra deja de actuar como escudo. Fuera de la órbita baja, la radiación condiciona el diseño de vehículos, la electrónica de a bordo, la protección de la tripulación y la propia lógica operativa de las misiones. Especialistas de la ESA y del INTA desgranan la diferencia entre eventos solares, rayos cósmicos galácticos y cinturones de partículas, y explican por qué el blindaje no es una pared pasiva sino una relación entre materia, geometría y campo de radiación.

La entrevista a Ángel Luis Fernández Recuero, editor de *Jot Down* y consejero delegado de *Menéame*, aporta una reflexión sobre el lugar de la ciencia en la cultura, la responsabilidad editorial frente a la simplificación y el papel de las comunidades digitales en la filtración de la información científica. Su planteamiento resume una idea que recorre buena parte de este número: la complejidad no se elimina, se ordena.

El artículo técnico presenta el proyecto MARRTA, un sistema de análisis proactivo de riesgos en radioterapia con técnicas avanzadas desarrollado por las principales sociedades científicas del sector y el Consejo de Seguridad Nuclear. La metodología, el modelo de errores y el *software* de libre acceso que lo integran constituyen una herramienta diseñada para que cualquier servicio de radioterapia pueda evaluar y gestionar sus propios riesgos de forma sistemática y documentada.

La sección *Ciencia y gastronomía* explora el tránsito de la cocina del ámbito artesanal al territorio de la investigación. Desde la conferencia fundacional de Nicholas Kurti en 1969 hasta los laboratorios del Basque Culinary Center, el texto recorre la gastronomía molecular, la neurogastronomía y la irradiación de alimentos como ejemplo de tecnología nuclear aplicada a la seguridad alimentaria.

En *Ciencia con Nombre Propio*, Barbara McClintock y su descubrimiento de los elementos genéticos móviles ilustran cómo una idea recibida con escepticismo durante décadas terminó por transformar la comprensión del genoma. Su legado conecta con la biología molecular contemporánea y, en determinados contextos, con la radiobiología.

Completan el número la *Radiografía* sobre la doble verificación de las licencias nucleares, el proyecto RADosis sobre evaluación de dosis por radón en lugares de trabajo con condiciones extremas, y el perfil de CEIDEN, la plataforma que coordina la I+D de fisión nuclear en España. ■

ALFA

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Editada por el CSN

Número 66
Junio 2026

MIXTO
Papel procedente de fuentes responsables
FSC® C125445

Comité Editorial
Juan Carlos Lentijo Lentijo
Pilar Lucio Carrasco
Francisco Castejón Magaña
Silvia Calzón Fernández
Teresa Vázquez Mateos
Isabel Villanueva Delgado
Ignacio Martín Granados
J. Pedro Marfil Medina
Manuel Luis Lozano Leyva

Comité de Redacción
J. Pedro Marfil Medina
Natalia Muñoz Martínez
Vanessa Lorenzo López
Adriana Scialdone García
Arturo Fernández García
Verónica Crespo Val
Manuel Luis Lozano Leyva
Ana I. Martínez Fernández

Edición y distribución
Consejo de Seguridad Nuclear
C/ Pedro Justo Dorado
Dellmans, 11 · 28040 Madrid
Tel. 91 346 01 00
peticiones@csn.es
www.csn.es

Coordinación editorial
Editorial MIC · 987272727
www.editorialmic.com

Fotografías
CSN, Editorial MIC, BSC, CEFCA, CNA, Envato, Freepik, iStock

Producción e impresión
Editorial MIC
Pol. Ind. Trobajo del Camino
24010 León

D.L.: M-24946-2012
ISSN-1888-8925

© Consejo de Seguridad Nuclear

Las opiniones recogidas en esta publicación son responsabilidad exclusiva de sus autores, sin que la revista *Alfa* las comparta necesariamente.



EN PORTADA

6 **Chernóbil, 40 años después**

Vida y adaptación biológica en la zona de exclusión: Chernóbil continúa siendo un laboratorio natural irrepetible para estudiar los efectos de la radiación crónica, los mecanismos de la evolución y la resiliencia de la vida



REPORTAJES

14 **Hacia la totalidad**

Mecánica celeste, corona solar y observación segura ante el eclipse de agosto. El 12 de agosto de 2026, el primer eclipse solar total visible desde la península ibérica en más de un siglo cruzará una franja de entre 150 y 300 kilómetros de anchura



22 **La variable invisible**

Fuera de la órbita baja, la radiación espacial deja de ser un dato de contexto y se convierte en una variable de misión: médica, material, electrónica y operativa

ENTREVISTA

32 **Ángel Luis Fernández Recuero**

Editor y consejero delegado de *Jot Down*, *Mercurio* y *Menéame*



ARTÍCULOS TÉCNICOS

36 **Proyecto MARRTA**

Análisis de riesgos en radioterapia con técnicas avanzadas

CIENCIA Y GASTRONOMÍA

44 **La cocina entra en el laboratorio**

La gastronomía se ha consolidado como un campo de investigación en el que confluyen la química de los alimentos, la percepción sensorial y los grandes retos de la innovación alimentaria

RADIOGRAFÍA

50 **Licencias de personal de operación en centrales nucleares**

CSN I+D

52 **Aplicación de la ICRP 137 a la evaluación de dosis por radón en lugares de trabajo con condiciones extremas**

ENTIDADES

54 **CEIDEN**

Coordinación estratégica para la I+D de fisión nuclear en España

CIENCIA CON NOMBRE PROPIO

60 **Barbara McClintock y el genoma en movimiento**

Demostró que determinadas secuencias de genes podían desplazarse, alterar la expresión génica y contribuir a la reorganización de la información hereditaria

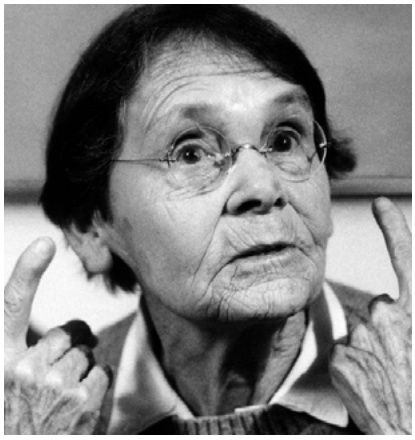
65 **Reacción en cadena**

68 **Panorama**

70 **Últimas publicaciones**











Chernóbil, 40 años después

Vida y adaptación biológica en la zona de exclusión

Cuarenta años después, Chernóbil continúa siendo un laboratorio natural irrepetible para estudiar los efectos de la radiación crónica, los mecanismos de la evolución y la resiliencia de la vida. Mamíferos, anfibios, microorganismos y estudios genómicos recientes componen hoy un escenario mucho más complejo de lo previsto, en el que la retirada humana opera como una fuerza ecológica tan decisiva como la propia contaminación residual.

Texto: **Elena Falagán**

La zona de exclusión de Chernóbil se ha convertido en uno de los grandes observatorios naturales del planeta. Allí donde la presencia humana quedó reducida a mínimos, viejas carreteras, aldeas vacías, humedales, bosques jóvenes, ruinas urbanas y antiguos cultivos han pasado a formar parte de un paisaje en el que los procesos ecológicos y evolutivos se desarrollan a lo largo de generaciones. Es un territorio aún alterado, radiológicamente desigual y sometido a vigilancia.

La singularidad científica de Chernóbil no reside en regresar al relato del incidente –aunque el 26 de abril de 1986 permanece como el punto de partida inevitable– sino en analizar la evolución posterior de un territorio en el que organismos de vida corta han completado decenas de generaciones y especies longevas han persistido bajo dos condicionantes simultáneos. Por un lado, la exposición residual a radionucleidos distribuidos de forma irregular. Por otro, la desaparición casi completa de la presión humana cotidiana. De esa interacción procede una parte sustancial de las preguntas que hoy sostiene la radioecología de Chernóbil. Qué parte de lo observado se asocia a la radiación, qué parte a la ausencia humana y qué parte a la capacidad de los organismos para amortiguar, tolerar o responder a un ambiente difícil. La respuesta exige distinguir escalas, especies y vías de exposición. Un lobo no cuenta la misma historia que una rana y un nematodo no deja la misma huella que un perro asilvestrado. Esa diversidad



Panorámica de Prípiat, con edificios abandonados entre la vegetación de la zona de exclusión de Chernóbil.



Muestreando comunidades bacterianas. Chernóbil, mayo 2019.

no debilita la conclusión. La hace científica.

Los trabajos discutidos en marzo de 2019 en Portsmouth (Inglaterra), en el marco del proyecto TREE (Transfer-Exposure-Effects) y de la European Radioecology ALLIANCE, ayudaron a ordenar una controversia de largo recorrido. Sus resultados indican que, en muchos organismos e indicadores evaluados, los efectos adversos de la radiación no pueden describirse como generalizados ni uniformes. Reconocen daños posibles y respuestas diferentes según organismos, dosis e indicadores. Para determinados taxones, bajo determinadas tasas de dosis y con unos parámetros concretos de medida, los resultados disponibles no encajan con una lectura lineal y uniforme del tipo «más contaminación equivale siempre a menos vida». Esa diferencia, aparentemente pequeña, separa una afirmación llamativa de una afirmación sólida.

El paisaje que dibuja esa literatura combina señales de recuperación con límites metodológicos claros; positivas, porque documentan persistencia, abundancia en algunas poblaciones, recolonización y posibles respuestas adaptativas, y no complacientes, porque cada estudio debe interpretarse a la luz de la dosimetría, por el método de muestreo y por la biología concreta de cada organismo. La zona de exclusión no se deja resumir en una imagen de lobos caminando entre edificios vacíos ni en una advertencia general sobre el daño.

La primera precisión conceptual es dosimétrica. En radioecología, la actividad de un radionucleido en suelo, agua, sedimento, hojarasca o tejido biológico no equivale por sí sola a efecto. Para evaluar fauna y flora hay que estimar la irradiación externa procedente del medio y la irradiación interna derivada de la incorporación de radionucleidos por ingestión, inhalación o absorción. La magnitud que interesa suele ser la dosis absorbida o la tasa de dosis absorbida, expresada en gray o en microgray por hora. El sievert, tan familiar en protección radiológica de personas, incorpora



Portsmouth y la cautela necesaria

El encuentro de Portsmouth (2019) ofreció una lectura positiva, pero no absoluta. Aportó resultados que, en muchos casos, no muestran efectos adversos generalizados en los organismos, dosis e indicadores analizados. La afirmación correcta no es «la radiación no produce efectos», sino que las respuestas observadas dependen de la especie, de la tasa de dosis absorbida, de la vía de exposición, del parámetro medido y de la escala temporal considerada.



Señal de radiactividad en la zona de exclusión de Chernóbil, Ucrania.



factores de ponderación construidos para el ser humano y no puede trasladarse mecánicamente a una rana, un pino o un escarabajo. Sin esa distinción, cualquier conclusión pierde precisión.

La presencia de grandes mamíferos es la puerta de entrada más visible al cambio de mirada. Los censos a largo plazo publicados por Deryabina *et al.* (2015) documentaron poblaciones abundantes de lobos, alces, corzos, ciervos y jabalíes en zonas contaminadas de Ucrania y Bielorrusia. Sus resultados demostraron por primera vez que, al margen de los posibles efectos de la radiación sobre animales individuales, la zona de exclusión de Chernóbil sostenía una comunidad abundante de mamíferos tras casi tres décadas de exposición crónica a la radiación.

Los trabajos con cámaras trampa añadieron una capa de observación más fina. Webster *et al.* (2016) estudiaron la distribución de varias especies y encontraron que el hábitat, el alimento y el refugio

> *Incluso en un área de fuerte contaminación, la señal ecológica no se reduce a una relación simple entre dosis y presencia*



El Bosque Rojo de Chernóbil, teñido por la radiación.



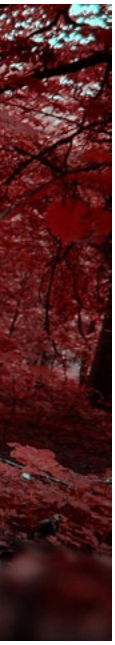
Alce euroasiático en la zona de exclusión de Chernóbil.



Hyla orientalis y la diferencia entre persistir y adaptarse

Los estudios de Germán Orizaola, profesor de Zoología de la Universidad de Oviedo, y Pablo Burraco, investigador de la Estación Biológica de Doñana del CSIC, no presentan el melanismo como causalidad demostrada, sino como una hipótesis apoyada por observación de campo. Persistir no equivale necesariamente a adaptarse. La adaptación evolutiva exige variación heredable, ventaja selectiva y cambio en la frecuencia de rasgos a lo largo de generaciones. En Chernóbil, la secuencia correcta es más exigente y más interesante: persistencia, tolerancia, plasticidad y posible adaptación.

explicaban mejor la presencia de animales que una evitación simple de las zonas con mayores niveles de radiación ambiental. La imagen del animal que huye de la contaminación como si pudiera leer un mapa radiológico resulta demasiado humana para describir lo que ocurre en el campo.



El Bosque Rojo, uno de los enclaves terrestres más contaminados, ofrece un ejemplo especialmente expresivo. Un estudio con cámaras activadas por movimiento, publicado por Beresford *et al.* (2023), identificó catorce especies de mamíferos y veintitrés de aves, aunque estas últimas no eran el objeto principal del trabajo. El número de especies de mamíferos observadas no varió con la tasa de dosis absorbida estimada, y tampoco se apreció una relación sencilla entre esa tasa y el número de activaciones para las cuatro especies principales del estudio. El valor del dato reside en su incomodidad científica. Incluso en un área de fuerte contaminación, la señal ecológica no se reduce a una relación simple entre dosis y presencia.

La interpretación más sólida sitúa el peso ecológico principal en la retirada de presiones humanas: la retirada de la agricultura intensiva, la caza, el tráfico, la fragmentación del hábitat, la explotación forestal y la presencia humana cotidiana. Para algunas especies, la disminución de esa presión pudo compensar, en términos demográficos, los costes de vivir en un ambiente contaminado. Es una idea potente, pero exige una formulación rigurosa: en ningún caso sustenta que un accidente nuclear sea una herramienta de conservación; más bien, que la presión ordinaria de las actividades humanas puede ser, para muchas poblaciones, una perturbación de enorme magnitud.

Jim Smith (2026), en un informe publicado por la Universidad de Portsmouth, advierte que la existencia de poblaciones animales en Chernóbil no significa que sus características actuales puedan atribuirse de forma simple a la radiación. En muchos casos, la ausencia humana, la estructura del hábitat, la dieta, el aislamiento y la historia de fundación ofrecen explicaciones tan necesarias como el gradiente radiológico.

La controversia, no obstante, continúa siendo objeto de discusión científica. Beaugelin-Seiller *et al.* reanalizaron en 2020 datos de mamíferos con reconstrucción de dosis y apoyaron la existencia de menor abundancia asociada a mayores dosis absorbidas. Chernóbil no ofrece una respuesta única de la fauna a la radiación, sino respuestas que cambian con la especie, la movilidad, el tamaño corporal, la dieta, el uso del espacio, la historia vital y la herramienta estadística utilizada. El rigor exige leer el dato más llamativo junto a las evidencias que delimitan su alcance.

En esa zona de rigor y sorpresa se sitúa el trabajo de Germán Orizaola, profesor de Zoología de la Universidad de Oviedo, y Pablo Burraco, investigador de la Estación Biológica de Doñana del CSIC. Desde 2016, sus estudios en la zona de exclusión han combinado la ecología de campo, la fisiología de vertebrados, la dosimetría ambiental y el análisis de rasgos



Edificio de contención sobre el reactor 4 de la central nuclear de Chernóbil, Ucrania, mayo 2019.



Macho de rana de San Antonio oriental, junio 2019.

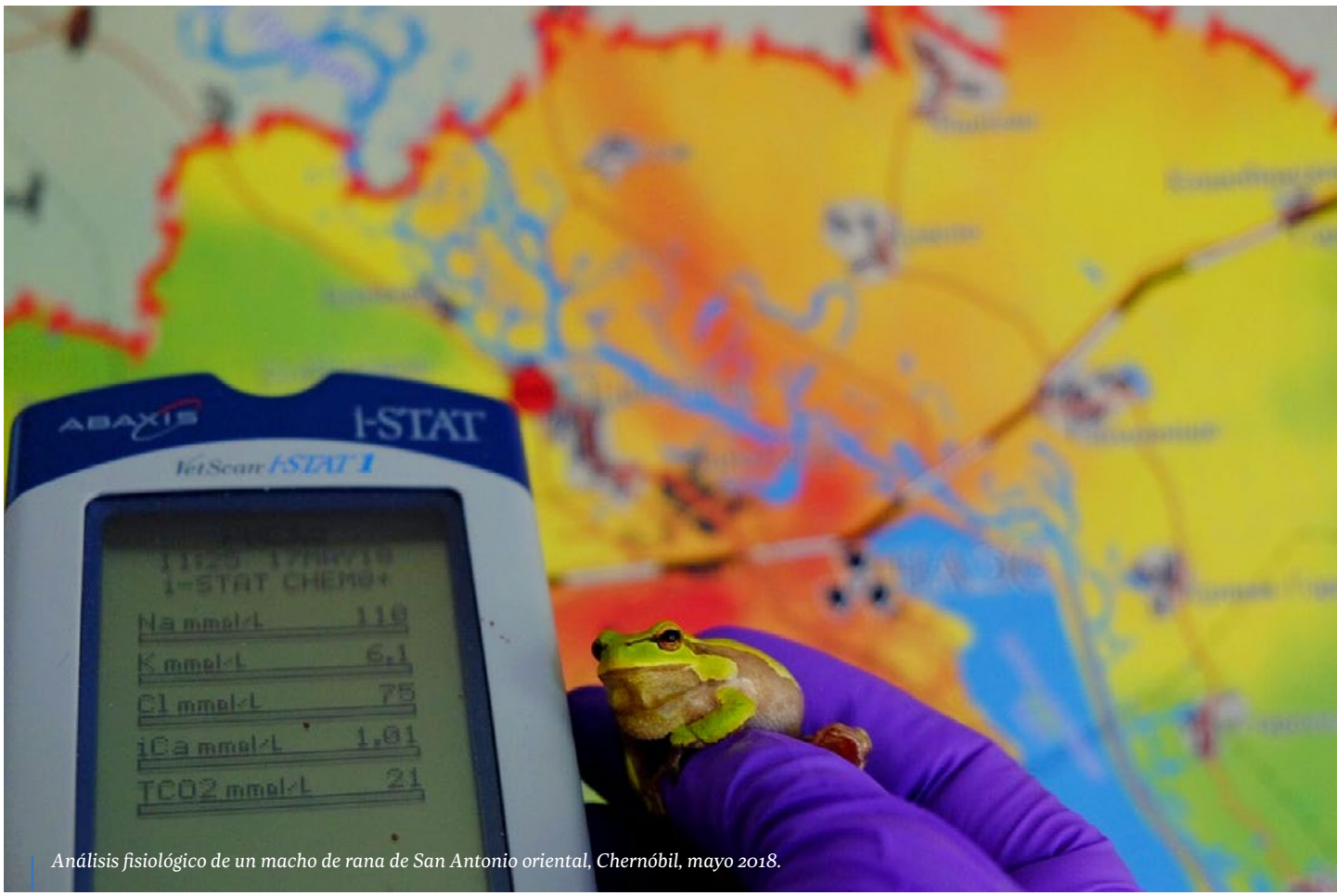
potencialmente adaptativos. Su modelo principal ha sido la rana de San Antonio oriental, *Hyla orientalis*, un anfibio de pequeño tamaño y movilidad limitada que permite relacionar con bastante precisión la exposición local y la respuesta individual. La elección de la especie está fundamentada. En Chernóbil, un animal pequeño y estrechamente ligado a su hábitat permite relacionar con mayor precisión las condiciones locales de exposición y la respuesta biológica que un gran mamífero capaz de desplazarse por territorios extensos.

El hallazgo más llamativo fue la observación de ejemplares con coloración dorsal notablemente más oscura que la habitual en la especie, incluidos individuos casi negros. Burraco y Orizaola plantearon en 2022 que la exposición a altos niveles de radiación ionizante, probablemente en el momento del accidente, pudo haber favorecido una coloración más oscura en las ranas de Chernóbil. La melanina no es solo un pigmento que oscurece la piel. Su estructura de biopolímero con electrones deslocalizados, capaz de capturar radicales libres y disipar la energía absorbida, es uno de los motivos por los que se considera una candidata química razonable frente al daño oxidativo inducido por radiación. En distintos sistemas biológicos se ha relacionado con fotoprotección, actividad antioxidante e interacción con agentes físicos y químicos capaces de inducir estrés celular. El interés de la hipótesis reside en que puede ponerse a prueba.

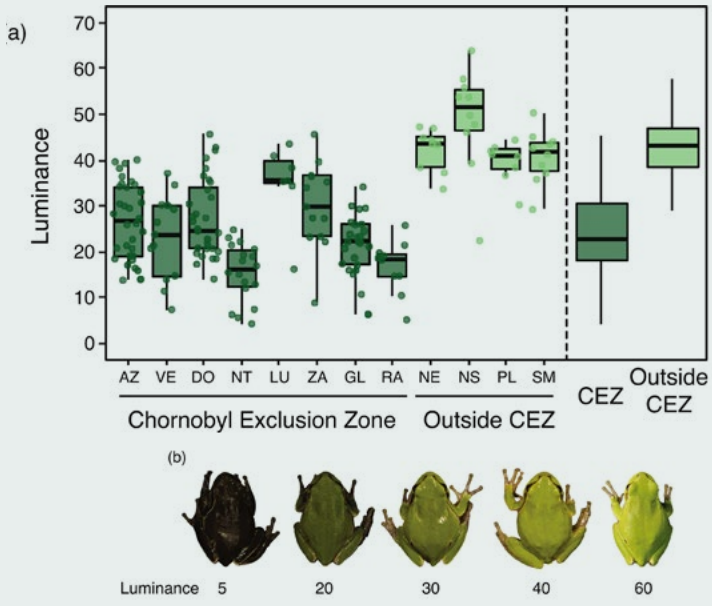
La coloración oscura solo puede interpretarse como adaptación si se demuestra herencia, ventaja selectiva y cambio generacional. Puede depender de la temperatura, la depredación, la historia demográfica, la estructura genética, la selección sexual o la fotoprotección. Por eso, los autores han sido prudentes. La pigmentación oscura no se presenta como una consecuencia directa ya demostrada de la radiación, sino como un rasgo que pudo ser favorecido por selección natural en determinadas poblaciones y durante determinadas fases de exposición. La diferencia importa. En biología evolutiva, la adaptación exige herencia, ventaja y tiempo.

La línea de *Hyla orientalis* se ha enriquecido con genética y fisiología. Car *et al.* estudiaron en 2022 poblaciones de la zona de exclusión y poblaciones europeas de referencia. Describieron ausencia de erosión genética general y una diversidad mitocondrial elevada en las ranas de Chernóbil, con resultados sugestivos de una historia evolutiva inusual y de una posible relación con mayor tasa de mutación mitocondrial. Estos datos no prueban por sí solos una adaptación a la radiación, pero encajan con una historia microevolutiva singular en un territorio sometido a una presión ambiental extraordinaria durante cuatro décadas.





Análisis fisiológico de un macho de rana de San Antonio oriental, Chernóbil, mayo 2018.



Luminancia de la piel dorsal en machos de Hyla orientalis *de distintas poblaciones situadas dentro y fuera de la zona de exclusión de Chernóbil. a) Valores de luminancia dorsal en individuos que habitan a lo largo de un gradiente de radiación dentro de la zona de exclusión de Chernóbil (CEZ) y fuera de ella. b) Ejemplos del rango de luminancia observado en machos de* H. orientalis*, de izquierda a derecha: valores de 5, 20, 30, 40 y 60 (Burraco y Orizaola, 2022).*

Burraco y sus colaboradores no detectaron un deterioro severo atribuible a la radiación actual en biomarcadores sanguíneos de las ranas analizadas. En 2024, otro trabajo publicado en *Biology Letters* informó de efectos mínimos de la radiación ionizante sobre edad, longitud telomérica y niveles de corticosterona en los individuos estudiados. Dicho con precisión, para esa especie, en esas ranas y bajo las tasas de dosis estimadas, no se observó un daño fisiológico generalizado en los indicadores examinados. En ciencia, una ausencia de efecto bien delimitada puede ser tan informativa como la presencia de daño.

La guerra en Ucrania ha impedido mantener campañas regulares de campo, y parte de la pregunta se ha trasladado al laboratorio. La Estación Biológica de Doñana ha descrito experimentos dirigidos por Burraco con anfibios y escarabajos para comprobar, bajo condiciones controladas, si la melanina puede desempe-

Genómica reciente y causalidad prudente

Los perros libres de Chernóbil muestran poblaciones diferenciadas, pero los análisis recientes no apoyan que una tasa aumentada de mutación explique por sí sola esa estructura. En nematodos tampoco se ha observado una huella genómica simple asociada a la radiactividad ambiental. Ambos casos refuerzan la tesis de que la biología de Chernóbil es positiva por su capacidad de persistencia, pero exige interpretaciones mecanicistas y no relatos automáticos.



Descendientes de las mascotas abandonadas durante la evacuación masiva de 1986, los perros asilvestrados de Chernóbil tienen sus propias estructuras sociales pero toleran el contacto humano.

ñar un papel protector frente a la radiación ionizante. La transición es metodológicamente limpia. El campo aporta realismo ecológico, mezcla de factores y vida en contexto. El laboratorio aporta control de dosis, duración de la exposición, fase del desarrollo, temperatura, alimentación y rasgos pigmentarios.

La melanina, además, conecta Chernóbil con una literatura más amplia. Dadachova *et al.* (2007) mostraron que la radiación ionizante modifica propiedades electrónicas de la melanina y que hongos melanizados podían crecer más que células no melanizadas en determinadas condiciones experimentales. Los autores evitan el tópico de que estos organismos obtengan alimento de la radiación y defienden que la melanina puede participar en radioprotección, tolerancia al estrés y, en algunos sistemas, transformación de energía.

La genómica moderna ha abierto otra vía para estudiar Chernóbil sin apoyarse solo en abundancias o fenotipos visibles. Los perros asilvestrados son un caso de gran interés científico, porque proceden de animales domésticos, viven cerca de la central o de la ciudad y han formado poblaciones multigeneracionales en condiciones poco comunes. Spatola *et al.* (2023) analizaron más de trescientos perros libres y describieron poblaciones genéticamente diferenciadas entre el entorno de la central y la ciudad de Chernóbil. En este sentido, Dillon *et al.* (2024) concluyeron que esa diferenciación no parece explicarse por una acumulación general de mutaciones inducidas por radiación.

El valor de los perros de Chernóbil está precisamente en ese equilibrio. Hay supervivencia, estructura poblacional y una oportunidad notable para estudiar mamíferos en un ambiente contaminado durante generaciones. Pero no hay base suficiente para convertir la radiación en explicación única de todo lo que se observa. La distancia genética puede deberse también a aislamiento, fundadores, cuellos de botella, movilidad, interacción con humanos, historia de alimentación y manejo veterinario. El interés del caso aumenta precisamente cuando la explicación se resiste a una causa única.

Los nematodos completan el contrapunto. Tintori *et al.* (2024) recogieron y criopreservaron 298 aislados silvestres en zonas con distintos niveles de radiactividad y secuenciaron genomas de veinte cepas de *Oscheius tipulae*. No observaron una asociación clara entre la radiactividad del lugar de recogida y la adquisición reciente de mutaciones, ni una mayor tolerancia general a mutágenos en los aislados de Chernóbil. En organismos de ciclo vital corto, que parecerían candidatos idóneos para detectar cambios rápidos, el resultado obliga a una precisión saludable. La adaptación puede producirse sin una señal simple de aumento mutacional. La persistencia puede dejar señales fisiológicas, demográficas o ecológicas sin traducirse en una huella genómica evidente. La resiliencia describe capacidad de respuesta, no ausencia de daño.

Plantas y microorganismos amplían el cuadro, aunque obligan a cambiar de escala. Las plantas permanecen ligadas al sustrato y a la disponibilidad edáfica de radionucleidos. En ellas, se pueden estudiar transferencia radicular, estrés oxidativo, reparación del ADN, regulación metabólica y posibles modificaciones epigenéticas. Los microorganismos, por su parte, tienen tiempos generacionales cortos, tamaños poblacionales enormes y gran diversidad funcional. Intervienen en la descomposición, en la movilización de elementos y en la dinámica del suelo. Su respuesta no es solo un efecto de la contaminación, sino también una fuerza capaz de modificar el funcionamiento del ecosistema.



Zona de exclusión, Chernóbil.

Vista así, la zona de exclusión deja de ser un escenario congelado en 1986. Es un territorio con sucesión vegetal, incendios, cambios hidrológicos, invasiones biológicas, depredadores, parásitos, variación climática y perturbaciones recientes derivadas de la guerra. La radiación no actúa en una cámara vacía. Actúa sobre organismos que comen, huyen, se reproducen, compiten, se desplazan o se fijan al suelo. Por eso, la pregunta no puede formularse como si hubiera una sola naturaleza respondiendo a una sola radiación. Hay organismos, dosis, tejidos, edades, hábitos y generaciones. Y también métodos de muestreo que, aunque sean discretos, condicionan en buena medida lo observado.

Para la protección radiológica ambiental, Chernóbil ha tenido un efecto intelectual de largo alcance. Durante décadas, la protección se centró de forma prioritaria en las personas, bajo el supuesto de que proteger al ser humano protegía en gran medida el ambiente. La radioecología contemporánea ha añadido la necesidad de evaluar explícitamente la fauna, la flora y los ecosistemas, con organismos de referencia, relaciones dosis-efecto y criterios propios. La lección no reside solo en inventariar efectos, sino en estimar mejor la exposición real de la biota, elegir indicadores sensibles y distinguir entre daño individual, respuesta poblacional y reorganización del ecosistema.

Decir que la vida ha vuelto a Chernóbil necesita precisión: algunas poblaciones persisten, recolonizan o aumentan bajo condiciones muy concretas. Chernóbil muestra organismos capaces de reparar daño molecular, modular respuestas antioxidantes, reorganizar su fisiología, moverse por el espacio de manera diferencial y, si existe variación heredable con consecuencias sobre supervivencia o reproducción, evolucionar. Pero no todos los taxones responden igual. No todos los indicadores captan lo mismo ni todos los resultados positivos pueden atribuirse a la adaptación. La vida persiste mediante mecanismos concretos, algunos visibles sobre el terreno y otros detectables solo mediante análisis fisiológicos, dosimétricos o genómicos.

Cuarenta años después del desastre, Chernóbil muestra un territorio en el que coinciden durante décadas dos perturbaciones de signo distinto: una radiológica, residual, heterogénea y mensurable; otra humana, retirada de golpe de una superficie inmensa. Entre ambas, los organismos persisten, varían, seleccionan, recolonizan, compensan y, quizá en algunos casos, se adaptan. ■

Bibliografía

Beresford, N. A. *et al.* (2020). Towards solving a scientific controversy - The effects of ionising radiation on the environment. *Journal of Environmental Radioactivity*, 211, 106033. DOI:10.1016/j.jenvrad.2019.106033

Beresford, N. A., Gashchak, S., Wood, M. D. y Barnett, C. L. (2023). Mammals in the Chornobyl Exclusion Zone's Red Forest: a motion-activated camera trap study. *Earth System Science Data*, 15, 911-920. DOI:10.5194/essd-15-911-2023

Beaugelin-Seiller, K. *et al.* (2020). Dose reconstruction supports the interpretation of decreased abundance of mammals in the Chernobyl Exclusion Zone. *Scientific Reports*, 10, 14083. DOI:10.1038/s41598-020-70699-3

Burraco, P. y Orizaola, G. (2022). Ionizing radiation and melanism in Chornobyl tree frogs. *Evolutionary Applications*, 15, 1469-1479. DOI:10.1111/eva.13476

Burraco, P. *et al.* (2024). Ionizing radiation has negligible effects on the age, telomere length and corticosterone levels of Chornobyl tree frogs. *Biology Letters*, 20, 20240287. DOI:10.1098/rsbl.2024.0287

Car, C. *et al.* (2022). Unusual evolution of tree frog populations in the Chernobyl exclusion zone. *Evolutionary Applications*, 15, 203-219. DOI:10.1111/eva.13282

Deryabina, T. G. *et al.* (2015). Long-term census data reveal abundant wildlife populations at Chernobyl. *Current Biology*, 25, R824-R826. DOI:10.1016/j.cub.2015.08.017

Dillon, M. N. *et al.* (2024). Is increased mutation driving genetic diversity in dogs within the Chornobyl exclusion zone? *PLOS ONE*, 19, e0315244. DOI:10.1371/journal.pone.0315244

Spatola, B. N. *et al.* (2023). The dogs of Chernobyl: Demographic insights into populations inhabiting the nuclear exclusion zone. *Science Advances*, 9, eade2537. DOI:10.1126/sciadv.ade2537

Tintori, S. C. *et al.* (2024). Environmental radiation exposure at Chornobyl has not systematically affected the genomes or chemical mutagen tolerance phenotypes of local worms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121, e2314793121. DOI:10.1073/pnas.2314793121 ■

Hacia la totalidad

Mecánica celeste, corona solar y observación segura ante el eclipse de agosto

El 12 de agosto de 2026, el primer eclipse solar total visible desde la península ibérica en más de un siglo cruzará una franja de entre 150 y 300 kilómetros de anchura, desde Galicia hasta las Islas Baleares, antes de internarse en el norte de África. Solo durante la totalidad la Luna oculta por completo el disco solar y deja la corona observable a simple vista, un espectáculo que desde Janssen y Eddington hasta hoy ha hecho de cada eclipse un laboratorio de física fundamental. En cualquier otra fase, una porción del disco sigue activa: una radiación suficiente para lesionar la retina de forma irreversible sin emitir ninguna señal de dolor.

Texto: **Desiré Alija**

¿Por qué es posible que la Luna oculte por completo el disco solar? La respuesta es una de las coincidencias más improbables del sistema solar. El Sol es unas cuatrocientas veces mayor que la Luna, pero también está aproximadamente cuatrocientas veces más lejos, de modo que ambos presentan casi el mismo tamaño angular –en torno a 0,5 grados– vistos desde la superficie terrestre. Eso permite que el disco lunar cubra exactamente el Sol, exponiendo la corona sin ocultarla. La diferencia con los eclipses lunares ilustra bien la geometría del fenómeno: un eclipse de Luna es visible desde toda la mitad de la Tierra orientada hacia él; un eclipse solar total solo se ve desde una franja estrecha, lo que convierte cada totalidad en un evento geográficamente irrepetible.



La retina no tiene nervios que puedan generar esa sensación de dolor. Los síntomas visuales comienzan entre cuatro y seis horas después de la exposición, incluso hasta doce horas después

DRA. MARÍA ISABEL LÓPEZ GÁLVEZ

Eclipse solar total, 2017 / NASA.

Efectos documentados, bulos desmentidos

Antes de cada eclipse, junto a las recomendaciones de protección ocular, resurgen con puntualidad las mismas advertencias sin fundamento: que el fenómeno afecta a los embarazos, que la radiación alcanza consecuencias sistémicas para la salud, que la prudencia aconseja no salir a la calle. Ninguna de estas afirmaciones tiene respaldo en la literatura científica. No se conocen efectos fisiológicos específicos atribuibles al eclipse, más allá del riesgo ocular por observación directa sin protección. Hermoso Muñoz es rotunda al afirmar que «a los seres humanos no les afecta en absoluto. La desinformación produce rechazo».

Los efectos sobre la fauna, en cambio, están sólidamente documentados. Aguilar *et al.* (Science, 2025), en un análisis de más de diez mil observaciones y cien mil vocalizaciones de aves durante el eclipse de 2024, registraron que numerosas especies iniciaron el canto del amanecer durante la totalidad, respondiendo al oscurecimiento como si fuera el inicio de la noche. Trabajos previos en entornos controlados habían descrito patrones semejantes en mamíferos y aves de zoológicos. Las abejas, que utilizan la posición solar como referencia de navegación, interrumpen el vuelo y retornan a la colmena. En los animales, los cambios de luz pueden alterar pautas de actividad; en humanos, el riesgo documentado se concentra en la exposición ocular directa.

El eclipse tiene además un valor argumentativo. Hermoso Muñoz señala que «si la Tierra fuera plana, los eclipses no existirían tal como los observamos». En este sentido, la naturaleza del fenómeno –una sombra cónica proyectada sobre una superficie esférica, calculable con siglos de antelación y con exactitud de segundos– es una demostración directa de la forma y el movimiento de los cuerpos celestes. Lo que no varía con los siglos es la tendencia humana a buscar significados sobrenaturales donde bastan la geometría orbital y la mecánica celeste.



Laura Hermoso Muñoz, investigadora postdoctoral en la Universidad de Oviedo y el Instituto de Ciencias y Tecnologías Espaciales de Asturias (ICTEA), y doctora en Astrofísica por la Universidad de Granada y el Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC), explica por qué tampoco ocurren en cada luna nueva: «El plano orbital de la Luna está inclinado respecto a la eclíptica, por eso no se producen eclipses en cada luna nueva. Eso es lo que hace que este fenómeno sea tan especial». Un mismo lugar de la Tierra recibe una totalidad solar aproximadamente cada 375 años. Y la coincidencia no es permanente: la Luna se aleja de la Tierra a razón de 3,8 cm por año en promedio, según las mediciones actuales de telemetría láser lunar. Dentro de unos seiscientos millones de años, su tamaño aparente habrá disminuido lo bastante como para impedir los eclipses totales perfectos: solo quedarán los anulares, en los que el disco lunar deja visible un anillo de Sol en el borde.

La predictibilidad del fenómeno se asienta sobre uno de los ciclos más antiguos identificados por la astronomía: el Saros, un periodo de 18 años, 11 días y unas 8 horas, tras el cual la geometría Sol-Tierra-Luna se repite con un desplazamiento de unos 120 grados en longitud terrestre. Cada serie Saros produce decenas de eclipses a lo largo de siglos, y son series distintas las que confluyen para que España viva tres eclipses solares consecutivos: el del 12 de agosto; el total del 2 de agosto de 2027, con su franja sobre el estrecho de Gibraltar y la totalidad en el sur de Andalucía, Ceuta y Melilla –con casi cinco minutos de duración en Ceuta, el punto de España con mayor duración de la totalidad–, y el anular del 26 de enero de 2028, visible desde Cataluña. Tres eclipses en tres años sobre territorio español constituyen una concentración inusual en escala histórica; tras esta tríada, España no volverá a contemplar otro eclipse solar total hasta 2053.

La franja de totalidad del 12 de agosto entrará en la península por el noroeste y la recorrerá hasta el Mediterráneo: Galicia, Asturias, Cantabria, Castilla y





Detalle de la proyección del Sol en un sunspotter, *instrumento que permite la observación indirecta y segura del disco solar. En la imagen se aprecia una mancha solar sobre la superficie proyectada. Imagen cedida por Allande Stars.*

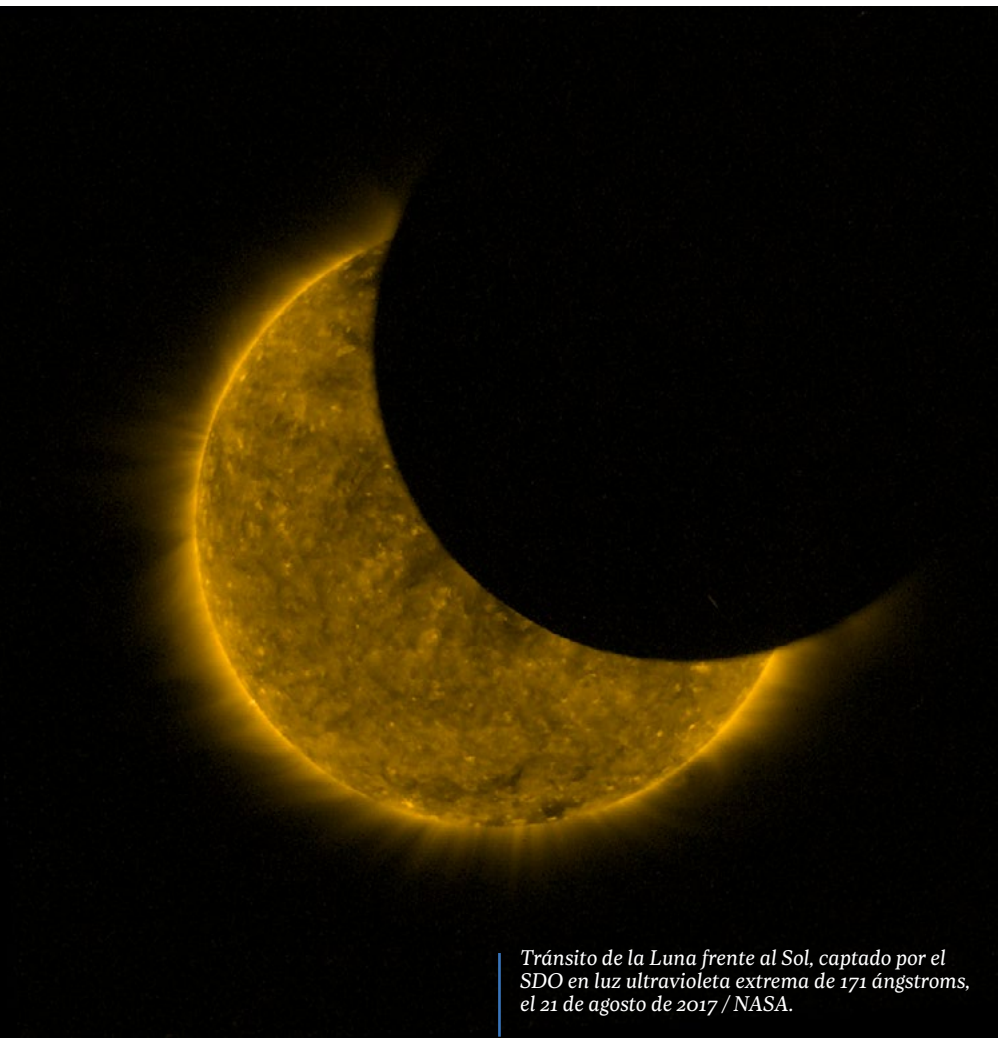
León, País Vasco, Navarra, La Rioja, Aragón y norte de la Comunitat Valenciana, antes de atravesar las Islas Baleares y continuar hacia el norte de África en un recorrido de menos de una hora y media. La anchura de la franja peninsular se sitúa entre 150 y 300 km según los datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN), que dispone de herramientas cartográficas interactivas con los datos precisos para cualquier posición. La duración de la totalidad en la línea central oscilará entre un minuto y medio y poco menos de dos minutos, y se producirá aproximadamente entre las 20:30 y las 21:00 hora peninsular, según la longitud del punto de observación. Conviene tener presente un condicionante geográfico: el eclipse ocurre al atardecer, con el Sol bajo en el horizonte occidental, y en los puntos más orientales de la franja puede ocultarse antes de que se complete el último contacto.

Lo que solo se ve en la totalidad

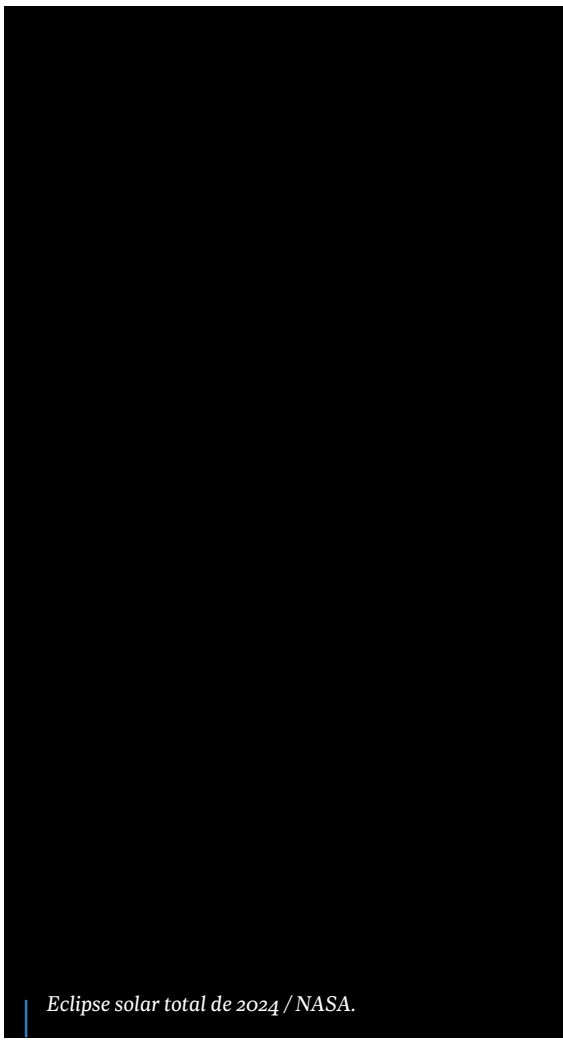
Durante la totalidad, el espectáculo científicamente más singular es la corona solar, visible a simple vista. La corona es la atmósfera exterior del Sol, una envoltura de plasma tenue que se extiende varios radios solares y alcanza temperaturas de entre uno y tres millones de kelvin –mientras que la fotosfera, la superficie visible del Sol, se sitúa en torno a 5778 K–. Esa inversión térmica, identificada por Grotrian en 1939 y confirmada por Edlén en 1943, es uno de los problemas abiertos más conocidos de la física solar. Las hipótesis vigentes apuntan al calentamiento por ondas magnetohidrodinámicas y a la reconexión magnética a pequeña escala, pero ninguna explica el fenómeno por completo.

La contribución de los eclipses a la física moderna tiene varios episodios fundacionales. Durante la totalidad del 18 de agosto de 1868, observada en India y Tailandia, Janssen y después Lockyer registraron una línea espectral desconocida en la cromosfera solar; el elemento responsable se denominó helio –de Helios, Sol– y solo se identificó en muestras terrestres en 1895. Cincuenta y un años después, en la totalidad del 29 de mayo de 1919, las expediciones de Eddington a la isla de Príncipe y de Crommelin a Sobral midieron por primera vez la desviación de la luz estelar al pasar junto al Sol. Los valores obtenidos –1,61 ± 0,30 segundos de arco en Príncipe y 1,98 ± 0,12





Tránsito de la Luna frente al Sol, captado por el SDO en luz ultravioleta extrema de 171 ángstroms, el 21 de agosto de 2017 / NASA.

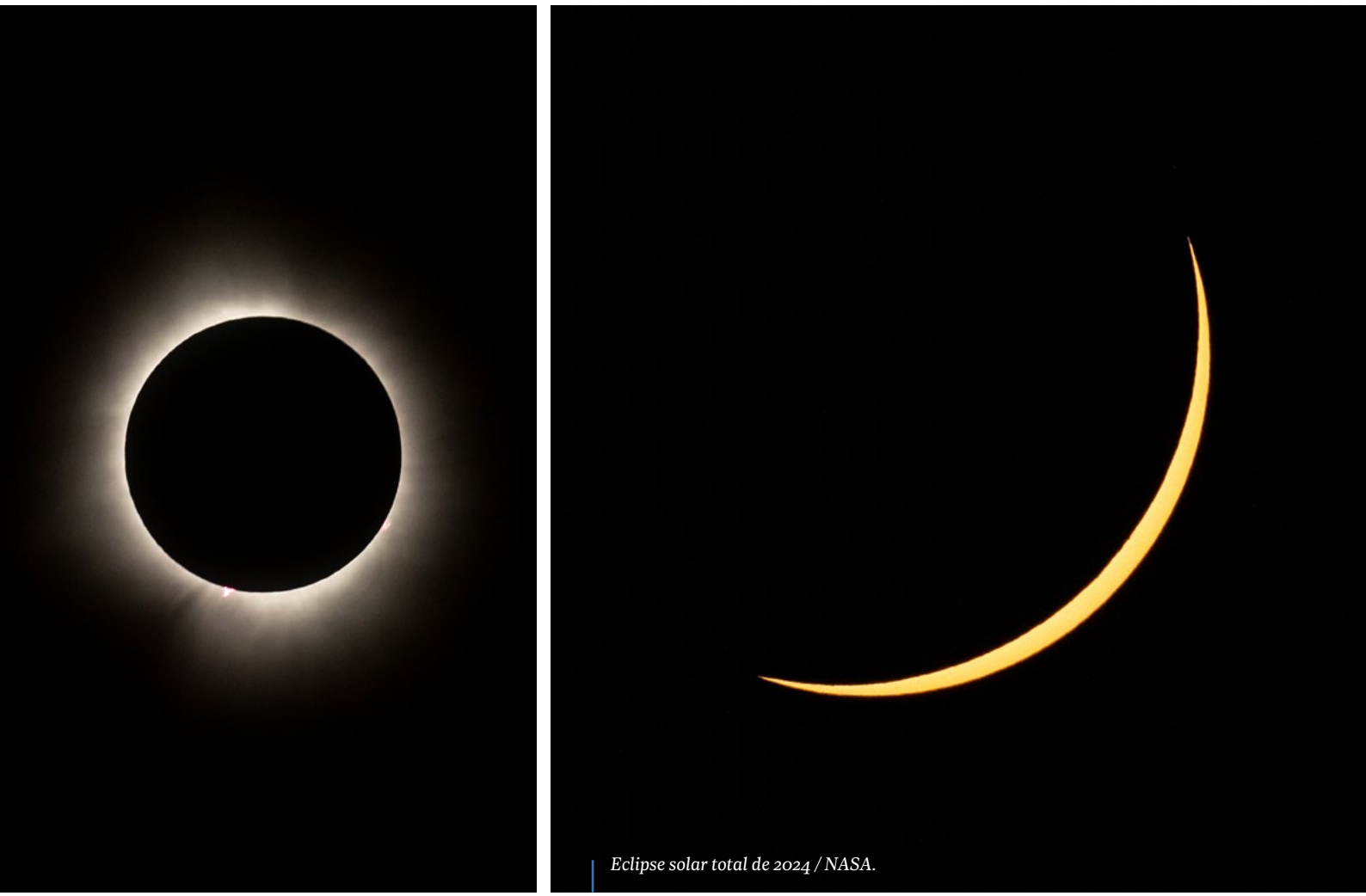


Eclipse solar total de 2024 / NASA.

en Sobral, frente a la predicción relativista de 1,75 segundos de arco–eran consistentes con la relatividad general de Einstein y el doble del calculado por Soldner en 1801 con mecánica newtoniana clásica. Fue una de las primeras verificaciones experimentales de la relatividad general.

La importancia científica de las totalidades no ha cesado con la era espacial; más bien al contrario. Desde diciembre de 2024 está en órbita Proba-3, la primera misión de vuelo en formación de precisión de la Agencia Espacial Europea (ESA): dos satélites separados 150 m mantienen su posición relativa al milímetro mientras el Occulter proyecta un disco de 1,4 m que oscurece el Sol al Coronagraph, que aloja el instrumento ASPIICS (Association of Spacecraft for Polarimetric and Imaging Investigation of the Corona of the Sun). El resultado es un eclipse artificial sostenible durante varias horas por órbita –algo impensable con eclipses naturales, que apenas duran minutos y solo ocurren una o dos veces al año–. Desde julio de 2025, Proba-3 ha generado más de cincuenta eclipses artificiales y acumulado más de 250 horas de vídeo de la corona interna, una región que ningún coronógrafo espacial convencional podía observar con esta resolución. Los primeros resultados científicos, publicados en *The Astrophysical Journal Letters* en marzo de 2026, registran estructuras del viento solar que se mueven en la corona interna entre tres y cuatro veces más rápido de lo que predecían los modelos. La misión no sustituye a las observaciones terrestres durante las totalidades: las complementa, accediendo a una región –los primeros radios solares desde la fotosfera– donde se gestan los fenómenos de meteorología espacial.

Juan Ángel Vaquerizo, astrofísico del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y experto del proyecto CESAR (ESA-INTA-ISDEFE), describe los fenómenos que acompañan a la totalidad terrestre: «Las perlas de Baily son los puntos de luz que atraviesan los cráteres del perfil lunar en los últimos segundos antes de la oscuridad total. Duran apenas uno o dos segundos, y van seguidas del anillo de diamante. Con el cielo oscurecido, Venus y Júpiter serán identificables a simple vista». El descenso brusco de la temperatura y el cambio en la calidad de la luz son igualmente perceptibles: «No se produce el ocaso que uno imagina; de repente cambia la luz a un tono nocturno y,



Eclipse solar total de 2024 / NASA.

como es de corta duración, se siente todo con mayor intensidad». Su recomendación es inequívoca: «No hagáis fotos. Miradlo. Es el único momento en que un ser humano puede ver la corona del Sol con sus propios ojos».

Espectro solar, tejido ocular y daño retiniano

El riesgo del eclipse, conviene precisarlo, no reside en el Sol, que no cambia. Reside en cómo el eclipse modifica la conducta del observador. Vaquerizo describe el mecanismo con exactitud: «Se genera una sensación de seguridad por esa ausencia de luz, y el observador cree que puede dirigir la mirada sin protección. Se confía en una seguridad ficticia. La infrarroja, que no se ve, produce quemaduras. Todas esas radiaciones que el observador cree que no llegan son el peligro real». El mecanismo pupilar agrava el problema: la reducción de la luz ambiental durante las fases parciales provoca la dilatación de la pupila, incrementando la superficie de entrada de radiación. El resultado es que, en fase parcial avanzada, puede recibir una dosis lesiva porque la pupila está más dilatada y los reflejos de protección se atenúan, precisamente porque sus defensas se han calibrado sobre una luminosidad aparente que no refleja la carga radiante real.

La diferencia entre observar la totalidad y una fase parcial, aunque sea del 95 % de ocultación, no es solo de intensidad: hay un cambio cualitativo en la seguridad de la observación. Durante la totalidad, la corona resulta observable a simple vista, dado que la irradiancia del disco fotosférico se ha extinguido por completo. En cualquier otra fase, una porción del limbo solar sigue siendo una fuente activa de radiación intensa sobre un ojo dilatado con los reflejos de protección parcialmente inhibidos. Entre un eclipse total y uno casi total no hay una diferencia de intensidad. Hay un salto de naturaleza.

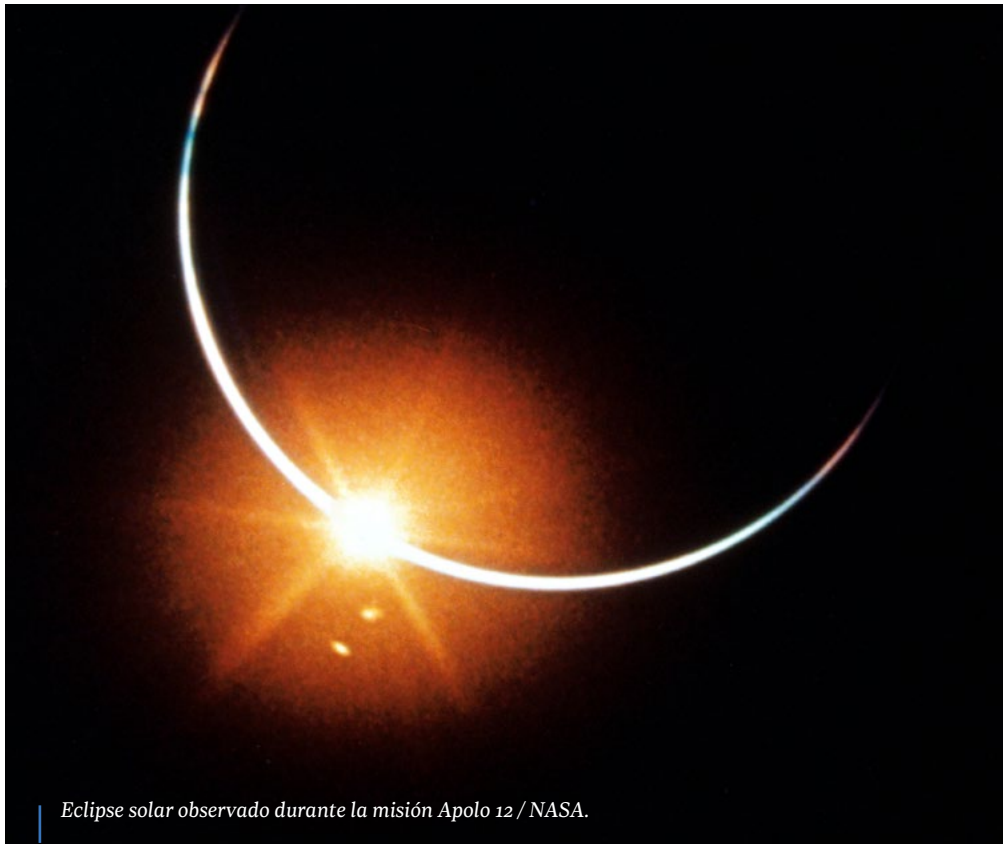
El sistema visual humano dispone de mecanismos de protección que en condiciones ordinarias operan con notable eficacia frente a la radiación solar: el reflejo de cierre palpebral, la constricción pupilar y la aversión al deslumbramiento limitan la exposición antes de que se produzca lesión. Pero la retina, a diferencia de casi cualquier otro tejido del organismo, carece de fibras nerviosas capaces de generar dolor. Durante un eclipse, esas defensas quedan parcialmente neutralizadas. La radiación visible intensa



Protección certificada

La única protección válida para las fases parciales son los filtros que cumplen la norma ISO 12312-2:2015: bloqueo del 99,99 % de la luz visible y del 100 % de ultravioleta e infrarrojo. La norma no establece un plazo de caducidad: filtros certificados, sin rayaduras, perforaciones ni roturas, pueden reutilizarse. La advertencia de tres años impresa en algunos modelos antiguos corresponde a materiales que ya no se emplean. Verificación sencilla: con las gafas puestas no debe verse nada salvo el Sol; cualquier punto de luz visible al inspeccionar el filtro a contraluz es motivo suficiente para desecharlas.

Para telescopios o prismáticos, el filtro debe colocarse siempre sobre el objetivo –el extremo frontal–, nunca sobre el ocular. Para quienes no dispongan de gafas certificadas, la proyección indirecta mediante estenopo es el método seguro: un colador, las manos entrelazadas o el follaje de un árbol proyectan la imagen del Sol sobre cualquier superficie. No ofrecen protección alguna las gafas de sol convencionales, el cristal ahumado, los negativos de rayos X, los CD o DVD, ni los filtros fotográficos de densidad neutra.



Eclipse solar observado durante la misión Apolo 12 / NASA.

y el infrarrojo cercano pueden alcanzar la retina, mientras que la ultravioleta contribuye a otros daños oculares según la longitud de onda. El daño puede producirse y progresar sin dejar rastro subjetivo alguno; los primeros síntomas –escotoma central, visión borrosa, metamorfopsia, alteración de la percepción del color– aparecen entre cuatro y doce horas después de la exposición, cuando las lesiones ya están establecidas y, en los casos más graves, son irreversibles.

El ojo no es una cámara pasiva: concentra activamente la radiación solar sobre la retina, y esa misma capacidad de enfoque se convierte, en condiciones de exposición extrema, en su principal vulnerabilidad. La radiación solar comprende ultravioleta, luz visible e infrarrojo cercano, y cada componente actúa sobre estructuras distintas con mecanismos de daño que no son intercambiables. La doctora María Isabel López Gálvez, especialista en retina y vítreo del Instituto Oftalmológico Fernández-Vega de Oviedo, investigadora del Instituto Universitario de Oftalmobiología Aplicada (IOBA) de la Universidad de Valladolid y secretaria de la Sociedad Española de Retina y Vítreo, precisa la jerarquía del daño: «De los tres componentes, la radiación ultravioleta de entre 290 y 320 nanómetros (nm) es la más dañina para la retina. Produce fundamentalmente un daño fotoquímico». El infrarrojo cercano, que no produce ninguna sensación de deslumbramiento y por tanto no activa ningún reflejo, penetra hasta el epitelio pigmentario y la coroides, donde su energía se convierte silenciosamente en calor.

En el fondo del ojo, entre la retina sensible y la coroides, el epitelio pigmentario de la retina sostiene metabólicamente a los fotorreceptores y es la primera estructura en absorber la radiación que ha superado las barreras anteriores. La lesión se concentra en el territorio más valioso del campo visual: la fóvea, donde residen los conos responsables de la visión de detalle. Por eso la marca característica de la retinopatía solar es el escotoma central: una mancha



La sombra de la Luna sobre la Tierra, vista desde la estación espacial rusa Mir / ESA.

ciega o distorsionada exactamente donde el ojo ve mejor.

La retinopatía solar –también llamada maculopatía solar o foveomacular– abarca desde lesiones leves que remiten en semanas hasta daño permanente sin tratamiento eficaz. Hope-Ross y colaboradores (1993) fueron los primeros en describir las alteraciones celulares en los fotorreceptores; en los casos más graves puede desarrollarse un agujero macular –una perforación en la zona central de la retina– hasta quince días después de la exposición, lo que confirma que el daño continúa progresando días después. Los datos epidemiológicos subrayan que el riesgo persiste pese a las campañas de divulgación: Poremba *et al.* (2024) documentaron 113 y 124 casos de retinopatía solar y fotoqueratitis tras los eclipses de 2017 y 2024 en Estados Unidos, con un tiempo medio de diagnóstico superior a diez días. La campaña de seguridad más intensa no elimina el riesgo: lo reduce.

La magnitud del daño varía según factores individuales –edad joven, fármacos fotosensibilizantes, capacidad para reconocer y evitar el riesgo– y el pronóstico no siempre es favorable. López Gálvez es precisa: «En algunos casos la lesión revierte lentamente a los tres o seis meses; en otros es permanente. No existe ningún tratamiento de eficacia demostrada». En una serie de 319 pacientes, más del 80 % recuperaron una agudeza visual de 20/40 o mejor (Jain *et al.*, 2012), pero en todos los estudios revisados persisten casos de escotomas permanentes. La tomografía de coherencia óptica –OCT– permite hoy evaluar el pronóstico con una resolución que no estaba disponible en tiempos de los estudios clásicos: el daño en la capa de fotorreceptores internos se correlaciona con peor visión a largo plazo.

La doctora López Gálvez cierra el círculo: «Ojalá sean conscientes de que es un fenómeno único, digno de disfrutarlo en toda su extensión, aunque sin olvidar que la salud visual debe ir por delante». Contemplar el eclipse exige comprender lo que se contempla y preservar la visión que lo hace posible. ■

Bibliografía

Hope-Ross, M. *et al.* (1993). Solar retinopathy following sun-gazing. *Eye*, 7(4), 529-534. DOI:10.1038/eye.1993.119

Jain, A. *et al.* (2012). Solar retinopathy: a review of the literature. *Survey of Ophthalmology*, 57(3), 215-223. DOI:10.1016/j.survophthal.2011.07.004

Poremba, M. *et al.* (2024). Incidence of Solar Retinopathy and Photokeratitis Post 2017 and 2024 Solar Eclipses. *Value in Health*, 27(12). DOI:10.1016/j.jval.2024.09.012

Eddington, A. S.; Dyson, F. W.; Davidson, C. (1920). A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 220, 291-333. DOI:10.1098/rsta.1920.0009

Aguilar, L. A. *et al.* (2025). Total solar eclipse triggers dawn behavior in birds. *Science*, 390(6769), 152-155. DOI: 10.1126/science.adx3025

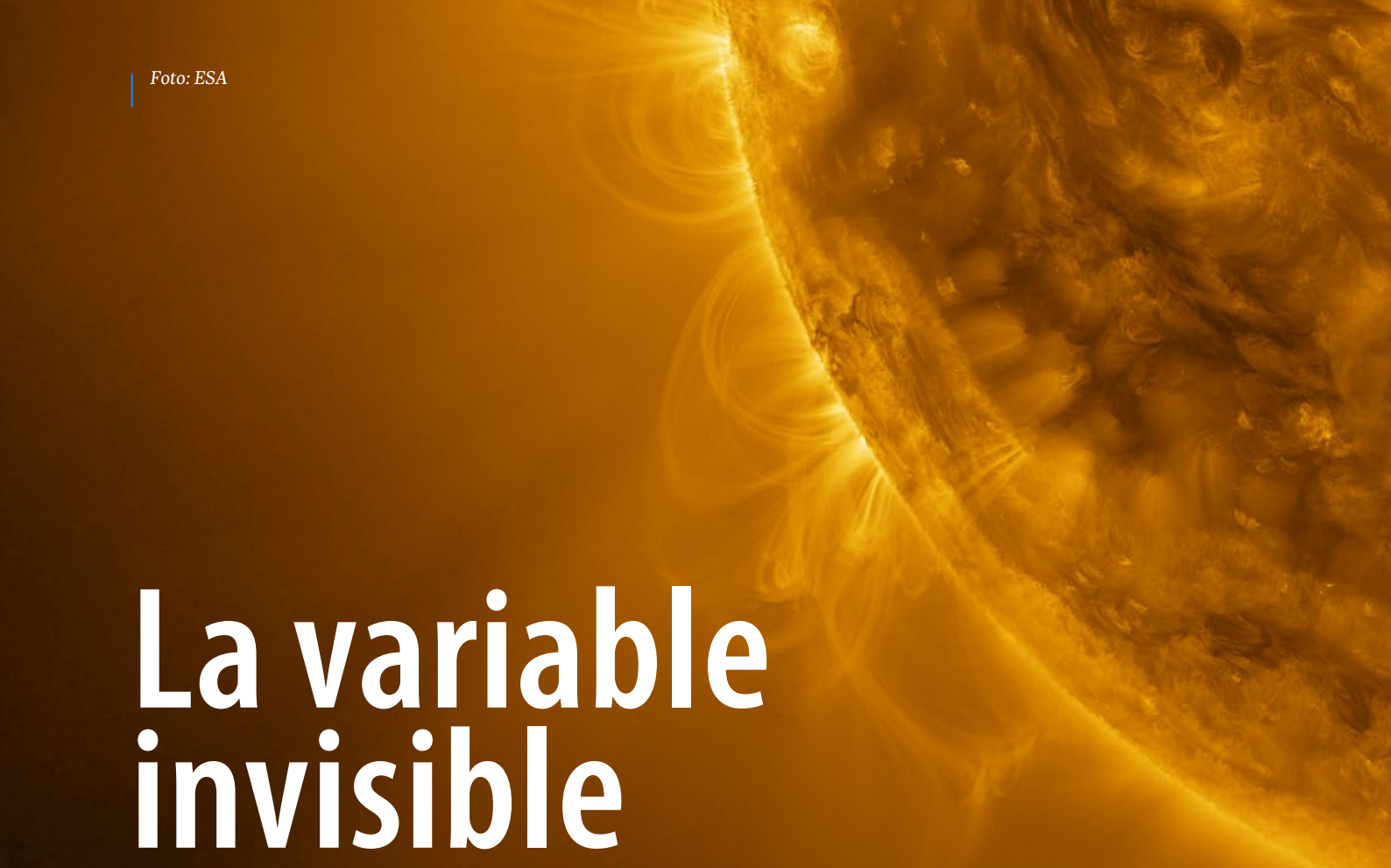


Foto: ESA

La variable invisible

Fuera de la órbita baja, la radiación espacial deja de ser un dato de contexto y se convierte en una variable de misión: médica, material, electrónica y operativa.

Texto: **Diego Rodríguez**

La humanidad vuelve a mirar fuera de la órbita baja (LEO) con una pregunta que pertenece a la ingeniería, la medicina y la protección radiológica antes que al ámbito de la exploración: qué ocurre cuando la Tierra deja de actuar como escudo. En ese punto, la radiación no acompaña a la misión como un riesgo lateral. Influye en el diseño del vehículo, en la asignación de masa, en la operación de vuelo, en el seguimiento médico y en los criterios para fijar los límites de dosis aceptables.

En la Estación Espacial Internacional, la magnetosfera terrestre y la geometría Tierra-atmósfera atenúan una parte sustancial del campo incidente. Décadas de operación en LEO han permitido acumular una base extensa de datos dosimétricos y ensayar instrumentos de medida, pero esa experiencia no es directamente extrapolable. En el espacio cislunar y especialmente en un tránsito interplanetario, la protección natural se reduce de forma drástica, el espectro de partículas cambia y la duración de la exposición se prolonga.

A partir de ahí, la nave, los materiales, la geometría interior, los modelos de entorno radiológico, la protección de la instrumentación y los procedimientos asumen una responsabilidad que en órbita baja se reparte con la naturaleza.

Tres componentes, tres respuestas

La radiación espacial no es un fenómeno homogéneo. El entorno está formado por tres tipos: la radiación atrapada en el campo magnético terrestre, concentrada en los cinturones de Van Allen; los eventos de partículas energéticas solares (SEP), asociados a erupciones o eyecciones de masa coronal; y los rayos cósmicos galácticos (GCR), un fondo casi continuo de protones y núcleos pesados de muy alta energía que atraviesa el sistema solar y determina la exposición de larga duración fuera de la magnetosfera.

Esa diferenciación es relevante porque cada componente obliga a una respuesta distinta. Los cinturones

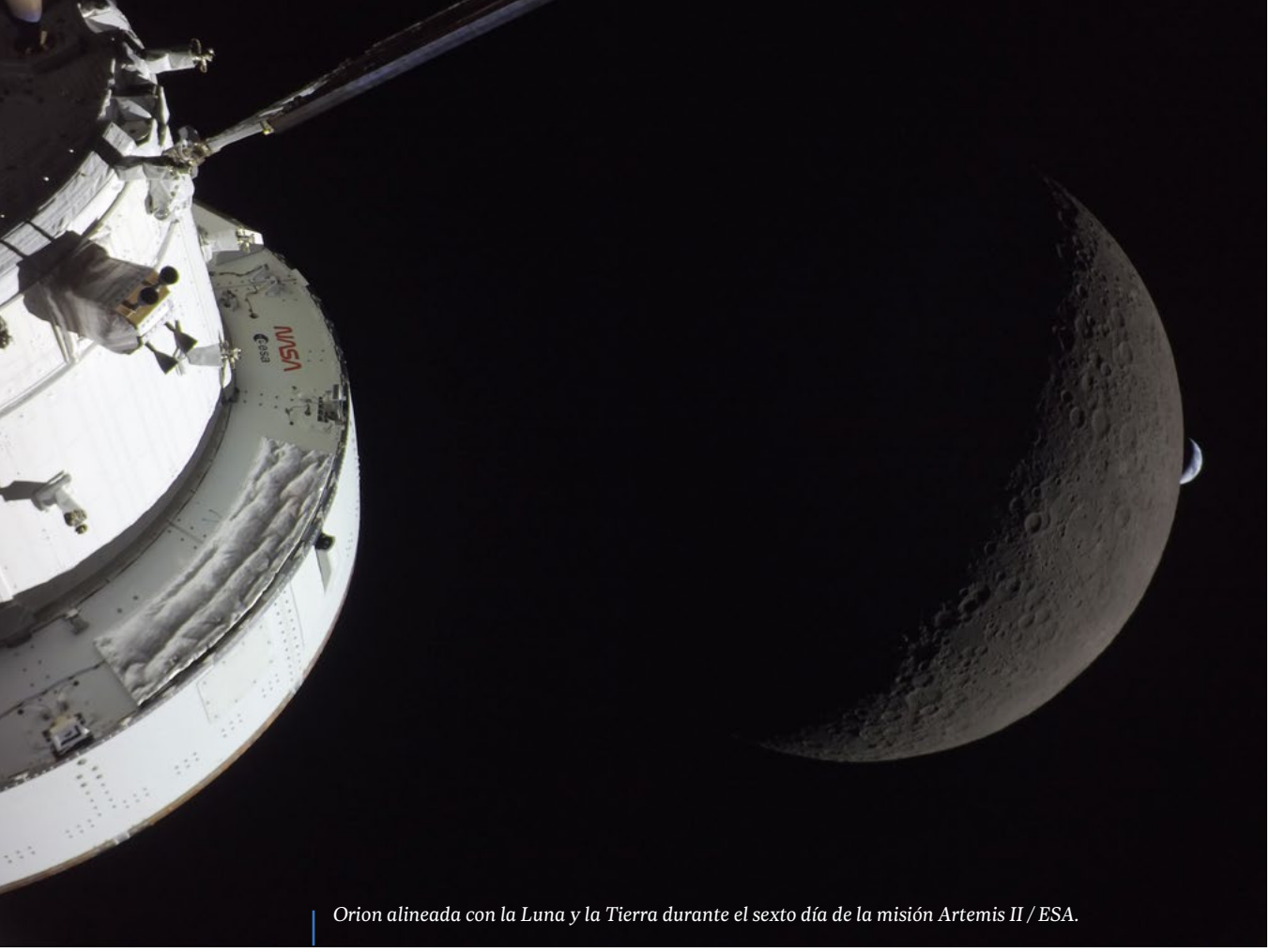


condicionan sobre todo fases concretas de salida y regreso; la trayectoria puede diseñarse para minimizar el tiempo de tránsito, como hacen los perfiles de escape rápido tipo Apollo o Artemis. Los eventos solares exigen capacidad de alerta, umbrales de actuación y refugios temporales. Los rayos cósmicos galácticos sostienen una carga de fondo difícil de reducir, relevante para el riesgo acumulado y para la radiación secundaria generada cuando las partículas atraviesan materiales.

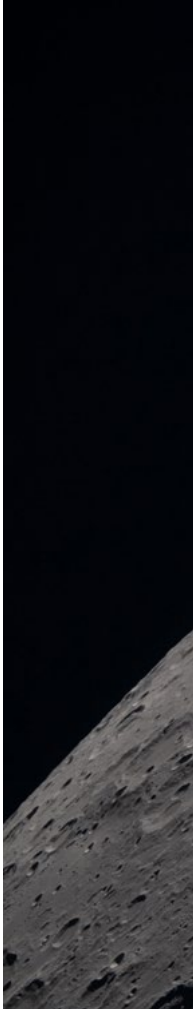
«El mayor riesgo no es confundir una sigla, sino creer que todas las fuentes de radiación se gestionan igual: los eventos solares pueden tratarse como amenazas agudas para las que cabe planificar refugios y procedimientos; los rayos cósmicos galácticos imponen una carga crónica mucho más difícil de atenuar», sintetiza Anna Fogtman, responsable de protección radiológica del equipo de medicina espacial de la ESA.

Esa asimetría tiene consecuencias prácticas. Los eventos solares son, hasta cierto punto, gestionables: la física de su interacción con los materiales se conoce razonablemente bien, y el riesgo puede reducirse mediante diseño de misión, blindaje, sistemas de alerta, procedimientos y refugios. Pero frente a los rayos cósmicos galácticos, advierte Fogtman, «el blindaje tiene una eficacia limitada; no podemos simplemente añadir más material y hacer desaparecer el problema. En la práctica, una de las medidas de protección más importantes es limitar el tiempo total que los astronautas pasan en el espacio profundo».

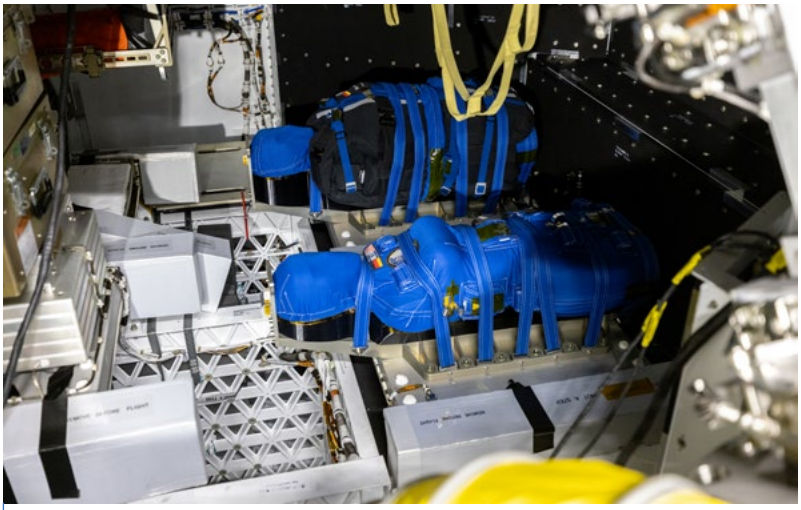
La planificación de misiones largas añade una tensión adicional. Piers Jiggens, especialista en entornos y efectos espaciales de la ESA, señala que las misiones tripuladas de larga duración tenderán a programarse durante el máximo solar, cuando la actividad magnética del Sol atenúa los GCR y reduce la exposición crónica. Pero esa misma ventana multiplica la frecuencia de eventos SEP y, con ella, la exigencia de predicción y respuesta operativa. El calendario de lanzamiento es, por tanto, también una decisión de protección radiológica.



Orion alineada con la Luna y la Tierra durante el sexto día de la misión Artemis II / ESA.



MARE: medir la radiación dentro de Orion



Instalación del experimento MARE en el módulo de tripulación de Orion durante Artemis I / NASA.

Artemis I llevó en la nave Orion el experimento MARE, con dos torsos antropomórficos femeninos, Helga y Zohar, equipados con miles de detectores para medir la exposición fuera de la órbita baja terrestre (LEO) y comparar la protección con y sin el chaleco AstroRad. El experimento no se limita a registrar una cifra de dosis: permite observar cómo varía la exposición en órganos y tejidos en condiciones reales de misión.

La dosis no es solo un número

Una vez identificadas las fuentes, la pregunta cambia: ¿cuál es su impacto? La respuesta no es reducible a una sola cifra. Importan el tipo de partícula, su energía, la dirección de incidencia, la tasa de dosis y la forma temporal de la exposición. Una exposición sostenida a baja tasa no equivale a un aumento brusco de partículas solares; un campo dominado por protones de energía media no se comporta como otro con núcleos pesados de alta energía y mayor capacidad de ionización local.

El gray mide la energía depositada por unidad de masa. La dosis equivalente, expresada en sievert, pondera esa energía según el tipo de radiación: el factor de ponderación para partículas alfa es 20, para protones 2 y para fotones y electrones 1, lo que explica por qué un campo dominado por iones pesados resulta biológicamente más perjudicial de lo que la dosis absorbida sugiere. La dosis efectiva añade la distinta radiosensibilidad de órganos y tejidos. Y el LET (transferencia lineal



La Tierra se oculta tras el horizonte lunar en el sexto día de vuelo de Artemis II / NASA.

de energía) ayuda a explicar por qué dos campos con una dosis absorbida parecida pueden no tener la misma eficacia biológica: no importa solo cuánta energía se deposita, sino cómo se deposita.

Fogtman lo formula de manera directa: «No basta con preguntar cuál fue la dosis. Hay que preguntar qué tipo de radiación era, qué energía tenían las partículas, con qué densidad depositaron energía, a qué ritmo se recibió la dosis y si la exposición fue gradual o concentrada en un episodio intenso».

Del daño en tejidos al fallo electrónico

El cuerpo humano es el primer sistema afectado. Fogtman sitúa entre las preocupaciones más asentadas el riesgo de cáncer a lo largo de la vida, las cataratas y las reacciones tisulares a dosis más altas. Al pasar a misiones largas fuera de la órbita baja, crece la incertidumbre: cambia el campo de radiación, se prolonga la exposición y aumenta la contribución de iones pesados de alta energía que no tienen un equivalente sencillo en condiciones terrestres.

El sistema nervioso central requiere una cautela particular. Los estudios en modelos celulares y animales sugieren posibles efectos sobre función cerebral, comportamiento o neuroinflamación, pero no permiten trasladar sin más esos resultados a astronautas. La misión real añade aislamiento, confinamiento, sueño alterado, carga de trabajo, estrés, microgravedad y distancia respecto a la Tierra. El riesgo es plausible y operativo, pero no está cuantificado con precisión.

«El error sería fingir que no sabemos nada. Sabemos lo suficiente para tomar la radiación en serio. Pero también sería erróneo presentar las estimaciones de riesgo como si fueran precisas: no lo son», matiza Fogtman.

Jiggens reubica la incertidumbre: «La mayor incertidumbre recae en el impacto biológico de las dosis, por la complejidad de las interacciones físicas, químicas y biológicas y por la limitada estadística disponible con campos de radiación similares a los del espacio». El entorno físico puede medirse y modelarse cada vez mejor; otra capa de incertidumbre aparece al traducir esas medidas en riesgo para la salud de una tripulación concreta en una misión concreta.

Pero el cuerpo no es el único sistema expuesto. En electrónica espacial, Juan José Jiménez, especialista en efectos de radiación sobre instrumentación espacial, y el físico Ruy Sanz, ambos del INTA, distinguen tres categorías de daño. La dosis ionizante total (TID) describe una degradación acumulativa por ionización que puede alterar propiedades eléctricas, ópticas o de materiales. El daño por desplazamiento (DDD) aparece cuando partículas energéticas desplazan átomos de la red cristalina y generan defectos estructurales. Los efectos de evento único (SEE) ocurren cuando una sola partícula deposita energía suficiente para producir un error de memoria, un transitorio, un enclavamiento (*latch-up*) o, en casos severos, un fallo destructivo.





JUAN JOSÉ JIMÉNEZ Y RUY SANZ

INTA

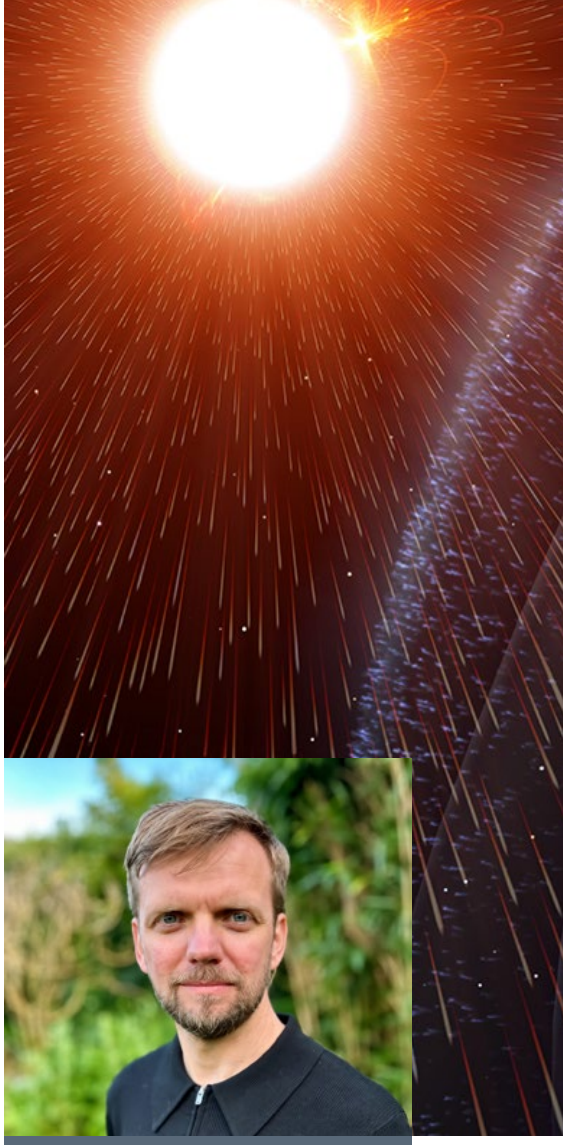
TID y DDD son efectos acumulativos; los SEE, en cambio, son efectos puntuales provocados por el paso de una única partícula. Esa diferencia física obliga a estrategias distintas de ensayo, selección de componentes, mitigación y redundancia

El *latch-up* ejemplifica bien la naturaleza del riesgo puntual: se manifiesta como un aumento brusco de corriente en el dispositivo. Los circuitos de protección lo detectan y apagan temporalmente el componente para evitar daños permanentes. Si la desconexión llega a tiempo, es seguro reactivar el sistema; si la sobrecorriente persiste, el componente puede sufrir daños permanentes. Gestionar ese margen de reacción es parte del diseño de cualquier sistema electrónico que vaya a operar fuera de la atmósfera.

Blindaje: cuando la materia cambia el problema

Si la radiación afecta por igual a cuerpos y circuitos, la primera intuición es interponer materia. Pero la física del blindaje espacial contradice esa simplificación. María Eugenia Dávila, del ICMM-CSIC, lo expresa con claridad: «La radiación que finalmente llega al interior de una nave no coincide exactamente con la que proviene del espacio, sino que es el resultado de múltiples interacciones con los materiales que atraviesa». El campo interior no es una copia atenuada del exterior. Cuando el entorno primario interactúa con la estructura, intervienen procesos atómicos y nucleares que frenan partículas, fragmentan núcleos incidentes y generan secundarios. Tras el blindaje aparece un campo mixto: partículas primarias degradadas, fragmentos, neutrones, fotones y otras contribuciones que también deben caracterizarse.

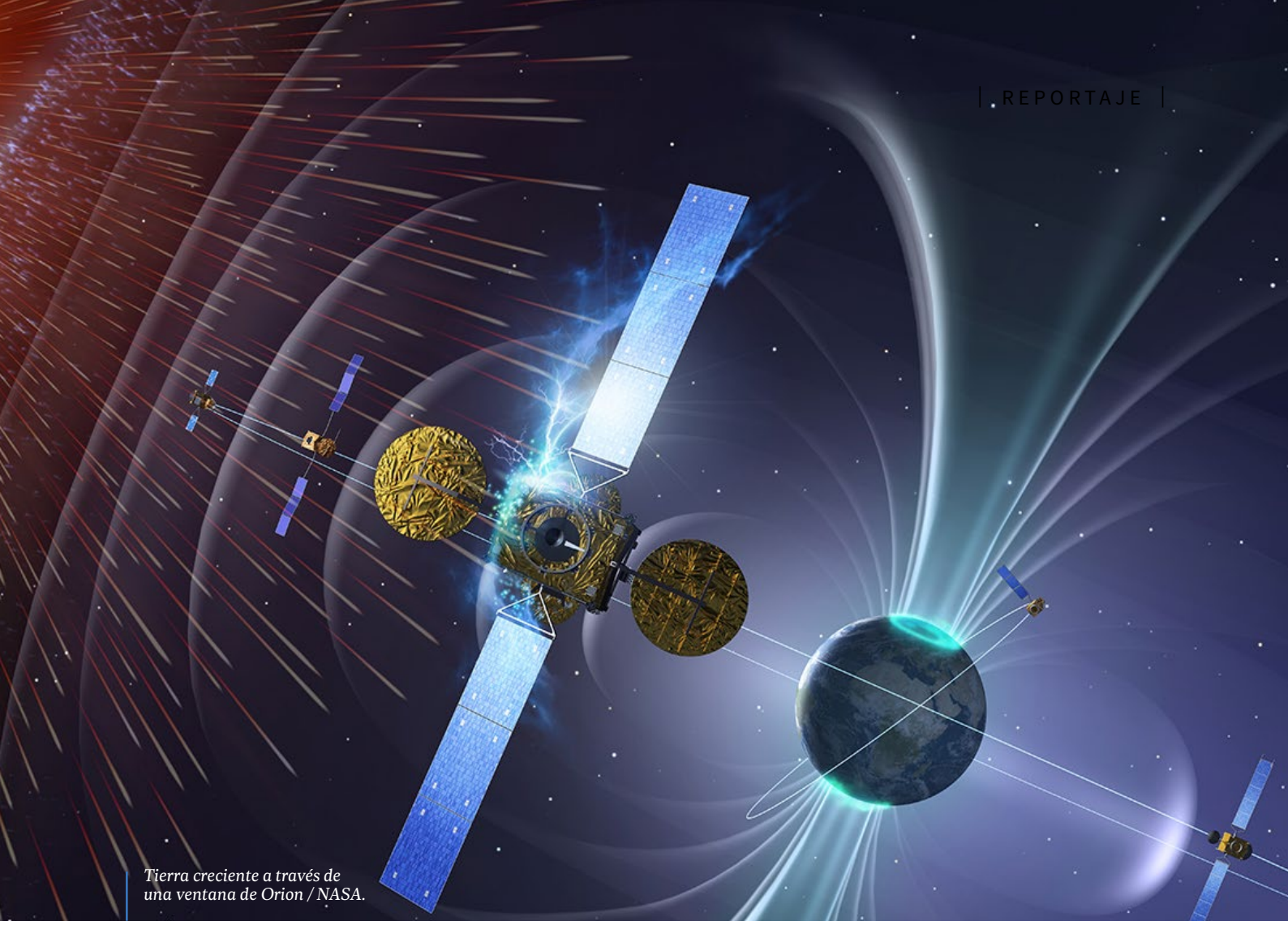
Dávila corrige el malentendido más extendido: blindar no es levantar una pared pasiva. Las partículas de alta energía, al atravesar un material, pueden chocar con los átomos del medio y generar partículas secundarias –neutrones, rayos gamma– que en algunos casos resultan más penetrantes o de mayor im-



PIERS JIGGENS

ESPECIALISTA EN ENTORNOS Y EFECTOS ESPACIALES DE LA ESA

Necesitamos saber que los astronautas pueden llegar a un refugio de tormenta o adoptar la configuración prevista a tiempo, teniendo en cuenta las restricciones operativas y los perfiles temporales de los eventos SEP; ahí es donde la modelización y la simulación desempeñan su papel



Tierra creciente a través de una ventana de Orion / NASA.

pacto biológico que la radiación original. «El blindaje no actúa únicamente como un medio absorbente, sino también como un medio generador y modificador del campo radiológico», explica. Atenuar significa reducir fluencia, intensidad o energía; transformar implica cambiar la composición, el espectro energético y la distribución angular de la radiación emergente.

Por eso, la protección real no se basa en una única capa más gruesa, sino en una optimización de materiales, geometrías, recubrimientos y masas disponibles. Las estructuras multicapa, por ejemplo, permiten combinar capas de elementos ligeros –que favorecen la moderación y absorción de neutrones secundarios– con capas de elementos pesados que mejoran la atenuación de fotones de alta energía. Pero ni siquiera estas combinaciones eliminan el problema ante rayos cósmicos galácticos: las reacciones nucleares y la radiación secundaria persisten. «Estas soluciones deben entenderse como estrategias de mitigación y optimización, y no como un blindaje absoluto», precisa Dávila.

Otro equívoco frecuente: materiales más densos o de mayor número atómico no son siempre más eficaces. Dávila recuerda que «no basta con pensar en espesor o en masa total, sino en la masa areal y en cómo está distribuida la materia, ya que lo importante es cuánta interacción acumulada ocurre a lo largo del trayecto». Un blindaje más grueso o más denso puede reducir parte de la radiación primaria, pero también modificar el campo emergente y generar componentes secundarios no previstos.

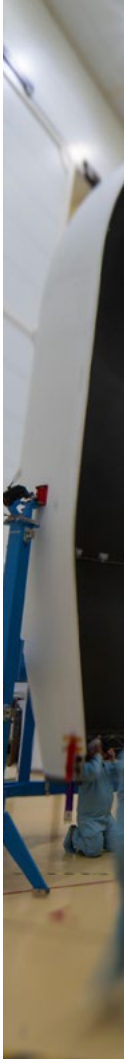
Geometría interna y protección

Si el blindaje no es una pared, sino una relación entre materia, geometría y campo de radiación, la protección depende también de la arquitectura interior de la nave. Los resultados de Artemis I lo ilustraron con datos concretos: las mediciones en Orion registraron diferencias significativas entre ubicaciones con distinto apantallamiento durante el paso por el cinturón interno de protones, y mostraron que la orientación del vehículo podía modificar de forma notable las tasas de dosis. La protección, en una nave, es también una cuestión de diseño interior y de procedimiento de vuelo.

En escenarios de partículas solares, esa lógica se hace explícita en el concepto de refugio de tormenta (*storm shelter*). No se trata de un compartimento separado del resto de la nave, sino de una configuración que concentra masa útil –agua, alimentos, equipos o estructura– alrededor de una zona donde la tripulación pueda reducir dosis durante un evento.



Vista interior del módulo Cupola de la Estación Espacial Internacional, que funciona como observatorio panorámico a 400 kilómetros sobre la Tierra / NASA.



Pero la misma solución no sirve para todos los escenarios. Jiggens recalca que un blindaje eficaz frente a partículas solares puede tener un efecto contraproducente sobre las dosis de GCR: al ser estos rayos cósmicos mucho más energéticos e incluir iones pesados de mayor carga, su interacción con la materia induce cascadas de partículas secundarias que el blindaje adicional puede amplificar en lugar de reducir. Es otra razón por la que el concepto de refugio de tormenta presenta ventajas: permite concentrar masa de forma selectiva durante un evento SEP, sin añadir protección permanente que amplifique la contribución de los GCR durante el resto de la misión. La estrategia, en definitiva, debe combinar tiempos de exposición, geometrías, zonas de mayor protección y procedimientos compatibles con el diseño global de misión.

La radiación como variable operativa

Si la protección no se reduce a interponer materia, tampoco la gestión del riesgo se reduce a medir. La radiación es una variable transversal de misión: entra en el cálculo de trayectorias, en la ubicación de componentes críticos, en la elección entre masa útil y masa de protección, en la interpretación de alertas solares, en la definición de procedimientos y en el seguimiento médico de la tripulación.

Fogtman lo expresa con claridad: «Si las mediciones de dosis van a parar a un informe, son vigilancia. La dosimetría se convierte en una herramienta médica y operativa cuando guía la acción». Cambiar la ubicación de la tripulación, retrasar o cancelar una actividad extravehicular (EVA), ajustar cronogramas, mejorar blindajes o apoyar decisiones sobre futuras asignaciones de vuelo son ejemplos de esa traducción. En el caso particular de las EVA, Jiggens precisa que el riesgo es distinto al del interior de la nave: «las partículas de menor energía tienen una contribución dominante y alcanzan su pico más tarde, de modo que las observaciones en curso pueden refinar significativamente la predicción». Eso abre un margen de decisión que no existe para las dosis recibidas dentro de la cabina.

«El objetivo no es solo conocer el número. El objetivo es saber qué significa ese número y qué debe hacerse a partir de él», remata Fogtman.

La predicción se organiza en fases de fiabilidad creciente conforme avanza el evento. Las observaciones solares y coronográficas ofrecen una primera alerta, pero Jiggens es explícito sobre sus límites: «La predicción previa a la erupción sigue siendo muy probabilística, con incertidumbres de órdenes de magnitud en las dosis y de horas o días en el tiempo; no se usa en operaciones más allá de sensibilizar a los operadores». Las partículas medidas *in situ* refinan esa caracterización: los electrones solares, más veloces, llegan antes que los protones y señalan que la nave está magnéticamente conectada con la erupción, ofreciendo un primer



Satélite SMILE (Solar wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer) siendo encapsulado para lanzamiento / ESA.

indicio de la intensidad del evento que se aproxima. Cuando empiezan a llegar los protones, su espectro energético permite acotar el perfil del evento y, combinado con las observaciones solares, refinar significativamente la predicción. Y las mediciones internas de flujo y dosis, aunque se acercan más al seguimiento en tiempo real (*nowcasting*) que a la predicción (*forecasting*), son las más aplicables, porque permiten calcular la dosis acumulada como función del tiempo y tomar decisiones inmediatas.

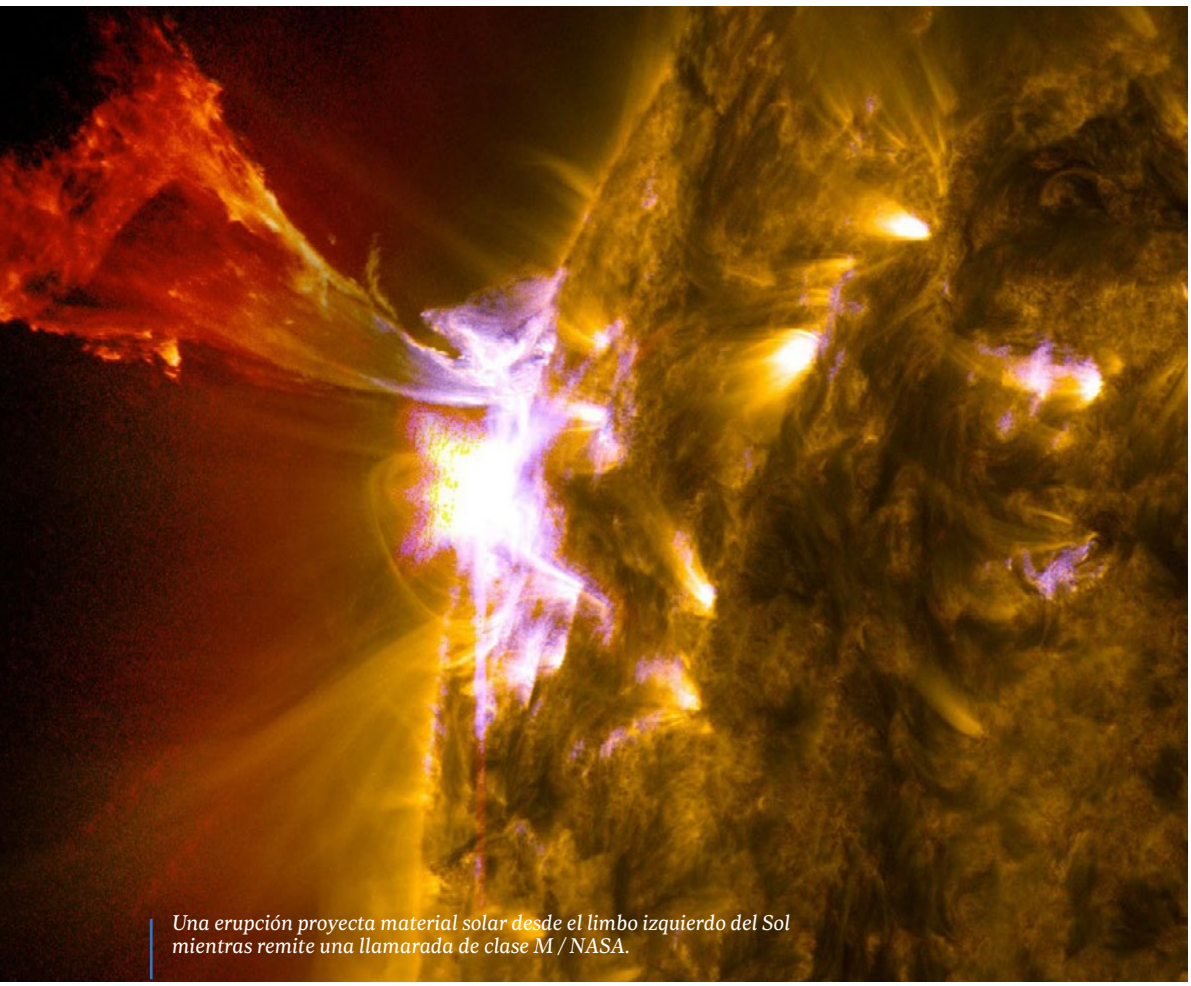
En un evento SEP, la mayor incertidumbre operativa suele ser determinar el espectro probable de partículas a partir de una erupción observada: de él dependen la dosis detrás del blindaje, el margen de reacción y la utilidad de las medidas de protección.

Ensayar, medir, anticipar

La protección se articula como un ciclo de medida, ensayo y predicción. Desde el INTA se subraya que caracterizar el entorno radiológico



El cohete SLS despega desde el Kennedy Space Center con la nave Orion de la misión Artemis II / NASA.



Una erupción proyecta material solar desde el limbo izquierdo del Sol mientras remite una llamarada de clase M / NASA.



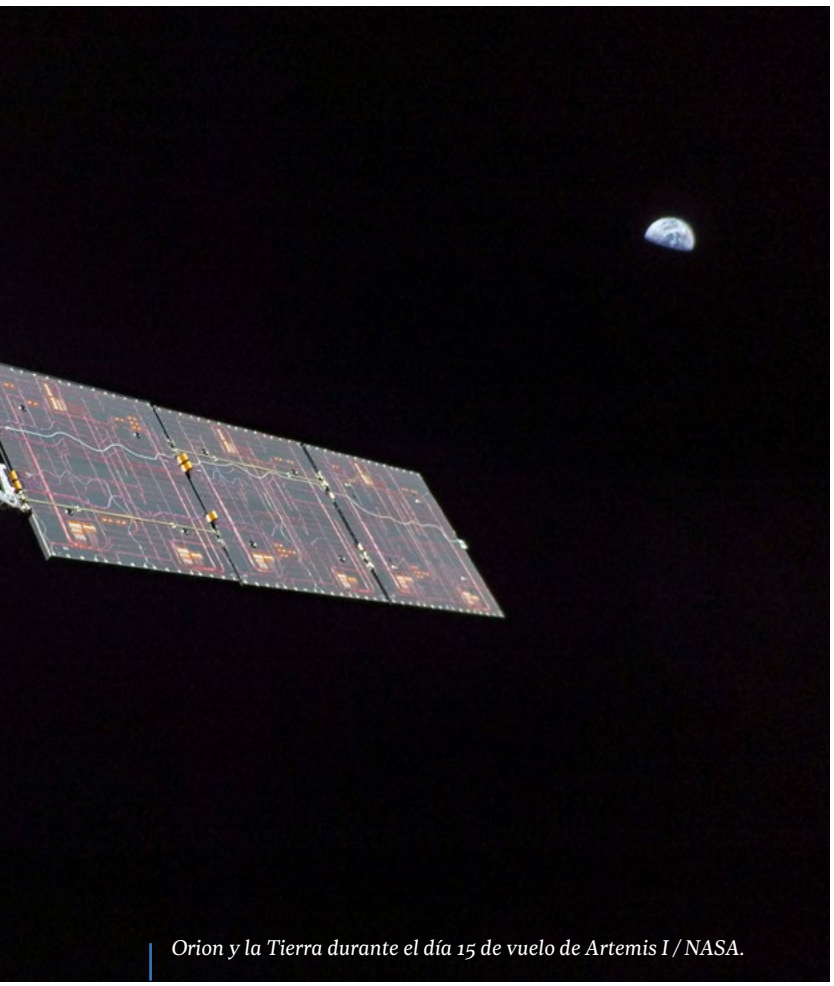
La pregunta no es si la radiación espacial constituye un problema conocido, sino cómo decidir con rigor qué incertidumbres pueden asumirse, cómo se pueden reducir y cómo deben comunicarse

significa cuantificar qué partículas incidirán sobre el sistema, con qué energías, en qué proporciones y durante cuánto tiempo. A partir de esa estimación se derivan magnitudes de ingeniería –TID, DDD y tasas de SEE– que permiten definir condiciones de ensayo en tierra, criterios de selección de componentes y márgenes de diseño. Estas magnitudes dependen del apantallamiento real, la geometría y los materiales que rodean cada sistema, por lo que a menudo se expresan en función de espesores equivalentes de aluminio.

Los ensayos en tierra son imprescindibles, pero no reproducen con plena fidelidad el entorno espacial. Se trabaja con fuentes, haces y condiciones simplificadas; se ensayan por separado mecanismos que en misión pueden acoplarse; se aceleran dosis que en el espacio se acumulan durante años; y no siempre puede reproducirse la mezcla real de partículas, energías, direcciones y geometrías. También puede ocurrir que la sensibilidad a SEE cambie a medida que el dispositivo acumula dosis ionizante o daño por desplazamiento, de modo que el comportamiento al inicio de la misión no sea idéntico al del final de vida útil.

A esas limitaciones se suma un fenómeno contraintuitivo: en algunas tecnologías electrónicas, los efectos de degradación son más severos a tasas de dosis bajas –las más representativas del entorno espacial– que a las tasas altas utilizadas en ensayos acelerados. Este fenómeno, conocido como ELDRS (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity), afecta especialmente a ciertos dispositivos bipolares y obliga a extremar la cautela al extrapolar resultados de laboratorio a condiciones reales de misión.

«Los resultados obtenidos en ensayos en tierra no deben interpretarse como una reproducción exacta del entorno de misión, sino como una base experimental que debe complementarse con mode-



Orion y la Tierra durante el día 15 de vuelo de Artemis I / NASA.



Orion sobre el cohete SLS antes del lanzamiento de Artemis II / NASA.



RadPC / NASA.

los, márgenes de diseño y criterios de ingeniería conservadores», señalan Jiménez y Sanz.

En misiones tripuladas de mayor alcance, esa incertidumbre exige medidas *in situ* con resolución energética, angular y temporal; dosimetría distribuida; modelos de transporte de partículas; ensayos más representativos de sistemas completos; y capacidad de operación adaptativa. Instrumentos previstos o desarrollados para arquitecturas cislunares, como HERMES, de la NASA, o ERSA, de la ESA, reflejan la dirección en la que se desarrolla la necesidad de medir el entorno radiológico con mayor resolución y de conectar esos datos con modelos de predicción y operación.

La radiación espacial no admite reducción a una cifra única ni a una imagen simple del peligro. Importa cuánta energía se deposita, pero también qué partículas la transportan, con qué espectro energético llegan, cuál es su LET, durante cuánto tiempo actúan y en qué secuencia temporal lo hacen: como fondo sostenido, como tránsito a través de regiones atrapadas o como episodio agudo asociado a un evento solar.

Por eso el problema obliga a abordar sistemáticamente el cuerpo, los materiales, la electrónica, la meteorología espacial y la lógica operativa de la misión. «La reducción de la incertidumbre radiológica no depende de una única mejora aislada, sino de la integración coherente de medida avanzada, modelado multiescala, ensayos representativos y operación adaptativa, cerrando el ciclo entre predicción, validación y respuesta en misión», concluyen Jiménez y Sanz.

La dimensión final, como recuerda Fogtman, no es solo técnica: «¿Quién acepta qué nivel de riesgo, sobre la base de qué evidencia, y con qué transparencia se comunica a los astronautas? Los astronautas no son solo activos de misión. Son personas que aceptan riesgos ocupacionales». La pregunta no es tanto si la radiación espacial constituye un problema conocido, sino cómo decidir con rigor qué incertidumbres pueden asumirse, cómo se pueden reducir y cómo deben comunicarse a quienes deberán convivir con ellas.

Explorar más lejos no consiste únicamente en añadir empuje, autonomía o capacidad de navegación. Consiste en operar con transparencia sobre lo que se sabe y lo que todavía no, en un medio donde la Tierra deja de actuar como escudo y la radiación se convierte en uno de los parámetros que condicionan cada decisión de diseño y operación. ■

Ángel Luis Fernández Recuero

Editor y consejero delegado de *Jot Down*, *Mercurio* y *Menéame*

«La ciencia es la forma más exigente y honesta que hemos inventado de hacernos preguntas»

Resume su manera de entender el periodismo científico en una sola frase: «Dar magnitudes y no adjetivos». Ángel Luis Fernández Recuero, editor de *Jot Down* y consejero delegado de *Menéame*, lleva catorce años construyendo una plataforma cultural que trata al lector como alguien «capaz de pensar». Informático de formación, empresario por oficio y editor por convicción advierte que una revista que ignora la ciencia «se condena a hablar solo de la espuma».

Luis Tejedor | Fotografías: **Eloy Muñoz Reyes**

Usted procede del ámbito tecnológico y empresarial. ¿Qué le ha aportado esa formación a la hora de entender la edición y sostener un proyecto cultural?

Sobre todo, en la sostenibilidad del proyecto. Cualquier iniciativa necesita una buena idea, pero también conocimiento contable e informático. De eso depende la viabilidad y la escalabilidad. No tener que depender de terceros para el desarrollo y la optimización de la plataforma que da sentido al negocio es una ventaja empresarial innegable, especialmente cuando no se cuenta con fondos propios ilimitados. Por otro lado, saber programar está conectado con un tipo de organización mental orientada a la optimización que es aplicable a cualquier área del conocimiento, como el sector editorial.

***Jot Down* nació como revista cultural, pero dedica un espacio estable a la ciencia. ¿Por qué la ciencia debe formar parte de la cultura?**

¡La ciencia es cultura! La conjetura de Taniyama-Shimura, las curvas elípticas que conducen al último teorema de Fermat o la hipótesis de Hilbert-Pólya contienen una belleza narrativa que ya quisieran muchas novelas, y excluirlas de lo cultural empobrece la idea misma de cultura. Una revista que se interroga sobre la condición humana no puede prescindir de la física, que describe el escenario donde ocurrimos, ni de la neurociencia, que examina al que se interroga. La ciencia es la forma más exigente y honesta que hemos inventado de hacernos preguntas, y una revista cultural que la ignora se condena a hablar solo de la espuma.

¿A qué atribuye la persistencia de esa separación entre ciencia y cultura humanística en España?

Seguimos arrastrando una herencia donde decir «soy de letras» equivale a una declaración de orgullosa incompetencia matemática, mientras nadie presumiría de no haber leído jamás una novela. La asimetría es reveladora. El científico que cita a Borges resulta sugestivo; el escritor que entiende una ecuación diferencial parece un excéntrico. Esa frontera no responde a la naturaleza del conocimiento, sino a una pereza institucional que el sistema educativo perpetúa y que ciertos gremios defienden porque les ahorra el esfuerzo de salir de su zona de confort. Las dos culturas de las que hablaba Snow nunca debieron ser dos, y en los lugares donde el pensamiento de verdad se mueve esa separación simplemente no existe.



> *Prefiero respetar al lector pidiéndole que suba un peldaño antes que halagarlo bajándole el listón*

Jot Down se dirige a un lector exigente. ¿Hasta dónde debe esforzarse el medio por hacer accesible un tema complejo?

El medio tiene la obligación de eliminar toda dificultad gratuita –la jerga innecesaria, la oscuridad que disfraza la pereza del que escribe–, pero no la de eliminar la dificultad inherente al asunto. Confundir ambas cosas produce esa divulgación que deja al lector con la sensación de haber entendido algo que en realidad se le ha hurtado. Prefiero respetar al lector pidiéndole que suba un peldaño antes que halagarlo bajándole el listón. Un texto bien escrito acompaña en la cuesta, no la suprime, y el lector exigente agradece precisamente que no se le trate como a alguien incapaz de pensar. La accesibilidad consiste en construir buenos escalones, no en derribar el edificio.

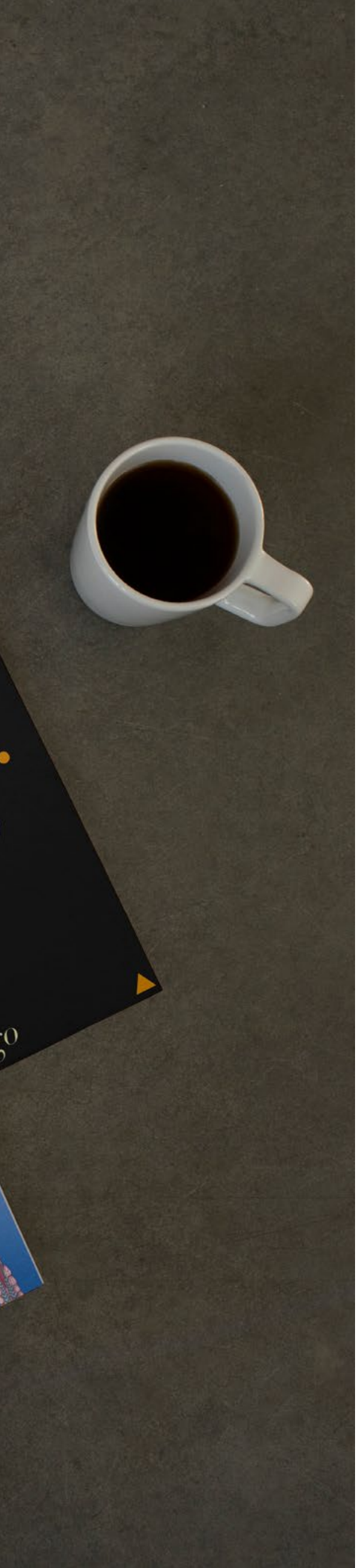
¿Qué entiende usted por ciencia en un proyecto editorial como _Jot Down_ ?

Entiendo una actitud antes que un catálogo de disciplinas. Ciencia es la disposición a someter las propias creencias a la posibilidad de estar equivocado y a aceptar el veredicto cuando llega, venga de un experimento o de una demostración. Bajo esa definición caben la física y la reflexión sobre el libre albedrío, la teoría de números y la historia material de un juego de mesa como el parchís rastreado hasta sus antepasados mesopotámicos. No me interesa vigilar las fronteras entre departamentos. Me interesa el método –la duda metódica, la evidencia, la corrección– allí donde aparezca, y ese método es lo único que merece llamarse ciencia en un proyecto editorial.

En tiempos de redes, algoritmos e inteligencia artificial, ¿qué puede aportar una revista cultural frente a la conversación dispersa de Internet?

Puede aportar lo que el algoritmo, por diseño, nunca dará: criterio, jerarquía y memoria. La conversación de Internet es un presente perpetuo que olvida cada mañana lo que ardió la víspera, optimizado para retenernos, no para formarnos. Una revista, en cambio, decide que algo merece quedarse, lo sitúa junto a otras cosas que iluminan su sentido y lo confía a un lector que ha elegido detenerse. Eso no es una rémora del pasado, es exactamente lo que escasea. Frente a la dispersión, la cultura ofrece el gesto más radical disponible hoy, que es prestar atención sostenida a una sola cosa, y mientras quede gente dispuesta a ese lujo habrá sitio para quien lo haga posible.





¿Cómo se equilibran claridad, rigor y capacidad narrativa en un buen texto de divulgación científica?

El rigor es la condición previa –sin él lo demás es propaganda con buena prosa–, pero el rigor, por sí solo, solo produce manuales técnicos. La claridad ordena, la narración seduce y la belleza fija en la memoria aquello que de otro modo se evaporaría. Un buen divulgador entiende que una metáfora exacta puede transmitir más que un párrafo de definiciones correctas, siempre que la metáfora no mienta. El equilibrio inestable está en escribir con la elegancia de un ensayista sin permitirse jamás la mentira piadosa que tantos divulgadores se conceden para no perder al público.

La ciencia avanza mediante duda, revisión y corrección. ¿Cómo se cuenta bien en un ecosistema digital que premia la rapidez y el *clickbait*?

Mal, casi siempre, y conviene reconocerlo antes de fingir que tenemos la solución. El algoritmo recompensa la certeza porque la certeza genera reacción, y la duda –motor real del conocimiento– no produce *clics*. Contar bien la ciencia en ese entorno exige nadar contra la corriente del medio, asumir que un titular honesto rendirá menos que uno tramposo y aceptar esa pérdida como coste de hacer las cosas con decencia. La trampa que más me preocupa es la del titular que afirma lo que el cuerpo del artículo matiza, porque casi nadie pasa del titular. Frente a eso solo cabe la lentitud deliberada: escribir como si el lector fuera a quedarse y construir una reputación que valga más que el pico de tráfico de una tarde.

Energía nuclear, salud, clima, inteligencia artificial… ¿Qué herramientas tiene el periodismo científico para informar sin alarmar y sin simplificar?

Dar magnitudes y no adjetivos. El periodismo que dice «niveles peligrosos» sin cifras alarma sin informar, y el que dice «no hay de qué preocuparse» tranquiliza sin informar tampoco. La radiación, por seguir el ejemplo, se mide, se compara con dosis cotidianas, se contextualiza, y un lector adulto es capaz de manejar esa información si se le da completa, en lugar de administrarle el susto o el calmante que más conviene a nuestra línea editorial. El respeto al lector consiste en confiarle la complejidad y la incertidumbre reales –decir lo que sabemos, lo que ignoramos y con qué grado de confianza– en vez de venderle una falsa seguridad en cualquiera de las dos direcciones. El alarmismo y el negacionismo son el mismo pecado: la sustitución del dato por la emoción.

Dada su experiencia en *Menéame*, ¿considera que las comunidades digitales ayudan a filtrar mejor la información científica o pueden amplificar la desinformación?

Las dos cosas a la vez, y esa simultaneidad es justamente lo difícil de gestionar. Una comunidad sana corrige errores con una rapidez que ningún experto solitario alcanza –he visto desmontar bulos en minutos por gente que sabía más que el autor original–, pero esa misma maquinaria, mal orientada, convierte una intuición falsa en consenso aparente con idéntica eficacia. La inteligencia colectiva no es ni un oráculo ni una turba; depende por completo del diseño que la encauza. Donde hay fricción, contexto y memoria de las decisiones, la comunidad filtra bien. Donde solo hay velocidad y recompensa inmediata a la indignación, amplifica el ruido. Dirigir *Menéame* me ha enseñado que la pregunta relevante nunca es si la multitud acierta, sino qué incentivos le hemos puesto delante.

La inteligencia artificial ya forma parte de los procesos de edición en el periodismo. ¿Dónde sitúa la frontera entre usarla como herramienta y delegar en ella el trabajo intelectual?

La frontera la pongo en la responsabilidad. Una herramienta extiende mi capacidad sin sustituir mi juicio, y mientras yo firme y responda de cada palabra el modelo es eso, una herramienta, tan legítima como el corrector ortográfico o el buscador. El problema empieza cuando se delega la parte que define el oficio –decidir qué importa, sostener una afirmación, asumir el error–, porque entonces no se ha automatizado una tarea, se ha vaciado una función. En *Contralgoritmia* sostengo que el riesgo mayor no es que las máquinas piensen, sino que dejemos de hacerlo nosotros por comodidad y llamemos a eso eficiencia. Uso la inteligencia artificial todos los días y enseño a usarla, precisamente porque conozco la diferencia. ■

PROYECTO MARRTA

ANÁLISIS DE RIESGOS EN RADIOTERAPIA CON TÉCNICAS AVANZADAS

Texto: **Arturo Pérez Mulas /** Área de Instalaciones y Exposiciones Médicas (IREM) – SRO – CSN / Miembro del grupo coordinador de MARRTA

El análisis proactivo de riesgos permite identificar y reducir la probabilidad y mitigar el impacto de situaciones no deseadas en cualquier proceso. MARRTA (Matrices de Riesgo en Radioterapia con Técnicas Avanzadas) es un proyecto multidisciplinar desarrollado en el seno del Foro de Protección Radiológica en el Medio Sanitario, con la participación de la Sociedad Española de Física Médica (SEFM), la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR), la Sociedad Española de Oncología Radioterápica (SEOR), la Asociación Española de Técnicos en Radiología, Radioterapia y Medicina Nuclear (AETR), y el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), con la colaboración del Ministerio de Sanidad. Su objetivo es proporcionar herramientas prácticas para que los servicios de radioterapia puedan realizar este tipo de análisis proactivos de riesgo, adaptados a las técnicas avanzadas que se utilizan en el tratamiento de pacientes. El proyecto se articula en torno a una metodología de trabajo probada en proyectos anteriores, como MARR, y en tres productos: una guía metodológica, un modelo de errores y fallos potenciales, y un *software* de libre acceso.

La experiencia acumulada demuestra que la radioterapia es un tratamiento oncológico altamente seguro. No obstante, esta modalidad terapéutica se encuentra en constante evolución, tanto desde el punto de vista tecnológico como en relación con los protocolos de tratamiento.

En los últimos años se ha producido un aumento significativo de la complejidad de las técnicas empleadas, como la radioterapia de intensidad modulada (IMRT), la arcoterapia volumétrica modulada (VMAT) o la radioterapia estereotáctica (SBRT). Estas técnicas, dirigidas a obtener más precisión y mejor distribución de la dosis absorbida, requieren procesos cada vez más sofisticados, con múltiples etapas, numerosas interacciones entre profesionales y una elevada dependencia de sistemas informáticos, equipos de imagen y mecanismos de verificación.

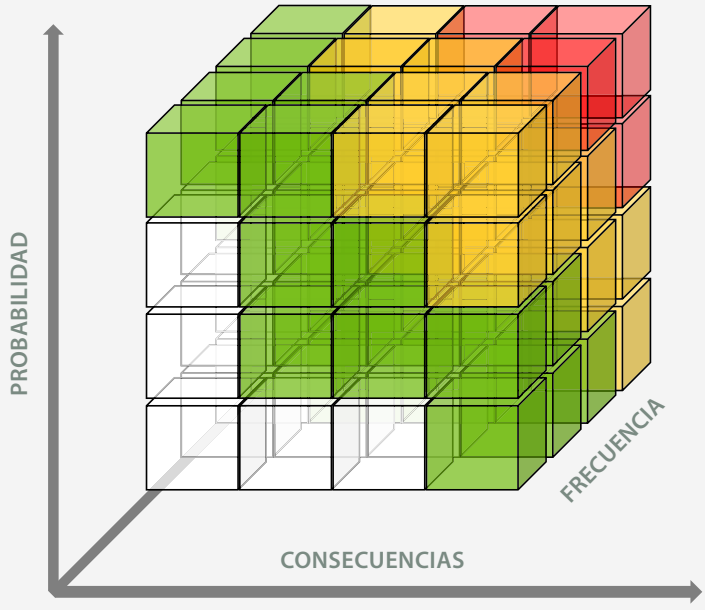


Figura 1. *Representación gráfica de la matriz de riesgo.*

A ello se suma la tendencia al hipofraccionamiento, que implica administrar el tratamiento en un menor número de sesiones, con una dosis más alta por fracción, así como el empleo de tasas de dosis más elevadas. Este cambio, posible gracias a las mejoras tecnológicas citadas, aumenta la comodidad del paciente al ser sometido a menos sesiones de tratamiento y mejora la respuesta clínica; sin embargo, puede aumentar la relevancia clínica de cualquier desviación, ya que determinados errores o fallos de los sistemas podrían tener consecuencias más serias para el paciente.

En este contexto, el análisis proactivo de riesgos se convierte en una herramienta esencial para identificar los puntos débiles de los procesos antes de que den lugar a incidentes reales, contribuyendo así a reforzar la seguridad del paciente y la fiabilidad global del tratamiento.

Pero, además, la realización de estos análisis de riesgos está establecida por las normas que transponen la Directiva europea 2013/59/Euratom. El Real Decreto 601/2019 (art. 14.4) y el Real Decreto 391/2025 (arts. 2.2.f y 15.2) exigen explícitamente análisis proactivos del riesgo para todos los tratamientos y para cada nueva técnica que se incorpore a la práctica clínica.

El proyecto MARRTA surge precisamente para dar una respuesta práctica a esta exigencia. Su objetivo es proporcionar una metodología rigurosa, accesible y adaptada al contexto español, junto con las herramientas necesarias para aplicarla de forma sistemática y sencilla. La participación de SEFM, SEPR, SEOR, AETR y CSN, y el apoyo del Ministerio de Sanidad garantizan que el resultado refleje el consenso de toda la comunidad profesional española.

1. ANTECEDENTES: DEL FORO IBEROAMERICANO AL PROYECTO MARRTA

1.1. Origen: la metodología del FORO Iberoamericano

La metodología de matrices de riesgo aplicada a la radioterapia tiene su origen en los trabajos desarrollados en el marco del Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (FORO). La principal aportación de estos trabajos, a diferencia de los métodos clásicos como el FMEA, es que se incorpora explícitamente el análisis de las defensas del proceso: barreras que detienen la propagación del error, reductores de frecuencia que disminuyen la probabilidad de que el error ocurra y reductores de consecuencias que minimizan el daño si llega a producirse.

Esta aproximación, basada en una lógica de defensa en profundidad habitual en el ámbito nuclear, aporta al método una mayor capacidad de análisis y resolución. Así, dos servicios que presenten los mismos errores potenciales pueden tener perfiles de riesgo muy diferentes si sus defensas, controles y mecanismos de detección no son equivalentes.

Tabla 1. Organizaciones participantes en el proyecto MARRTA y sus aportaciones.

Acrónimo	Organización	Rol en MARRTA
SEFM	Sociedad Española de Física Médica	Coordinación, metodología, *software* (financiación)
SEPR	Sociedad Española de Protección Radiológica	Protección radiológica, marco normativo, *software* (financiación)
SEOR	Sociedad Española de Oncología Radioterápica	Oncología radioterápica, perspectiva clínica, *software* (financiación)
AETR	Asociación Española de Técnicos en Radiología, Radioterapia y Medicina Nuclear	Perspectiva práctica del proceso de los tratamientos diarios aportada por los técnicos superiores en radioterapia y dosimetría (TSRTyD)
CSN	Consejo de Seguridad Nuclear	Experiencia en análisis de riesgos, programación del *software* y apoyo institucional sostenido

1.2. Proyecto MARR (2013)

En mayo de 2013 nació el proyecto MARR (Matrices de Riesgo en Radioterapia), con el objetivo de adaptar la metodología iberoamericana al contexto de los servicios de oncología radioterápica en España. El proyecto dio lugar a tres resultados principales: una guía metodológica, un modelo de errores y fallos aplicable a la radioterapia convencional con acelerador lineal, y el desarrollo de una actualización del *software* de apoyo SEVRRA, originalmente creado en los proyectos del FORO.

MARR demostró que era posible aplicar análisis de riesgos rigurosos en el entorno hospitalario mediante una metodología estructurada, comprensible y utilizable por profesionales sanitarios sin formación especializada en seguridad nuclear. Además, la realización de MARR supuso la incorporación de las sociedades científicas involucradas y la creación de un método de trabajo que fue heredado por MARRTA.

Este proyecto constituyó la primera base nacional para la aplicación sistemática de matrices de riesgo en radioterapia y sirvió como punto de partida para la posterior evolución hacia MARRTA. Estuvo acompañado de un fuerte esfuerzo de formación de los profesionales sanitarios, con el apoyo de las sociedades científicas y el Ministerio de Sanidad.

1.3. Evolución hacia MARRTA (2017)

En septiembre de 2017 arrancó el proyecto MARRTA (Matrices de Riesgo en Radioterapia con Técnicas Avanzadas), con tres objetivos: actualizar la metodología para cubrir las nuevas técnicas IMRT, VMAT y SBRT; construir un nuevo modelo de referencia de errores y fallos que incorporara estas técnicas; y desarrollar un *software* mejorado que superara las limitaciones de SEVRRA. El proyecto contó con el soporte técnico del CSN, la participación de SEFM, SEPR, SEOR y AETR, y el apoyo del Ministerio de Sanidad, con financiación parcial de las Ayudas a la Investigación Ignacio H. de Larramendi de Fundación MAPFRE.

2. PROCESO DEL PROYECTO MARRTA

2.1. Las sociedades participantes y sus aportaciones

Una de las características definitorias del proyecto MARRTA es su carácter interprofesional. La metodología desarrollada requería integrar, de forma coherente, las distintas perspectivas que intervienen en el proceso radioterápico: la física médica, la protección radiológica, la práctica clínica, la operación diaria de los tratamientos y el enfoque regulador de la seguridad.

La SEFM ha aportado la perspectiva de los radiofísicos hospitalarios, responsables de la planificación dosimétrica, la verificación de tratamientos y el control de calidad de los equipos. La SEPR ha contribuido con su experiencia en el marco normativo de protección radiológica y en la aplicación de principios de seguridad. La SEOR ha incorporado la visión clínica del oncólogo radioterápico, que es quien toma las decisiones terapéuticas y quien mejor conoce las consecuencias reales de los errores sobre los pacientes. La AETR (Asociación Española de Técnicos en Radiología, Radioterapia y Medicina Nuclear) ha representado en el proyecto a los técnicos superiores en radioterapia y dosimetría (TSRTyD), cuya actividad se sitúa en la primera línea del proceso: posicionamiento del paciente, adquisición de imágenes, ejecución del tratamiento y comprobaciones previas a la irradiación. Su participación ha permitido ajustar el modelo a la realidad operativa de los servicios.

El CSN ha aportado décadas de experiencia en el análisis probabilístico de seguridad. La metodología de matrices de riesgo no es exclusiva de la radioterapia; sus raíces están en los métodos de análisis de riesgos desarrollados para la industria nuclear y aeronáutica. Además, su participación y su apoyo institucional se han mantenido desde los trabajos iniciales desarrollados en el marco del FORO y ha proporcionado continuidad, solidez y coherencia metodológica al proyecto.

2.2. Bases metodológicas y construcción del modelo

El punto de partida fue el modelo MARR, que fue revisado íntegramente y ampliado para incorporar las especificidades de las técnicas avanzadas: planificación inversa, modulación de intensidad, radioterapia estereotáctica, tratamiento guiado por la imagen (IGRT), seguimiento superficial (SGRT) y gestión de los movimientos respiratorios. El grupo de trabajo celebró reuniones periódicas a lo largo de varios años para consensuar cada uno de los 110 sucesos iniciadores, sus parámetros y las defensas asociadas. Este proceso fue exigente y prolongado, pero necesario para construir un modelo de referencia sólido y técnicamente riguroso: sin la participación real de todos los perfiles implicados, habría resultado incompleto.

2.3. Programa piloto y edición final

Una vez disponible una versión de referencia del modelo y del *software*, el proyecto puso en marcha un programa piloto con dieciocho servicios de radioterapia de toda España. Cada servicio aplicó la metodología y aportó sus propuestas de modificación. El resultado fue un proceso de revisión de gran alcance: 139 modificaciones sobre sucesos iniciadores, 48 sobre reductores de frecuencia, 75 sobre barreras y 23 sobre reductores de consecuencias. El programa piloto permitió mejorar el contenido técnico del modelo y, al mismo tiempo, comprobar que la metodología era aplicable a la diversidad organizativa y asistencial del sistema hospitalario español.

Tras finalizar el proceso de revisión, se elaboró la versión final de los tres productos del proyecto: la guía metodológica, el modelo (v2.1, octubre 2025) y el *software* MARRTA (v2.0.0, octubre 2025, en el momento de la publicación de este artículo está en la versión 2.1.1). El conjunto fue aprobado unánimemente por SEFM, SEPR, SEOR y AETR, y publicado con el respaldo institucional del CSN y el Ministerio de Sanidad.

3. LOS TRES ELEMENTOS DE MARRTA

El resultado final de MARRTA es un sistema coherente de tres componentes interdependientes, diseñados para que cualquier servicio de radioterapia pueda realizar un análisis proactivo de riesgos completo y documentado sin necesidad de expertos en fiabilidad.

3.1. Guía metodológica

La *Guía MARRTA* establece el marco conceptual del análisis de riesgos, basado en la combinación de tres factores: la frecuencia esperada del suceso iniciador, las consecuencias potenciales sobre el paciente y la probabilidad de fallo de las defensas existentes. Además, describe de forma ordenada cómo aplicar la metodología en la práctica.

El proceso radioterápico se divide en siete etapas: decisión terapéutica, localización, delineación de volúmenes, planificación, verificación postplanificación, sesión inicial y tratamiento diario. Esta división permite analizar el riesgo de forma estructurada, identificando en cada fase los posibles sucesos iniciadores y las defensas disponibles para prevenirlos, detectarlos o mitigar sus consecuencias.

Cada elemento del análisis se clasifica en cuatro niveles: frecuencia del suceso (alta, media, baja, muy baja), consecuencias sobre el paciente (muy altas, altas, medias, bajas), probabilidad de fallo de las defensas (alta, media, baja, muy baja) y nivel de riesgo resultante (muy alto, alto, medio, bajo).

PA	CB	CM	CA	CMA
FA	RM	RA	RMA	RMA
FM	RM	RA	RA	RMA
FB	RM	RM	RA	RA
FMB	RM	RM	RA	RA

PM	CB	CM	CA	CMA
FA	RM	RA	RA	RMA
FM	RM	RM	RA	RA
FB	RB	RM	RA	RA
FMB	RB	RM	RM	RA

PB	CB	CM	CA	CMA
FA	RB	RM	RA	RA
FM	RB	RM	RA	RA
FB	RB	RM	RM	RM
FMB	RB	RM	RM	RM

PMB	CB	CM	CA	CMA
FA	RB	RM	RM	RA
FM	RB	RM	RM	RM
FB	RB	RB	RB	RM
FMB	RB	RB	RB	RM

Figura 2. *La matriz de riesgo tridimensional de MARRTA combina frecuencia, probabilidad de fallo de defensas y consecuencias para obtener el nivel de riesgo.*

La matriz tridimensional genera 64 combinaciones posibles que el *software* calcula automáticamente. La guía dedica especial atención a la gestión del riesgo. Una vez obtenidos los resultados, el servicio debe aplicar el principio ALARP (As Low As Reasonably Practicable) para priorizar las acciones de mejora. Las medidas preventivas se ordenan según su eficacia, desde las más robustas (como enclavamientos automáticos o automatización de procesos) hasta medidas de menor fiabilidad, como la formación, pasando por los procedimientos y las verificaciones independientes. La guía desaconseja el uso de la asignación de culpas como medida correctora y subraya que las organizaciones deben adoptar una cultura de seguridad basada en la premisa de que errar es humano. En sistemas complejos, la seguridad no puede depender únicamente de la atención individual, sino que debe apoyarse en procesos bien diseñados, defensas eficaces y mecanismos de detección y corrección suficientemente sólidos.

3.1.1. COMPARACIÓN CON OTRAS METODOLOGÍAS

El FMEA es el método de análisis proactivo más extendido en el ámbito sanitario, promovido por las sociedades profesionales de Estados Unidos, ASTRO y AAPM para la gestión de riesgos en radioterapia. La metodología MARRTA surge en parte como respuesta a las limitaciones estructurales del FMEA.

La diferencia más relevante es conceptual. En el FMEA, el riesgo asociado a un modo de fallo se valora normalmente mediante la combinación de frecuencia, gravedad y detectabilidad, pero la consideración de las defensas suele quedar oculta en la detectabilidad e incorporada de forma indirecta, a través de juicios de expertos que pueden ser variables entre equipos. En cambio, la metodología MARRTA identifica y analiza explícitamente las defensas existentes en el proceso, diferenciando entre barreras, reductores de frecuencia y reductores de consecuencias. De este modo, permite estimar el riesgo a partir de la secuencia completa de fallo y de la probabilidad de que las defensas previstas no actúen eficazmente.

Esta aproximación hace que el nivel de riesgo resultante sea más representativo del funcionamiento real del servicio y facilita la comparación entre procesos o centros con defensas diferentes. Además, reduce la dependencia de valoraciones subjetivas, al apoyarse en

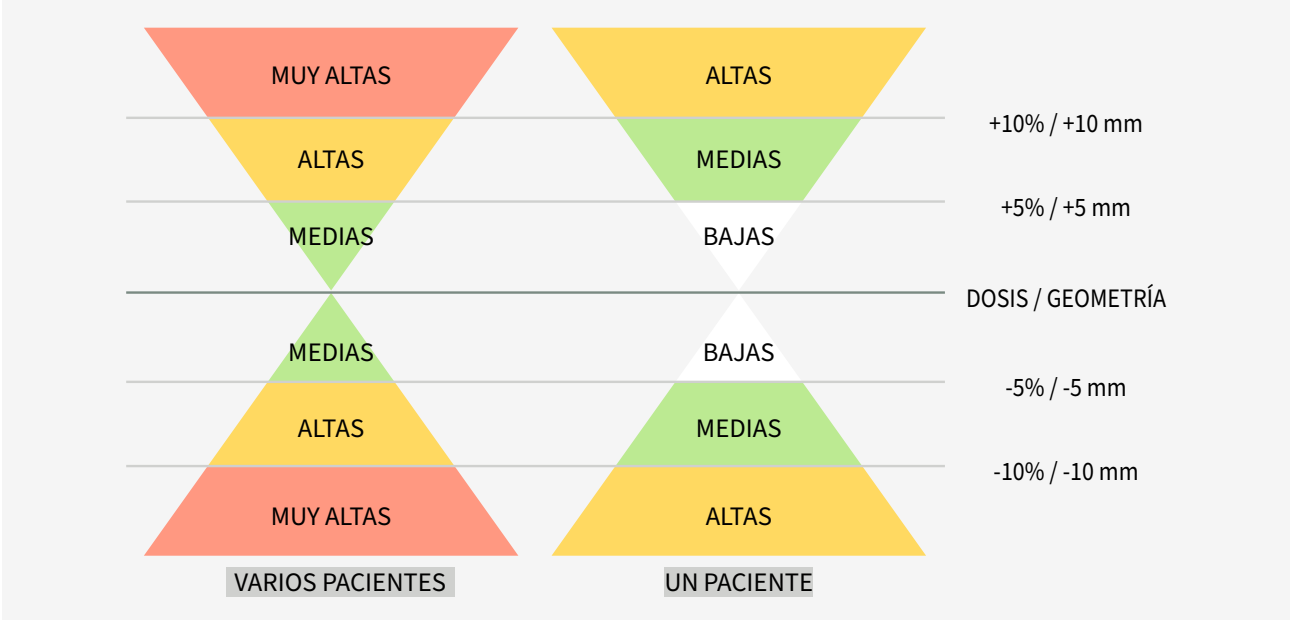


Figura 3. *Criterios para la clasificación de los niveles de consecuencias en MARRTA, basados en los criterios CTCAE y en el error de dosis o geométrico producido.*



Figura 4. *Elementos integrados del sistema MARRTA para el análisis proactivo de riesgos en radioterapia avanzada.*

Tabla 2. **Principales parámetros del modelo de errores y fallos potenciales de MARRTA (v2.1, octubre de 2025)**

Parámetro del modelo	Valor
Sucesos iniciadores identificados	110
Barreras identificadas	59
Reductores de frecuencia	54
Reductores de consecuencias	20
Secuencias de riesgo bajo (modelo completo)	97 (89 %)
Secuencias de riesgo medio (modelo completo)	13 (11 %)
Secuencias de riesgo alto o muy alto	0 (0 %)
Errores de origen humano	86 %

un modelo estructurado y en criterios previamente definidos.

Una segunda diferencia relevante es que MARRTA proporciona un modelo de riesgo genérico, específicamente desarrollado para radioterapia y fácilmente adaptable a cada servicio. Por el contrario, la aplicación del FMEA suele requerir la construcción del análisis desde cero, con una participación más intensa de expertos en análisis de riesgos y una mayor carga metodológica para los equipos clínicos. Esto puede dificultar su uso sistemático en la práctica diaria de los servicios de radioterapia.

3.2. Modelo de errores y fallos potenciales

El modelo es el catálogo de referencia de los errores y fallos potenciales identificados por el grupo de trabajo en un servicio genérico de radioterapia con técnicas avanzadas. No es prescriptivo: cada servicio debe adaptarlo a su propia realidad. La tabla 2 resume sus elementos principales.

Los 110 sucesos iniciadores se distribuyen entre las siete etapas: la localización (23 iniciadores) y el tratamiento diario (28) concentran la mayor parte. Este reparto tiene implicaciones directas sobre qué perfiles profesionales resultan más críticos: los TSRTyD son los profesionales más directamente implicados en esas etapas, y gran parte de las defensas dependen precisamente de sus protocolos de trabajo y su formación.

Un resultado importante es que el 86 % de los sucesos iniciadores son errores de origen humano, principalmente atribuibles a distracciones, interrupciones, comunicación deficiente y formación insuficiente. Aun así, cuando se aplican todas las defensas identificadas, ninguna secuencia (conjunto formado por el suceso iniciador y sus barreras) alcanza nivel de riesgo alto o muy alto. Las 13 secuencias con riesgo medio corresponden a situaciones en las que las defensas son fundamentalmente procedimentales o manuales: gestión de cambios en el plan, colocación de *bolus*, manejo de interrupciones del tratamiento o fallos de sistemas automáticos de corrección de isocentro.

3.3. Software MARRTA

El *software* MARRTA es la herramienta que integra la metodología y el modelo en una aplicación de escritorio multiplataforma, compatible con Windows y macOS. Su arquitectura permite tanto a equipos que se inician en el análisis de riesgos como a servicios con experiencia previa realizar estudios completos, documentados y reproducibles, sin conocimientos específicos más allá de una formación básica en la metodología, o el seguimiento detallado de la guía publicada.

3.3.1. FUNCIONALIDADES PRINCIPALES

La tabla 3 recoge las funcionalidades principales del *software* en su versión 2.1.1.

3.3.2. FLUJO DE TRABAJO

El flujo habitual comienza con la carga del modelo de referencia, que el *software* importa directamente desde el archivo distribuido con la Guía. El equipo de análisis del servicio, que idealmente debe estar formado, al menos, por un oncólogo radioterápico, un radiofísico y un técnico, revisa los sucesos iniciadores uno por uno, marca los aplicables y ajusta los parámetros de frecuencia, consecuencias y robustez de las defensas a la realidad del servicio. El *software* recalcula el perfil de riesgo en tiempo real, lo que facilita la discusión en equipo y permite evaluar de inmediato el impacto de añadir o reforzar una barrera. Al final, se genera un informe completo que documenta el estudio y sirve de base para el programa de gestión del riesgo del servicio.

Una funcionalidad especialmente valiosa es el análisis de importancia de las defensas. Para cada suceso iniciador, el *software* permite identificar cuáles son las barreras y reductores más influyentes en el nivel de riesgo final: aquellas cuya eliminación o degradación tendría mayor impacto sobre el perfil del servicio. Este análisis es fundamental para priorizar recursos: no todas

Tabla 3. Funcionalidades del *software* MARRTA (v2.0.0, octubre de 2025)

Funcionalidad	Descripción
Gestión del proceso	Definición de etapas, subetapas, equipos y profesionales del servicio concreto
Catálogo de iniciadores	Carga del modelo de referencia; añadir, eliminar o modificar iniciadores
Gestión de defensas	Barreras, reductores de frecuencia y reductores de consecuencias con ajuste de robustez
Cálculo automático	Perfil de riesgo calculado en tiempo real a medida que se modifican los datos
Análisis de importancia	Identifica las defensas más críticas para mantener el riesgo en niveles aceptables
Informes	Generación de informes completos y exportación de resultados
Motor de *scripting*	Integrado para JavaScript y Python para automatización de tareas y análisis a medida
Importación/ exportación Excel	Migración de estudios anteriores realizados desde hojas de cálculo
Multiplataforma	Aplicación de escritorio compatible con Windows y macOS

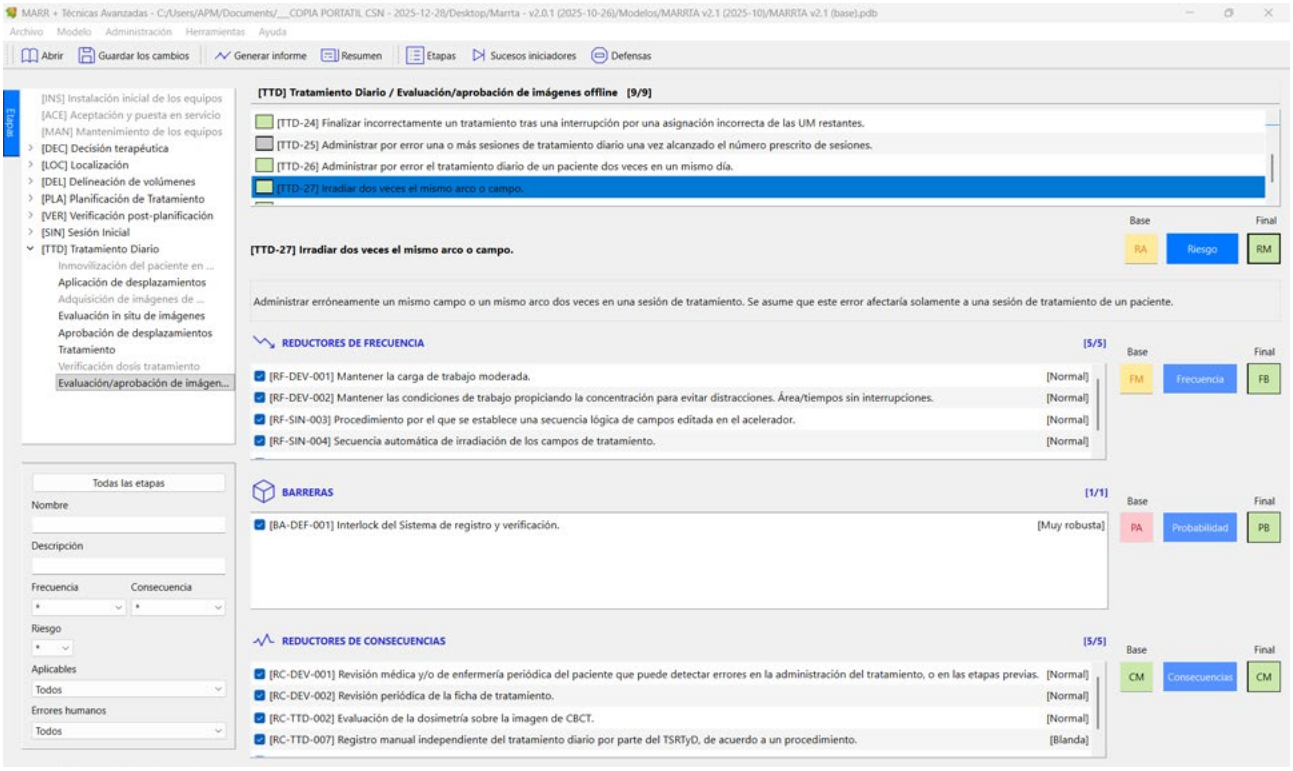


Figura 5. *Interfaz del software MARRTA mostrando un suceso iniciador en la etapa de planificación con consecuencias altas, con los valores base y finales de frecuencia, barreras y reductores.*

las defensas tienen el mismo peso, y conocer cuáles son las más críticas permite orientar las inversiones en seguridad hacia donde realmente marcan la diferencia.

3.3.3. FLEXIBILIDAD DE USO

La última versión incorpora un motor de *scripting* integrado que permite interactuar con el modelo de forma programática mediante JavaScript o Python. Desde el editor de *scripts* el usuario puede automatizar tareas repetitivas, generar análisis personalizados, extraer datos en formatos específicos o aplicar modificaciones masivas al modelo de forma controlada. La API de *scripting* expone el modelo completo (etapas, sucesos iniciadores, defensas y resultados de riesgo) y permite tanto la lectura como la escritura de valores, abriendo la puerta a flujos de trabajo avanzados como la comparación automatizada de escenarios o la generación de informes personalizados en formatos externos.

Para facilitar la transición desde SEVRRA, MARRTA incluye un importador que permite cargar estudios anteriores y continuar su actualización. También es posible importar modelos desde Excel, lo que facilita la incorporación de servicios con estudios previos en formatos manuales. Los estudios se almacenan en archivos de base de datos que pueden compartirse entre servicios para facilitar la colaboración o el contraste de modelos entre centros.

Aunque el modelo de referencia se centra en la radioterapia con técnicas avanzadas, la arquitectura del *software* es suficientemente flexible como para permitir crear, gestionar y calcular modelos de riesgo basados en la metodología de matrices de riesgo para su uso en braquiterapia, medicina nuclear terapéutica o intervencionismo.

3.3.4. *SOFTWARE* LIBRE Y FLEXIBLE

Una de las decisiones más relevantes del proyecto fue publicar el *software* como herramienta de libre acceso y con código abierto, distribuida a través de un repositorio público en GitHub (https://github.com/risk-marrta/MARRTA). Esta elección responde a la convic-

Tabla 4. Criterios de actuación según el nivel de riesgo en la metodología MARRTA

Nivel de riesgo	Criterio de actuación
Muy alto (RMA)	Inaceptable. Acción inmediata imprescindible.
Alto (RA)	Inaceptable. Se deben tomar medidas correctoras.
Medio (RM)	Tolerable si es ALARP. Seguimiento y mejora continua.
Bajo (RB)	Aceptable. No se requiere acción prioritaria.

ción de que la comunidad de usuarios permitirá mejorar el *software* y la creación de nuevos modelos de riesgo para otras prácticas clínicas.

El modelo de distribución libre facilita la sostenibilidad a largo plazo. El repositorio público permite que cualquier profesional o institución pueda reportar incidencias, proponer mejoras o contribuir directamente al desarrollo. Esta dimensión colaborativa conecta con la cultura de aprendizaje y mejora continua que la propia metodología promueve: del mismo modo que un servicio aprende de sus propios incidentes y de los de otros centros, la comunidad de usuarios de MARRTA puede aprender colectivamente y mejorar las herramientas comunes.

La flexibilidad es el segundo eje. MARRTA no impone un modelo único: el modelo de referencia es una base de partida que cada servicio adapta a su contexto. El motor de *scripting* lleva esta flexibilidad más allá de la personalización del modelo, permitiendo a los usuarios más avanzados construir flujos de trabajo a medida e integrar el análisis de riesgos con sus sistemas de gestión de calidad existentes.

Finalmente, la vocación de generalidad apunta hacia un futuro en el que MARRTA pueda convertirse en la plataforma de referencia para el análisis proactivo de riesgos en todo el medio sanitario con radiaciones ionizantes.

4. CONCLUSIONES

El proyecto MARRTA ha dado lugar a un sistema coherente y completo para el análisis proactivo de riesgos en radioterapia con técnicas avanzadas. Este sistema se articula en tres productos complementarios: una guía metodológica, que describe cómo realizar el análisis; un modelo de referencia, que recoge los errores y fallos más relevantes junto con sus defensas asociadas; y un *software* de libre acceso, que integra ambos elementos y automatiza los cálculos. La participación de la SEFM, la SEPR, la SEOR, la AETR y el CSN, y la colaboración del Ministerio de Sanidad refuerzan el carácter representativo del proyecto y aseguran que el resultado incorpore las principales perspectivas profesionales implicadas en la seguridad de los tratamientos radioterápicos.

Los resultados del análisis de referencia son en sí mismos reveladores: cuando todas las defensas identificadas están en vigor, ninguna secuencia del proceso alcanza nivel de riesgo alto o muy alto. Las trece secuencias con riesgo medio residual señalan con precisión los procesos manuales y las dependencias tecnológicas que merecen mayor atención en los programas de mejora. El dato de que el 86 % de los sucesos iniciadores sean de origen humano ofrece una guía de actuación: apunta hacia la carga de trabajo, las condiciones de concentración, la comunicación entre profesionales y la formación como los factores con mayor potencial de mejora. Este dato señala, una vez más, que la seguridad de los pacientes es sobre todo una cuestión organizativa y cultural.

La metodología de matrices de riesgo aporta una ventaja importante respecto a enfoques más clásicos, como el FMEA, al no limitarse a identificar modos de fallo, sino incorporar de forma explícita la valoración de las defensas existentes. Esta diferencia es esencial para la gestión práctica del riesgo: dos servicios con los mismos errores potenciales pueden presentar perfiles de riesgo muy distintos si sus barreras, reductores de frecuencia y reductores de consecuencias no son equivalentes. Por ello, un método que analiza las defensas permite orientar las acciones de mejora hacia los puntos donde realmente pueden producir un mayor impacto.

La radioterapia es ya una modalidad terapéutica altamente segura. MARRTA aspira a reforzar aún más esa seguridad, poniendo al alcance de todos los servicios, con independencia de su tamaño o recursos, herramientas que les permitan conocer sus propios riesgos y actuar sobre ellos de forma sistemática, trazable y documentada. Con el respaldo de las sociedades profesionales, el apoyo institucional y la colaboración activa de los usuarios, el proyecto cuenta con una base sólida para seguir evolucionando y consolidarse como una herramienta de referencia en la mejora continua de la seguridad en radioterapia.

AGRADECIMIENTOS

El grupo de trabajo MARRTA desea expresar su gratitud a los dieciocho servicios de radioterapia que participaron en el programa piloto y cuyos comentarios enriquecieron sustancialmente el modelo. El proyecto contó con el apoyo financiero de las Ayudas a la Investigación Ignacio H. de Larramendi (Fundación MAPFRE) y la financiación parcial de SEFM, SEPR y SEOR para el desarrollo del *software*. El CSN proporcionó apoyo institucional sostenido a lo largo de toda la vida del proyecto. La AETR contribuyó de forma determinante a que el modelo refleje la realidad operativa desde la perspectiva de los técnicos superiores en radioterapia y dosimetría.

Referencias

1 *Grupo de trabajo MARRTA (2025). Guía para la aplicación de la metodología de Matrices de Riesgo en Radioterapia con Técnicas Avanzadas (MARRTA). Rev.0 (17).* Foro de Protección Radiológica en el Medio Sanitario.

2 *Delgado J. M. (ed.), Prieto C. (coord.), grupo de trabajo MARRTA (2025). Modelo de errores y fallos potenciales en radioterapia con técnicas avanzadas, v2.1.* Foro de Protección Radiológica en el Medio Sanitario.

3 Real Decreto 391/2025, de 13 de mayo, por el que se establecen los criterios de calidad y seguridad de las unidades asistenciales de radioterapia. *BOE n.º 116, 14 de mayo de 2025.*

4 Rot San Juan M. J. et al. (2024). MARRTA: Risk matrix in advanced radiotherapy. *Physica Medica: European Journal of Medical Physics, 127.*

5 Software MARRTA v2.1.1. Repositorio público: https://github.com/risk-marrta/MARRTA (acceso, mayo de 2026). ■



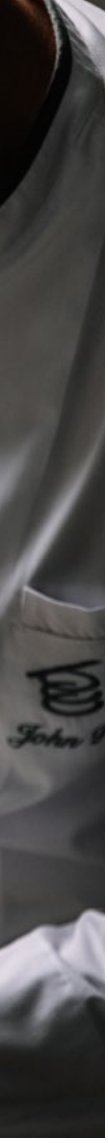
Ciencia y gastronomía

La cocina entra en el laboratorio

Durante mucho tiempo, la cocina fue considerada un saber de oficio, ajeno al ámbito académico. La ciencia de los alimentos avanzaba en la industria, pero rara vez se detenía en lo que ocurría durante una cocción. La frontera empezó a desdibujarse cuando investigadores y cocineros comenzaron a mirar el plato como un espacio de conocimiento. Desde entonces, la gastronomía se ha consolidado como un campo de investigación en el que confluyen la química de los alimentos, la percepción sensorial y los grandes retos de la innovación alimentaria.

Texto: **Javier Domingo**

Hasta 1969, existía la ciencia de los alimentos –sobre todo en la industria conservera y láctea–, pero la cocina propiamente dicha quedaba fuera del territorio académico. Se consideraba un saber artesanal, transmitido por recetarios y experiencia personal, sin estatuto propio dentro de las sociedades científicas de prestigio. El 14 de marzo de ese mismo año, en la Royal Institution of Great Britain, Nicholas Kurti rompió esa frontera tácita. Físico húngaro, veterano del Proyecto Manhattan y capaz, junto a Franz Simon, de haber alcanzado temperaturas del orden del microkelvin, eligió hablar de suflés ante uno de los auditorios más exigentes del mundo y, sobre todo, formuló lo que se convertiría casi en un lema fundacional para la disciplina: «Pienso con profunda tristeza en nuestra civilización: mientras medimos la temperatura

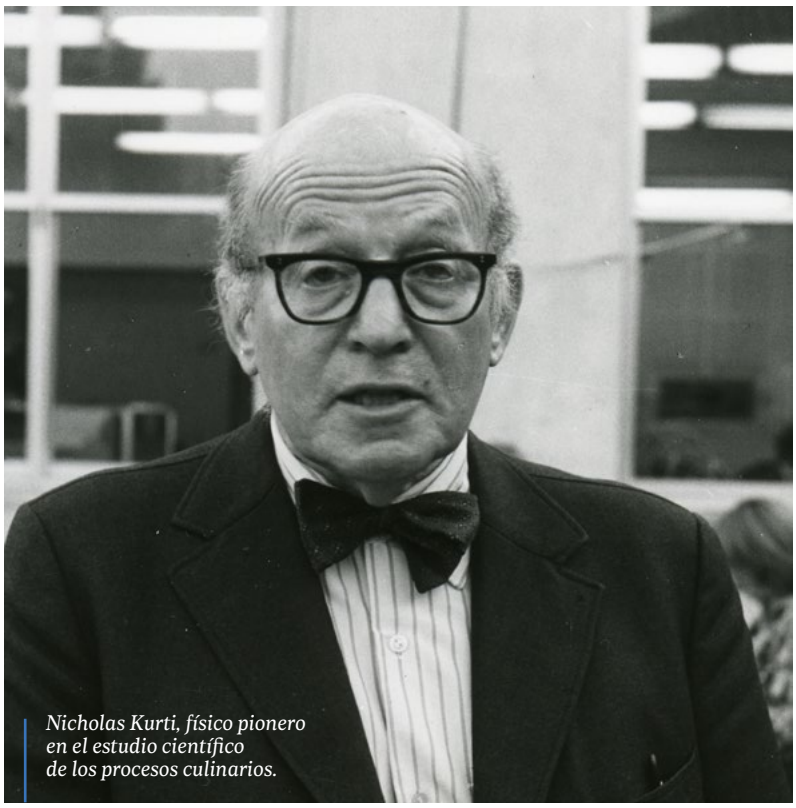




Cuando la mente come

Un plato no se percibe únicamente con la lengua. El neurocientífico Gordon M. Shepherd, de la Yale School of Medicine, acuñó el término neurogastronomía en un libro publicado por Columbia University Press para describir el conjunto de procesos cerebrales que construyen, a partir de estímulos químicos y físicos, lo que se denomina sabor; el olfato –especialmente por vía retronasal, durante la masticación– aporta la mayor parte de la información sensorial. Charles Spence, catedrático de Psicología Experimental y director del Crossmodal Research Laboratory de la Universidad de Oxford, ha dedicado más de dos décadas a demostrar que los estímulos fuera del plato modulan la percepción del sabor: el peso de los cubiertos, el color del recipiente o el timbre de la música ambiental alteran la intensidad percibida del dulce, el ácido o el amargo. La aplicación práctica es directa: comprender cómo el cerebro construye el sabor permite diseñar alimentos con menos azúcar o sal sin sacrificar el placer del comensal.

Precisamente, el análisis sensorial –percepción del dulzor, diseño multimodal de la experiencia del comensal, saciedad anticipada– es una de las grandes líneas de trabajo del Basque Culinary Center. Al trasladar estas evidencias al diseño de alimentos saludables que no reduzcan el disfrute, la directora de GOe Tech Center subraya la amplitud de las tareas desarrolladas: «analizamos cómo el contexto modifica la percepción de las propiedades de los alimentos, cómo los maridajes condicionan la experiencia e incluso pueden favorecer elecciones más saludables, o cómo las características individuales influyen en la respuesta ante un mismo producto».



Nicholas Kurti, físico pionero en el estudio científico de los procesos culinarios.

en la atmósfera de Venus, ignoramos qué temperatura hay dentro de nuestros suflés». La frase no era ingeniosa por casualidad: denunciaba que la ciencia se había desentendido de uno de los procesos cotidianos más complejos y mejor delimitados experimentalmente que existen: la cocción.

Kurti no se limitó a teorizar: utilizó un generador de microondas para construir un suflé Alaska invertido –caliente por dentro, frío por fuera– e inyectó zumo de piña en un lomo de cerdo aprovechando la acción proteolítica de la bromelaína. Demostraba así que detrás de gestos aparentemente domésticos había física, química y bioquímica perfectamente describibles.

Su impacto, sin embargo, fue tardío: hubo que esperar casi veinte años a que Kurti se asociara con el físico-químico francés Hervé This, del Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), para acuñar formalmente, en 1988, el término gastronomía molecular y física, definida en sucesivos artículos como la rama científica que estudia las transformaciones físico-químicas que ocurren durante la preparación y el consumo de los alimentos. Para Pere Castells, uno de los mayores expertos mundiales en esta materia, la denominación resultó eficaz desde el primer momento, aunque lo verdaderamente relevante estuviera en otro lugar: «rápidamente el nombre triunfó mediáticamente, aunque sea lo de menos, si nos permite avanzar en conocimiento e innovación. Al colaborar cocineros con científicos se trabaja en las periferias de ambos campos, que es donde se produce, en mayor proporción, la innovación».

A partir de 1992, Kurti y This organizaron en Erice (Sicilia) los talleres internacionales que terminarían de institucionalizar el campo, a los que se sumó el escritor científico Harold McGee, cuya obra *On Food and Cooking* (Scribner, 1984) había empezado a traducir la ciencia de los

alimentos al lenguaje de los cocineros. La puerta ya estaba abierta.

La química invisible del plato

Detrás de cada plato hay reacciones que la ciencia tardó siglos en describir. La más célebre, la reacción de Maillard, lleva el nombre del médico y químico francés Louis-Camille Maillard, que la publicó en 1912. Se trata de una reacción de pardeamiento no enzimático entre aminoácidos y azúcares reductores, que se activa típicamente entre los 140 y los 165 °C, y cuyo resultado es una red de pirazinas, furanos y melanoidinas responsables del color y los aromas de la carne dorada, el pan tostado o el café. Una revisión publicada en *MDPI Foods* (2025), revista científica internacional dedicada a la investigación en ciencia y tecnología de los alimentos, la describe como responsable de la formación de las cualidades sensoriales deseables –sabor, aroma, color y textura– en los alimentos cocinados. Su control fino, sin embargo, es esencial: a temperaturas elevadas, la misma reacción puede favorecer la formación de acrilamida, un compuesto que la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer clasifica como probable carcinógeno humano.

Otra técnica con base científica sólida es la cocción a baja temperatura al vacío (*sous-vide*), introducida en 1974 por el chef Georges Pralus en el restaurante Troisgros y estudiada ese mismo año por el científico Bruno Goussault en Estrasburgo. Douglas Baldwin la sistematizó en el *International Journal of Gastronomy and Food Science* (Elsevier, 2012) como un método que ofrece mayor control sobre el punto de cocción y la textura que los métodos tradicionales; una revisión más reciente en *MDPI Foods* (2024) confirma esos beneficios y subraya los retos pendientes en seguridad microbiológica.

La esferificación, por su parte, nació en la industria alimentaria, pero llegó a la alta cocina de la mano del equipo de Ferran Adrià en El Bulli, a partir de 2003. La técnica explota la reacción entre el alginato sódico –polisacárido de algas pardas– y los iones calcio: los Ca^{2+} desplazan al sodio y entrecruzan las cadenas del polímero, formando una membrana de gel alrededor del líquido. Su análisis sistemático llegó después en revistas indexadas, y hoy la técnica trasciende la alta gastronomía: trabajos publicados en *MDPI Microorganisms* (2025) la emplean para encapsular microalgas como la espirulina en yogures fortificados.



Esferificación: gelificación de alginato en presencia de iones calcio.

En esta revolución, marcada por la aplicación continua de nuevas técnicas culinarias como las citadas, Castells destaca el recorrido que ya ha tenido la investigación sobre texturas: «se ha trabajado mucho en investigaciones en texturas y creo que las ideas surgidas ya están ayudando a nuevas ideas en ámbitos hospitalarios, en menús especiales en residencias y en ámbitos de la industria alimentaria para adaptarse a las necesidades de la alimentación del futuro».

España, laboratorio mundial

Pocos países han contribuido tanto como España al diálogo entre ciencia y cocina en el siglo XXI. El epicentro



Pere Castells es químico e investigador, y uno de los mayores expertos internacionales en la relación entre ciencia y alta cocina. Licenciado en Ciencias Químicas por la Universidad de Barcelona, estructuró desde 2003 el Departamento Científico de elBullitaller y dirigió la investigación científico-gastronómica de la Fundación Alícia. Coautor del *Léxico científico-gastronómico*, impulsa hoy proyectos como Science and Cooking World Congress y UB-Bullipèdia.





Ferran Adrià

Experimentos culinarios en el Basque Culinary Center.

de la primera oleada fue el equipo de elBullitaller, donde Ferran y Albert Adrià trabajaron desde 2003 con un departamento científico estructurado por el propio Pere Castells. De aquella colaboración nació el *Léxico científico-gastronómico* (Planeta, 2006), traducido a cinco idiomas. Castells coordinaría más tarde, entre 2004 y 2012, el Departamento de Investigación Científico-Gastronómica de la Fundación Alícia, creada en Sant Fruitós de Bages con el respaldo de la Generalitat de Catalunya. La fundación reúne a químicos, biólogos, antropólogos, tecnólogos de los alimentos y cocineros en torno a una línea próxima a la denominada medicina culinaria: recetarios adaptados para diversas patologías y menús hospitalarios diseñados con criterios nutricionales y sensoriales.

El Basque Culinary Center (BCC), inaugurado en 2011 en Donostia-San Sebastián como Facultad de Ciencias Gastronómicas adscrita a Mondragon Unibertsitatea, dio un paso decisivo al integrar bajo un mismo proyecto una facultad universitaria, un centro tecnológico (BCC Innovation) y un laboratorio de investigación gastronómica (BCulinaryLAB).

En enero de 2020 puso en marcha, junto con los centros tecnológicos AZTI y NEIKER y con la participación de la Universidad de Copenhague, el primer doctorado del mundo en Ciencias Gastronómicas. La primera tesis se defendió en marzo de 2023: Elena Romeo Arroyo abordó la percepción del dulzor y el diseño de estrategias multimodales para reducir el consumo de azúcar, y obtuvo la calificación de sobresaliente *cum laude*. La proyección internacional quedó refrendada en 2010, cuando la Fundación Alícia y Ferran Adrià firmaron un acuerdo con la Harvard School of Engineering and Applied Sciences para impartir el curso *Science and Cooking: From Haute Cuisine to the Science of Soft Matter*, por el que han pasado, entre otros, Joan Roca, José Andrés, Carme Ruscalleda y Andoni Luis Aduriz.

El último capítulo se inauguró el 20 de octubre de 2025, cuando el BCC abrió GOe (Gastronomy Open Ecosystem), un edificio de unos 9000 m² en el barrio donostiarra de Gros, diseñado por el estudio danés Bjarke Ingels Group tras un concurso internacional en el que también participaron OMA, Snøhetta, 3XN y Toyo Ito & Associates. El nuevo espacio aloja diez laboratorios, ocho cocinas de investigación, una sala de análisis sensorial y dos áreas de *coworking*, y se plantea como ecosistema abierto para la investigación en proteínas alternativas, robótica agrícola y prevención del desperdicio alimentario.

Para Begoña Rodríguez, directora de GOe Tech Center, el propósito de esta institución «consiste en generar conocimiento a través de la investigación, pero, sobre todo, en transferirlo. Lo hacemos mediante





GOe, el ecosistema de investigación gastronómica del Basque Culinary Center en Donostia-San Sebastián.

proyectos de innovación desarrollados junto a empresas que nos plantean desafíos concretos relacionados con sus mercados, sus consumidores o sus procesos. A partir de ahí, creamos soluciones de manera colectiva. Esa conexión entre formación, investigación, innovación e industria es precisamente una de las principales fortalezas del modelo».

Tecnología nuclear al servicio de la mesa

La relación entre ciencia y gastronomía no se queda en el fogón. La irradiación de alimentos es, en este sentido, una tecnología con un respaldo institucional notable. Avalada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), la Organización Mundial de la Salud y la FAO, se regula internacionalmente por la Norma General del Codex para Alimentos Irradiados (CXS 106-1983, revisada en 2003). El proceso consiste en exponer los alimentos –ya envasados– a dosis controladas de radiación ionizante procedente de fuentes de cobalto-60, haces de electrones acelerados o rayos X; la radiación ioniza el material genético de bacterias, parásitos e insectos sin que los alimentos se vuelvan radiactivos. Según el OIEA, «las autoridades de al menos 69 países han aprobado la irradiación de más de sesenta tipos de alimentos» y «cada año se irradian en todo el mundo alrededor de un millón de toneladas».

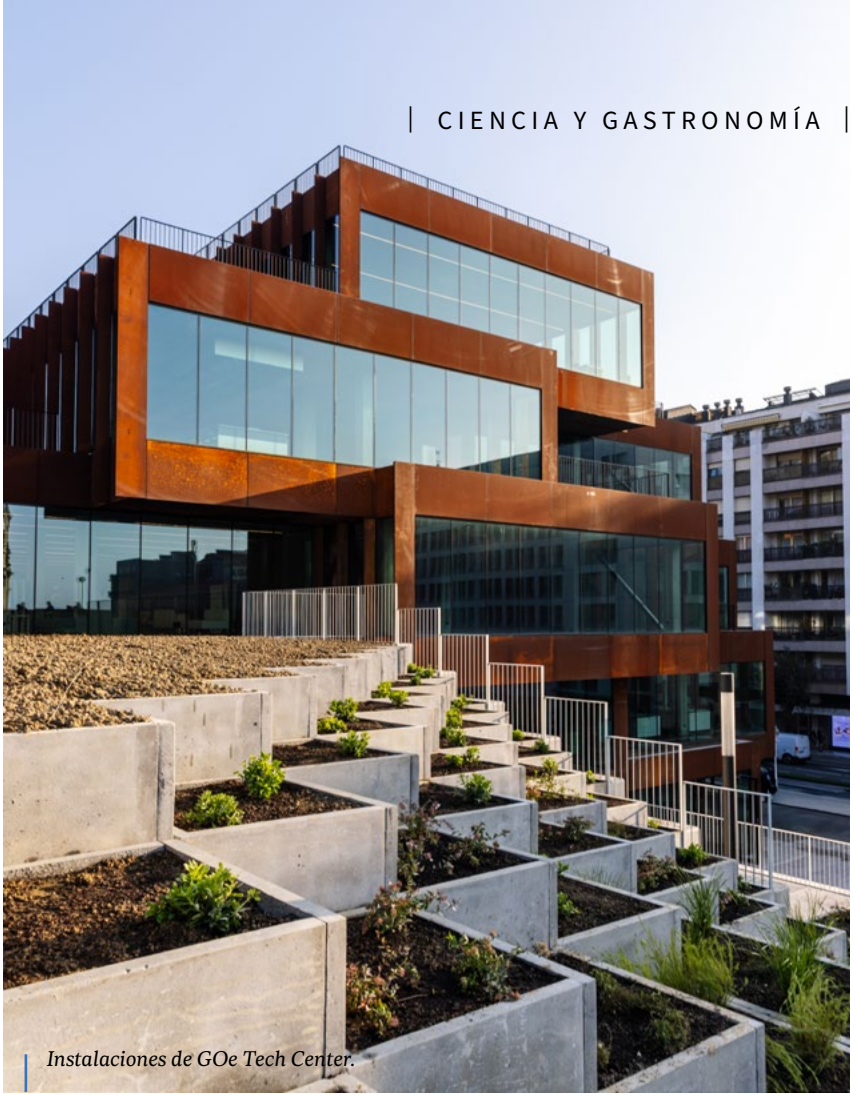
La técnica permite alargar la vida útil de frutas como las fresas, inhibir la brotación de bulbos como la patata o el ajo, eliminar patógenos como *Salmonella* o *Listeria* en productos cárnicos y reducir el desperdicio alimentario. La revista *Alfa* dedicó a esta tecnología un artículo monográfico en su número 43, «Alimentos irradiados: la protección desconocida», donde se documentaba que su implantación se ha visto históricamente frenada por la desconfianza social hacia la radiación, a pesar de contar con más de medio siglo de evidencia científica acumulada.

Alimentar el futuro

Si la primera generación de investigación gastronómica miró al laboratorio para reinventar texturas y aromas, la segunda se enfrenta a retos de escala planetaria. La ONU estima que en 2050 la población mundial alcanzará los 9700 millones de personas, lo que exigirá un aumento significativo de la producción de alimentos al tiempo que se reduce el impacto ambiental del sistema agroalimentario.

En este contexto, las proteínas alternativas se han convertido en una prioridad reconocida internacionalmente: la FAO avala el consumo de insectos como fuente proteica de alta calidad y baja huella ambiental, y la Agencia Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) ha emitido evaluaciones favorables para varias especies destinadas al consumo hu-





Instalaciones de GOe Tech Center.



Begoña Rodríguez cuenta con una amplia trayectoria en gestión empresarial, innovación y diseño de modelos de negocio, con experiencia en estrategia, finanzas, comunicación, recursos humanos y operaciones. Ha trabajado como consultora y colaborado con numerosas *startups* en programas de aceleración. Actualmente, dirige el GOe Tech Center, centro tecnológico del Basque Culinary Center, desde donde asesora proyectos internacionales que sitúan la gastronomía y la alimentación como motores de transformación territorial.

mano en la Unión Europea, comenzando por la larva *Tenebrio molitor*.

Las microalgas como la espirulina presentan una alta densidad nutricional y pueden cultivarse sin competir por suelos agrícolas. En España, AZTI –centro científico y tecnológico especializado en el medio marino y la alimentación–, Eurecat –centro tecnológico de Cataluña orientado a la innovación empresarial–, CNTA –Centro Nacional de Tecnología y Seguridad Alimentaria–, NEIKER –centro tecnológico vasco especializado en soluciones para los sectores agroganadero y forestal– y BCC Innovation participan en consorcios europeos sobre proteínas alternativas, fermentación de precisión y carne cultivada; el Plan Estratégico 2025-2028 del BCC contempla una media de ochenta proyectos anuales de investigación e innovación con la sostenibilidad como eje vertebrador.

Con la vista puesta en el futuro, Castells prevé una incorporación progresiva de nuevos ingredientes: «La irrupción de los insectos y las algas en la alimentación global creo que poco a poco van a ser una realidad, salvando barreras culturales». Y aún va más allá: «en diez o quince años, escogeremos alimentos adaptados a nuestras necesidades. No creo que los alimentos sintéticos sean una opción, es complicado y caro producirlos».

La relación entre ciencia y gastronomía ha pasado de la curiosidad experimental a la producción sistemática de conocimiento. La ciencia no ha entrado en la cocina para desplazar la tradición ni para convertir los fogones en laboratorios, sino para entender qué ocurre cuando el calor, la presión y el tiempo actúan sobre los alimentos; mejorar la seguridad y la salud de quienes los consumen, y responder, en última instancia, preguntas tan antiguas como la humanidad: por qué la carne dorada huele así, por qué el pan cruje y por qué un vino joven envejece. ■

LICENCIAS de personal de operación EN CENTRALES NUCLEARES

Texto: Javier Bacelo Ruano, jefe de Proyecto de la CN Trillo y secretario de los Tribunales de Licencia de Centrales Nucleares y de la fábrica de Juzbado.

En las centrales nucleares en operación, el personal que dirige la actividad y el que maneja desde la sala de control principal los dispositivos y la protección de la instalación debe disponer, respectivamente, de una licencia vigente de supervisor u operador. También requiere licencia el personal que supervisa localmente las operaciones de movimiento de combustible nuclear. Estas licencias son concedidas y renovadas por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).



1. SOLICITUD. DOCUMENTACIÓN Y REQUISITOS

La cualificación se acredita con la documentación que acompaña a la solicitud. El área de Organización, Factores Humanos y Formación (OFHF), junto con el Tribunal de Licencias de la central, la evalúa y revisa que se ajuste a la normativa aplicable.

Titulación académica: se requiere una titulación universitaria de grado.

Formación específica en la central: al inicio de la formación se remite el programa inicial, cuyo contenido revisa el Tribunal de Licencias. El área OFHF comprueba que se ajusta a la normativa y que su duración concuerda con las mejores prácticas de la industria.

Entrenamiento: por su importancia, se remiten también al CSN los programas detallados de entrenamiento en el simulador de sala de control y en el puesto de trabajo.

Experiencia: para obtener una licencia de supervisor se requiere experiencia previa con licencia de operador.

Aptitud médica: debe aportarse un certificado actualizado que acredite los requisitos físicos y psíquicos adecuados para el puesto.

Vinculación con la central: el aspirante debe pertenecer a la plantilla de la instalación.

2. VERIFICACIÓN DE LA CUALIFICACIÓN

Para conceder una licencia, el CSN verifica dos aspectos: que el aspirante posea la cualificación exigida –titulación académica, experiencia y formación– y que cuente con la competencia necesaria –conocimientos, capacidades y habilidades– para desempeñar de forma satisfactoria el puesto solicitado.

3. EXAMEN DE COMPETENCIA. TRES PRUEBAS DE LICENCIA

La competencia se verifica mediante un examen elaborado y evaluado por el Tribunal de Licencias de la central. Consta de tres partes, que deben superarse con una calificación superior al 80 %.

Prueba escrita: incluye cinco áreas temáticas (fundamentos científicos y tecnológicos; sistemas y disposición de la central; funcionamiento y operación; normativa y protección radiológica, y movimiento de combustible).

Simulador de sala de control: el aspirante debe reconocer y diagnosticar eventos a partir de la instrumentación, verificar automatismos, operar controles y seguir procedimientos en operaciones normales, anormales y de emergencia, actuando como parte de un equipo coordinado.

Ejercicio práctico en la central: incluye un escenario para comprobar el reconocimiento de condiciones, procedimientos y Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF), así como la interpretación de diagramas y planos; además, incorpora un recorrido por la instalación para verificar el conocimiento físico de la central.

4. EMISIÓN DE LICENCIA

Una vez verificadas la cualificación y la competencia, el CSN emite la licencia de operador o supervisor. La licencia tiene una vigencia de seis años y es exclusiva para una central.

5. RENOVACIÓN PERIÓDICA

Para renovarla, además de presentar la solicitud en plazo, el titular debe demostrar que mantiene la cualificación y la competencia verificadas en la concesión inicial. Durante el periodo de vigencia debe acreditar que ha ejercido de forma efectiva el puesto para el que la licencia le capacita, ha cumplido las condiciones de permanencia activa, ha recibido el programa de formación continua establecido por la central, ha superado las pruebas escritas y de simulador previstas y conserva la aptitud médica, física y psicológica.

Aplicación de la ICRP 137, parte 3, a la evaluación de dosis por radón en lugares de trabajo con condiciones extremas (RADosis)

Arturo Vargas, Victoria Moreno, Claudia Grossi y Lluis Font / Universitat Politècnica de Catalunya

El Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes, transpone parcialmente la Directiva 2013/59/Euratom del Consejo en lo relativo a la protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.

El artículo 19.2 establece que, cuando en un lugar de trabajo haya zonas en las que la concentración de radón en aire supere el nivel de referencia de 300 Bq/m^3, pese a las medidas adoptadas según el principio de optimización, el titular de la actividad laboral deberá estimar las dosis efectivas anuales que puedan recibir los trabajadores con acceso a esas zonas. Si la dosis supera los 6 mSv/año, deberá establecer las medidas de protección radiológica aplicables.

Existen diferentes equipos para realizar de manera sencilla una estimación anual de la concentración de radón. Sin embargo, para estimar con precisión la dosis efectiva es necesario conocer el factor de equilibrio (F), de las fracciones (f), de las distintas modas de tamaño de los aerosoles y sus respectivos coeficientes de dosis. Dado que realizar todas estas mediciones resulta poco práctico, la Publicación 137 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés) propone una metodología para calcular la dosis por inhalación de los descendientes del radón, junto con un sistema simplificado que evite una elevada complejidad metrológica.

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), en su resolución de 8 de abril de 2024, establece que, para la exposición al radón (Rn-222), se deberán utilizar por defecto los siguientes coeficientes de dosis:

- 3 mSv mJ h m^{-3}, en la mayor parte de los ambientes interiores (lugares de trabajo y viviendas). El coeficiente de dosis correspondiente expresado en términos de concentración de radón en el aire es de 6,7 x 10^{-6} mSv h^{-1} Bq^{-1} m^3, suponiendo un factor de equilibrio F = 0,4.
- 6 mSv h^{-1} mJ^{-1} m^3, en cuevas turísticas y lugares de trabajo donde los trabajadores deban realizar una actividad física intensa.

Cuando la distribución de aerosoles en el aire difiera de forma significativa de la prevista en los escenarios habituales, el CSN podrá autorizar coeficientes de dosis específicos para ese lugar de trabajo. Estos coeficientes se aplicarían a la exposición interna debida al radón (Rn-222) y a sus descendientes de vida corta, y deberían estar justificados conforme a la metodología de la Publicación 137, parte 3, de la ICRP.

En este contexto, el CSN financió el proyecto RADosis, durante el periodo 2021-2024, con el objetivo de evaluar la aplicabilidad de las recomendaciones de la ICRP, estimar las dosis por radón en entornos laborales complejos y analizar las limitaciones metrológicas asociadas a la determinación experimental de los parámetros dosimétricos relevantes. Para ello, se revisaron las recomendaciones de la ICRP 137 y se actualizó la instrumentación de la cámara de radón del Instituto de Técnicas Energéticas (INTE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Esta actualización permitió medir la progenie de vida corta del radón y los aerosoles ambientales. También se realizaron campañas de medida en entornos de especial interés, como cuevas, minas y balnearios, tal como se observa en la figura 1.

El análisis de la Publicación 137 de la ICRP muestra que no siempre es sencillo establecer parámetros comunes que repre-

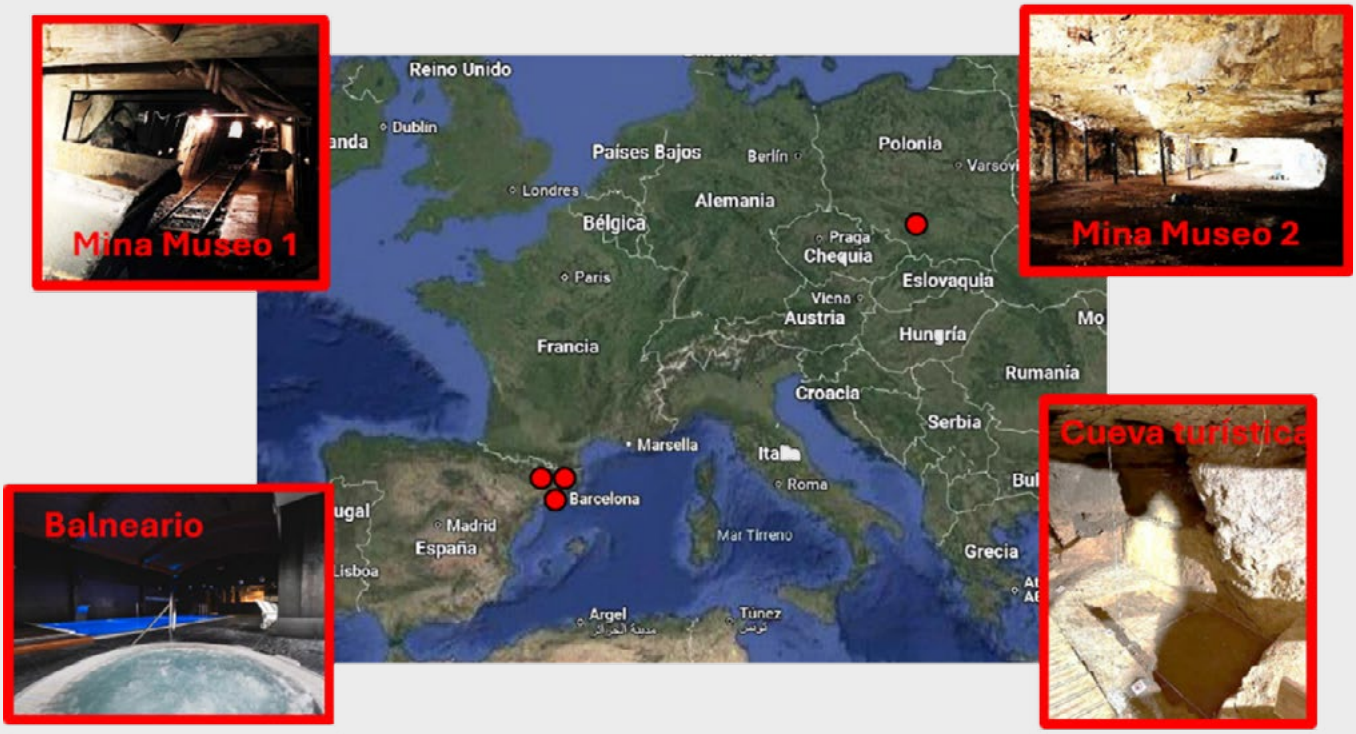


Figura 1. *Lugares de trabajo donde se han llevado a cabo medidas de las concentraciones de radón y de sus descendientes en el marco del proyecto RADosis.*

senten los distintos escenarios considerados, como lugares de trabajo convencionales, minas o cuevas turísticas. Esta dificultad se debe, sobre todo, a la elevada variabilidad del factor de equilibrio (F) y de las fracciones de los aerosoles radiactivos: la fracción libre (f_p) y las fracciones adheridas en los modos de nucleación (f_n) y acumulación (f_a).

Esta observación se ha visto respaldada por el estudio paramétrico realizado con un modelo de cajas y por las medidas obtenidas durante el proyecto. En algunos casos, estos resultados no coinciden con los valores representativos de F y f_p indicados en la ICRP 137, lo que puede dar lugar a coeficientes de dosis significativamente más elevados.

Además de medir la concentración de la progenie de radón, para estimar correctamente la dosis es necesario conocer f_p y la posible existencia de f_n. Sin embargo, solo existe en el mercado europeo un equipo capaz de llevar a cabo estas mediciones y no se dispone de trazabilidad para ellas. En el proyecto se ha encontrado una buena correlación entre la fracción libre, f_p, y la concentración de partículas. Destaca la elevada fracción libre presente en lugares con una concentración de partículas baja (<2000 pt cm^{-3}), que puede llegar a duplicar el valor del coeficiente de dosis propuesto en ICRP 137 y, en consecuencia, en la resolución del CSN. Por tanto, la concentración de partículas podría servir como indicador experimental para aplicar el coeficiente de dosis. Actualmente, hay equipos portátiles en el mercado que pueden realizar estas mediciones en continuo en lugares de trabajo en condiciones extremas con buena precisión.

Mientras no se disponga de un sistema metrológico adecuado, algunas autoridades están introduciendo un paso previo antes de calcular la dosis mediante coeficientes de dosis. Este paso consiste en establecer un nivel de referencia para la exposición al radón. Así, una vez confirmado que la concentración promedio anual de Rn-222 es superior a 300 Bq/m^3, se evalúa la exposición al radón en kBq h m^{-3} y, si se supera el nivel de referencia, sería necesario evaluar la dosis.

La conclusión final es que resulta necesario desarrollar un sistema metrológico adecuado para estimar las dosis. Mientras no exista, debe tenerse en cuenta que el uso de los dos coeficientes de dosis recomendados por la ICRP 137, definidos según escenarios preestablecidos y la actividad física, puede dar lugar a errores significativos en el cálculo de la dosis. ■

CEIDEN

Coordinación estratégica para la I+D de fisión nuclear en España



Texto: **Sandra Berciano** | Fotos: **CEIDEN**

Creada en 2007, la Plataforma Tecnológica de Energía Nuclear de Fisión (CEIDEN) coordina esfuerzos de I+D+i entre empresas, universidades, centros tecnológicos, organismos públicos y asociaciones vinculadas al sector nuclear español. Su papel en este ámbito va más allá de promover proyectos. También vertebra capacidades, favorece la formación de nuevos profesionales y refuerza la presencia española en iniciativas internacionales.

CEIDEN es una estructura de coordinación constituida en 2007, con antecedentes en el Comité Estratégico de I+D Nuclear creado en 1999 por el entonces Ministerio de Industria y Energía. Su propósito consiste en articular las necesidades y los esfuerzos de I+D+i del sector nuclear español de fisión, repartidos entre empresas, universidades, centros tecnológicos, organismos públicos y asociaciones profesionales. La presidencia, que ocupa de manera nata el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) desde 2009, recae actualmente en Javier Dies, consejero del CSN; la Secretaría General está a cargo de Pablo T. León, director de Tecnología y Desarrollo de Endesa.

La plataforma se organiza en torno a un Consejo Gestor, que se reúne periódicamente para hacer balance de los programas y proyectos en curso, y a una agenda estratégica articulada en cinco áreas: programa técnico, actividades transversales, gestión interna, relaciones institucionales y de cooperación, y comunicación. CEIDEN forma parte del



Boceto de la central nuclear Vandellós II.

La energía nuclear de fisión es una de las principales fuentes de generación eléctrica en España. De acuerdo con el informe del sistema eléctrico español de Red Eléctrica, en 2024 aportó el 19,97 % del total de la combinación eléctrica, con una producción de 52 391 GWh sobre un total de 262 247 GWh. Además, en 2025, la energía nuclear contribuyó al 25,58 % del total de la electricidad generada en España sin emisiones.

Comité de Coordinación de Plataformas Tecnológicas del ámbito de la Energía (CCPTE) y ha recibido financiación pública dentro del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación.

El valor de esta arquitectura radica en su capacidad para sostener una red técnica continua, apta para identificar prioridades, intercambiar información y propiciar trabajos conjuntos en un sector donde los ciclos de desarrollo son largos, las exigencias de seguridad elevadas y la experiencia acumulada resulta difícilmente sustituible. Mantener una base tecnológica sólida exige conservar conocimiento experto, formar especialistas y participar en los foros donde se definen las líneas estratégicas futuras.



El presidente de CEIDEN en una visita a la central nuclear Almaraz en Cáceres.

Mantener capacidades

La tecnología nuclear de fisión requiere una base de conocimiento amplia y sostenida a largo plazo. La operación de las instalaciones actuales, el análisis de seguridad, la gestión del combustible, el comportamiento de los materiales y el desarrollo de nuevos diseños dependen de competencias que se construyen durante años, apoyadas en experiencia práctica, datos acumulados, métodos validados y profesionales especializados. La pérdida de esas capacidades comprometería tanto la innovación como la supervisión, el mantenimiento y la toma de decisiones informadas.

En este contexto, la I+D+i cumple una doble función. Permite progresar en el desarrollo de materiales, combustibles, simulación, códigos de cálculo, nuevos conceptos de reactor y tecnologías asociadas al ciclo del combustible. Al mismo tiempo, sostiene la operación segura, fiable y eficiente de las instalaciones existentes: detrás de cada evaluación de componentes, cada revisión de seguridad o cada mejora

en los métodos de análisis hay una base técnica que debe actualizarse y transmitirse.

CEIDEN se sitúa en ese punto de encuentro entre continuidad y desarrollo. Su misión consiste en coordinar las necesidades y los esfuerzos de I+D+i en energía nuclear de fisión, promover proyectos colaborativos y facilitar una posición nacional cohesionada ante compromisos nacionales e internacionales. La plataforma orienta su actividad hacia la operación de las instalaciones actuales, el ciclo del combustible nuclear, la gestión del conocimiento y el seguimiento de los desarrollos tecnológicos emergentes, con el objetivo de garantizar que el país conserve recursos técnicos para analizar, operar, evaluar y participar con solvencia en los debates del sector.

Red amplia y especializada

La composición de CEIDEN refleja la necesidad de reunir competencias diversas. Cuenta con más de cien miembros agrupados en once subsectores y más de veinte entidades colaboradoras fuera de España. Entre ellos, figuran empresas eléctricas como Endesa, Iberdrola Generación y Naturgy; compañías de ingeniería y construcción como Aquageo, Empresarios Agrupados, Sener Ingeniería y Sistemas, Westinghouse Electric Spain o Técnicas Reunidas; entidades del ciclo del combustible como Enresa y Enusa Industrias Avanzadas (originalmente la Empresa Nacional del Uranio, S. A.); universidades como la Politécnica de Madrid (UPM), la Politécnica de Cataluña (UPC), la Politécnica de Valencia (UPV), la Universidad de Cantabria o la Universidad de Burgos; centros e instituciones de I+D como el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT); el Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI); el Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa (CEIT), el Centro Tecnológico de la Asociación de Investigación Metalúrgica del Noroeste (AIMEN); el Instituto Madrileño de Estudios Avanzados (IMDEA) o Tecnalia; y organismos y asociaciones como el CSN, Foro Nuclear, la Sociedad Nuclear Española o la Sociedad Española de Protección Radiológica.

Esta diversidad aporta un valor que va más allá de lo representativo. En tecnología nuclear, los problemas técnicos requieren habitualmente enfoques multidisciplinares.

La evaluación de la integridad estructural de un componente sometido a envejecimiento, por ejemplo, combina conocimientos de materiales, química, irradiación, inspección y operación. El análisis de seguridad requiere modelos físicos, datos experimentales, códigos validados y criterios regulatorios. El desarrollo de combustibles avanzados implica fabricación, física de reactor, comportamiento en condiciones de irradiación y evaluación de escenarios accidentales.



El presidente de CEIDEN durante una charla técnica.



De las prioridades a los grupos de trabajo

El núcleo operativo de CEIDEN se articula a través de programas y grupos de trabajo temáticos, cada uno con funciones definidas y objetivos específicos. Una vez alcanzados, el grupo se disuelve, lo que permite adaptar la actividad de la plataforma a necesidades técnicas precisas y favorece un enfoque flexible. Algunos de los programas más destacados son:

- **CAMP-España**
  Dedicado a la asimilación, mejora y aplicación de códigos termohidráulicos a las centrales nucleares españolas, en colaboración con el CSN y la Agencia de Energía Nuclear de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Es uno de los programas más veteranos de la plataforma, con orígenes a mediados de los años ochenta.

- **ATF-España**
  Declarado en 2017 una de las tres «iniciativas tecnológicas prioritarias» del sector y orientado al desarrollo de combustibles de tecnología avanzada. Participan, entre otras entidades, ENUSA, Iberdrola, CIEMAT, la UPM, la UPC y NFQ Advisory Services.

- **SIREN**
  Creado en 2016, mantiene un catálogo abierto de los códigos de cálculo utilizados o desarrollados por el sector nuclear español. La versión más reciente recoge 118 códigos y bases de datos, distribuidos en una veintena de áreas, aportados por diecinueve instituciones, entre ellas CIEMAT, CSN, ENUSA, Iberdrola, IDOM, Naturgy, Tecnatom, la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), la UPC, la UPM y la UPV.

- **Grupo de Materiales (GTDM)**
  Constituido en 2014 y coordinado desde el CIEMAT, dedicado al estudio de la degradación de materiales en condiciones de operación y a la extensión de la vida útil de componentes.

- **Grupo SMR**
  Reúne a 32 empresas e instituciones para seguir el desarrollo internacional de los reactores modulares pequeños y priorizar las áreas de trabajo con mayor potencial para el sector español.

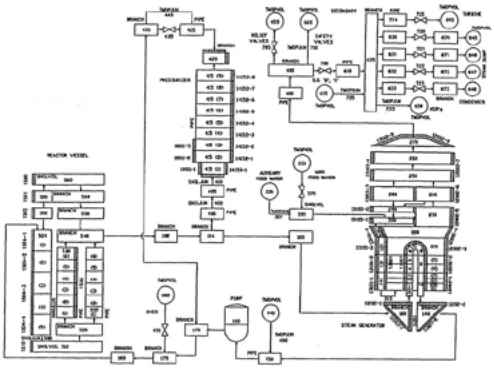
- **KEEP+**
  Eje de la actividad de la plataforma en materia de educación, capacitación técnica y gestión del conocimiento.

- **Grupo PYMES**
  Constituido en 2015, coordina las iniciativas de las pequeñas y medianas empresas miembros de CEIDEN y favorece su participación en proyectos de I+D+i de ámbito nacional e internacional.

- **Grupo Sociotécnico**
  Coordinado desde el CIEMAT y la Universidad Pública de Navarra, aborda el diálogo entre las ciencias sociales y el sector nuclear.



Boceto de un conjunto combustible nuclear



A estos se suman iniciativas específicas, como el Grupo de usuarios de laboratorios de patrones neutrónicos, activo desde 2012 y coordinado por el CIEMAT, el Grupo de almacenamiento y transporte de combustible gastado, el seguimiento del proyecto internacional Jules Horowitz Reactor y el programa sobre hormigones y aprovechamiento de materiales de la central José Cabrera (Zorita).



Central nuclear Vandellós II / ANAV.



La Plataforma Tecnológica de Energía Nuclear de Fisión se ha consolidado como una red de cooperación entre industria, academia e instituciones en torno a la investigación nuclear de fisión



Javier Dies

Presidente de CEIDEN y consejero del Consejo de Seguridad Nuclear. Catedrático de Ingeniería Nuclear en la Universidad Politécnica de Cataluña, ha desarrollado su trayectoria en el ámbito de la seguridad nuclear, la formación especializada y la cooperación internacional.

Con más de treinta años de experiencia como profesor de Ingeniería Nuclear, es representante de España en la Comisión de Normas de Seguridad (CSS) del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) desde 2016.

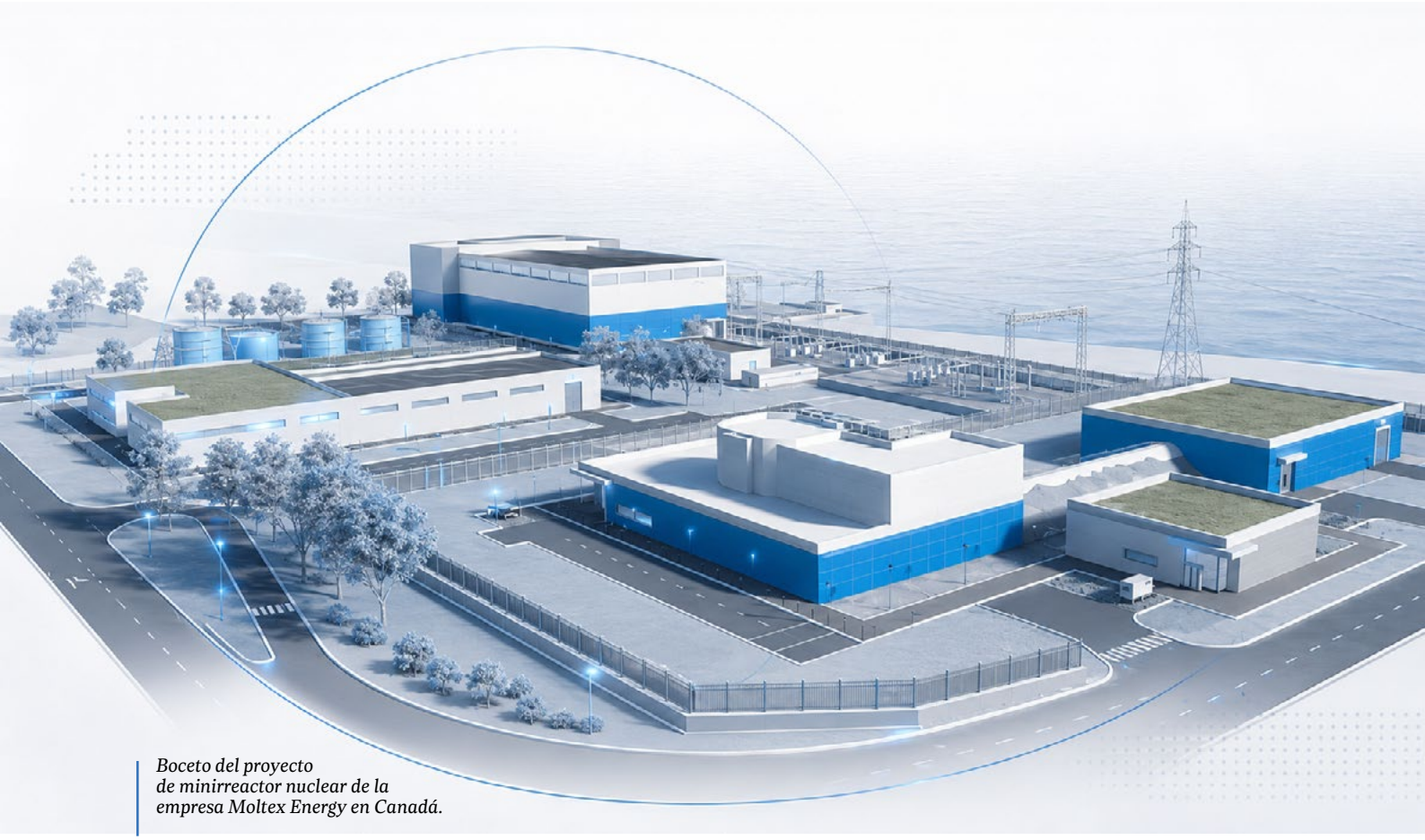
Al frente de la plataforma CEIDEN desde 2019, orienta su actividad a la coordinación de capacidades en I+D+i en fisión nuclear, impulsando la conexión entre universidad, industria, centros tecnológicos y organismos públicos, y reforzando la participación española en iniciativas europeas e internacionales.

CEIDEN permite concentrar una gran cadena de conocimiento. La investigación académica aporta base científica y formación; la industria traslada parte de ese saber a la ingeniería, la operación y los servicios; los organismos públicos introducen una visión estratégica e institucional; y el regulador mantiene una conexión imprescindible con la seguridad nuclear y la protección radiológica.

La plataforma facilita que esas piezas trabajen con un horizonte común, reduce el riesgo de duplicidades y mejora la participación española en programas europeos e internacionales. En ese sentido, su función es estratégica y su utilidad se mide en proyectos, grupos de trabajo, intercambio técnico, formación de especialistas y proyección exterior.

Conexión con la I+D nuclear europea

CEIDEN mantiene la condición de observador permanente en la SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform), la plataforma europea de referencia en energía nuclear de fisión, estructurada en tres pilares: NUGENIA, centrado en la operación segura y eficiente de las plantas de generación II y III; European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII),



Boceto del proyecto de minirreactor nuclear de la empresa Moltex Energy en Canadá.

dedicado a las tecnologías de generación IV con ciclos de combustible cerrados; y European Nuclear Cogeneration Industrial Initiative (NC2I), orientado a la cogeneración nuclear de calor, electricidad e hidrógeno. A través de esta vía, la plataforma canaliza buena parte de la participación española en convocatorias de la Comunidad Europea de la Energía Atómica (Euratom) y de Horizonte Europa, y articula la presencia de los grupos españoles en proyectos colaborativos internacionales.

Formación y relevo profesional

La formación constituye uno de los ejes centrales de la actividad de CEIDEN. A través del grupo KEEP+, aborda la educación, la capacitación técnica y la gestión del conocimiento como elementos necesarios para sostener las competencias del sector. Esta misión se plantea como una estrategia estructural orientada a garantizar la continuidad del conocimiento experto en un entorno técnico exigente y con horizontes temporales largos.

Javier Dies, presidente de CEIDEN y consejero del CSN, considera esencial reforzar la formación, especialmente en el ámbito universitario, y avanzar hacia un planteamiento más integrado mediante un plan nacional de capacitación y transferencia de conocimiento. En esta línea, participa en iniciativas internacionales, como el Summer Institute de la World Nuclear University, en el que participaron 70 especialistas de treinta y cinco países, lo que refleja la conexión entre la formación nacional y las redes globales del sector.

Dies sitúa el relevo generacional como uno de los grandes retos del sector nuclear español. En el curso 2025-2026, los principales programas especializados han registrado cifras reducidas: 21 estudiantes en el Máster en Seguridad Nuclear y Protección Radiológica de la Universidad Politécnica de Valencia, 33 en el Máster en Ciencia y Tecnología Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid y veintidós en el Master in Nuclear Engineering de la Universidad Politécnica de Cataluña. La plataforma aspira a que cada máster alcance unos 100 alumnos anuales e incorporar también la formación profesional para cubrir una demanda estimada de trescientos profesionales al año.

> *Javier Dies sitúa el relevo generacional como uno de los grandes retos del sector nuclear español*



Barbara McClintock y el genoma en movimiento



Un grano de maíz difícilmente se asocia, a primera vista, con uno de los grandes giros conceptuales de la biología moderna. Sin embargo, fue en el estudio de la organización cromosómica del maíz donde Barbara McClintock identificó un fenómeno que transformó de manera profunda la comprensión del genoma. Frente a la idea dominante de genes ubicados en posiciones fijas, mostró que determinadas secuencias podían desplazarse, alterar la expresión génica y contribuir a la reorganización de la información hereditaria. La interpretación derivada de estos hallazgos, recibida con escepticismo a comienzos de la década de 1950, anticipó principios hoy fundamentales en genética, biología molecular y, en determinados contextos, radiobiología.

Texto: **Anna Burgstaller**

Nacida en Hartford (Connecticut) en 1902, desarrolló una trayectoria científica extraordinaria en un contexto en el que la participación de las mujeres en la investigación estaba fuertemente limitada. Desde etapas tempranas mostró una marcada inclinación por la observación directa, con especial atención al detalle y a la variabilidad de los sistemas biológicos. Esa forma de trabajo, basada en la acumulación rigurosa de evidencia experimental, se mantuvo como rasgo distintivo de toda su carrera.

En 1919 ingresó en la Universidad de Cornell para estudiar botánica. Allí obtuvo el grado en 1923, el máster en 1925 y el doctorado



Barbara McClintock descubrió que determinadas secuencias genéticas del maíz pueden cambiar de posición en los cromosomas.



Con este microscopio, McClintock examinó las borrosas imágenes de los cromosomas.

en 1927. Aunque las mujeres no podían especializarse formalmente en genética, logró integrarse en los grupos en los que el maíz empezaba a consolidarse como organismo modelo. En ese marco centró su trabajo en la relación entre rasgos heredables y estructuras cromosómicas observables, eje fundamental del campo emergente de la citogenética.

Durante las décadas de 1920 y 1930, McClintock contribuyó decisivamente a establecer la correlación entre posiciones génicas y patrones de recombinación. En 1931, junto con Harriet Creighton, aportó la primera demostración experimental de que la recombinación genética se corresponde con el entrecruzamiento físico de los cromosomas durante la meiosis. La integración de genética clásica y análisis citológico se consolidó así como un estándar metodológico que, con las adaptaciones necesarias, sigue siendo relevante hoy.

El genoma no es estático

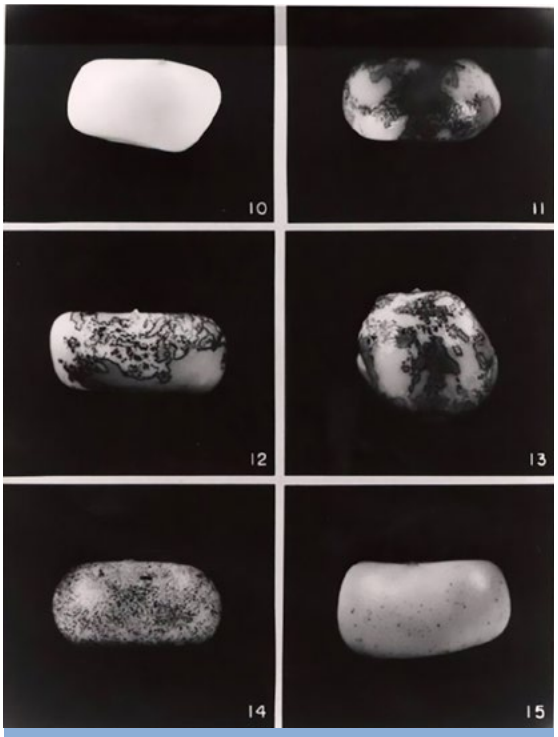
Barbara McClintock demostró que el genoma no es una estructura fija, sino un sistema dinámico capaz de reorganizarse. Los elementos transponibles –secuencias de ADN que pueden cambiar de posición– no solo alteran genes individuales, sino que participan en la regulación genética y en la respuesta celular frente a distintas condiciones.

Este enfoque transformó la visión clásica de la herencia: el ADN dejó de entenderse como un archivo inmutable para concebirse como un sistema flexible, en constante interacción con el entorno celular.

En ese periodo, la genética atravesaba una fase de transición. Los modelos mendelianos habían sido aceptados, pero la base material de la herencia aún requería confirmación experimental. El maíz ofrecía ventajas singulares: cromosomas grandes, fácilmente observables, y la posibilidad de relacionar cambios estructurales con rasgos visibles. Estas condiciones impulsaron el desarrollo de la citogenética como disciplina clave para comprender la base física del genoma.

El estilo de investigación de McClintock se caracterizó por una atención sostenida a las desviaciones respecto de los resultados esperados. Las anomalías no se descartaban, sino que se analizaban como posibles indicios de mecanismos desconocidos. Esa atención a lo inesperado permitió identificar fenómenos que no encajaban en los modelos dominantes y abrió nuevas vías de interpretación.





La relación de Ac/Ds en el control de los elementos y mosaico de color del maíz. La semilla en 10 es incolora, donde Ac no está presente y Ds inhibe la síntesis de los pigmentos coloreados denominados antocianinas. Del 11 al 13, las semillas poseen una copia de Ac. Ds puede inhibir parcialmente la producción de los pigmentos, lo que provoca la aparición de una pauta en mosaico. En el núcleo del panel 14 hay dos elementos Ac y en 15, tres.



Imagen microscópica de la estructura cromosómica de las glándulas salivales de Sciara analis, *tomada por Barbara McClintock en 1934.*

Limitaciones institucionales y cambio de entorno

El desarrollo profesional de McClintock estuvo condicionado por limitaciones estructurales. Tras su etapa en Cornell, la incorporación a la Universidad de Missouri puso de manifiesto dificultades de promoción y un reconocimiento desigual. En 1941, decidió abandonar ese entorno y trasladarse a la Carnegie Institution de Cold Spring Harbor, donde encontró condiciones más favorables para desarrollar investigaciones a largo plazo. Poco después, su prestigio científico quedó refrendado por hitos institucionales poco habituales para una mujer de su tiempo: en 1944 fue elegida miembro de la National Academy of Sciences y en 1945 se convirtió en la primera mujer presidenta de la Genetics Society of America.

En Cold Spring Harbor consolidó una línea de trabajo centrada en la dinámica cromosómica. Uno de sus resultados más relevantes fue la descripción del ciclo de ruptura-fusión-puente. El proceso se inicia con una rotura cromosómica que genera extremos inestables; durante la división celular, esos extremos pueden fusionarse de forma anómala y formar puentes entre cromátidas. En divisiones posteriores, los puentes vuelven a romperse, dando lugar a nuevas configuraciones cromosómicas.

El fenómeno descrito genera una cascada de reorganizaciones estructurales que puede repetirse a lo largo de múltiples ciclos celulares. De este modo, puso de manifiesto que la estabilidad del genoma no constituye una propiedad fija, sino el resultado de un equilibrio dinámico entre daño y reparación. En la biología contemporánea, estos mecanismos resultan fundamentales para comprender procesos como la inestabilidad cromosómica en el cáncer y la respuesta celular frente a agentes genotóxicos.

El enigma del color

El estudio del color de los granos de maíz constituyó un punto de inflexión en su investigación. Las variaciones fenotípicas permitieron identificar patrones clonales que no podían explicarse mediante mutaciones estables. Los mosaicos de color indicaban que determinados



McClintock fue la segunda mujer en obtener el Nobel en solitario tras Marie Curie.

cambios se producían en células individuales y se heredaban en las células descendientes.

A partir del análisis de estos patrones, McClintock identificó dos elementos genéticos: Activator (Ac) y Dissociator (Ds). Ds inducía alteraciones en la expresión génica y provocaba roturas cromosómicas, pero solo en presencia de Ac. En 1948 concluyó que ambos podían cambiar de posición dentro del genoma, una inferencia obtenida a partir del seguimiento de estos fenómenos a lo largo de varias generaciones.

La inserción de Ds en regiones específicas interrumpía genes implicados en la pigmentación, mientras que la escisión del elemento podía restaurar de manera parcial la función del gen afectado. Estos procesos generaban los patrones observados y constituían una evidencia indirecta de la movilidad genética.

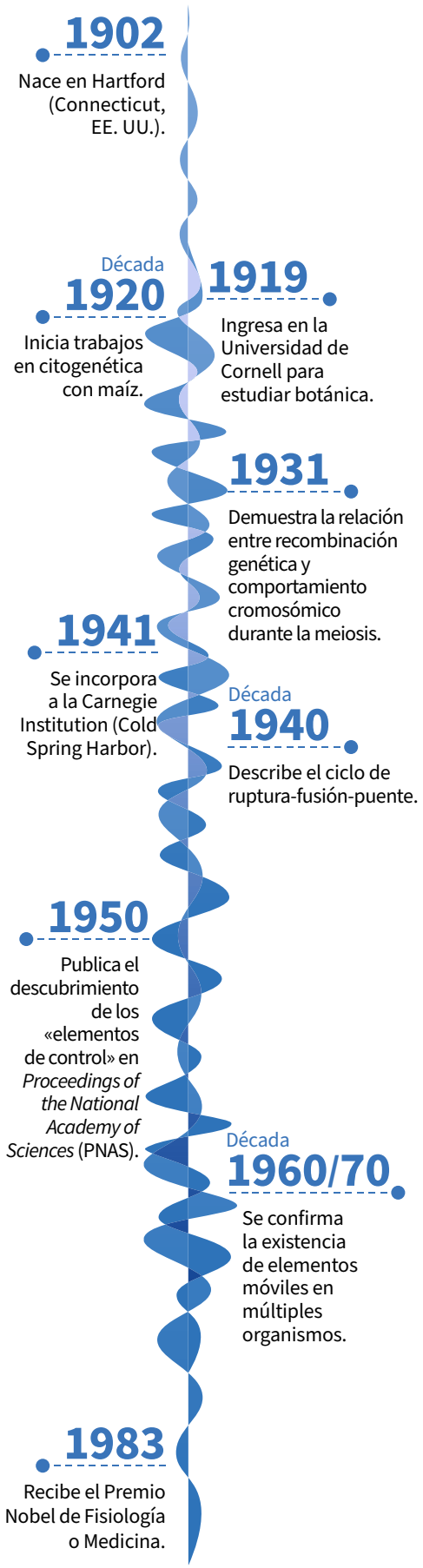
La relación funcional entre Ac y Ds sugería la existencia de sistemas internos de regulación. Este comportamiento anticipaba conceptos actuales de control génico y redes de interacción molecular, hoy asociados a la acción de transposasas y de otros mecanismos responsables del movimiento de elementos transponibles.

En 1950 publicó en *Proceedings of the National Academy of Sciences* el trabajo *The Origin and Behavior of Mutable Loci in Maize*. Un año más tarde, en el simposio de Cold Spring Harbor, formuló de manera más amplia la idea de los «elementos de control»: secuencias genéticas móviles integradas en un sistema regulador interno. No se trataba solo de mutaciones aisladas, sino de una reorganización activa de la información hereditaria.

Una idea adelantada a su tiempo

La propuesta resultó difícil de integrar en el contexto científico del momento. La ausencia de herramientas moleculares limitaba la observación directa de los procesos descritos, y los modelos dominantes asumían una organización relativamente estable del genoma. Durante años, los resultados obtenidos fueron considerados demasiado particulares o de alcance limitado.

A partir de la década de 1960, el desarrollo de la biología molecular permitió identificar elementos móviles en bacterias, incluidos los implicados en la resistencia a anti-





McClintock, recibiendo el Premio Nobel de Medicina el 10 de diciembre de 1983 / EFE.

bióticos. Posteriormente, la presencia de estos elementos se confirmó en organismos eucariotas, desde levaduras hasta mamíferos. La movilidad genética pasó entonces a considerarse un fenómeno general.

La genómica contemporánea consolidó esta perspectiva. Análisis genómicos posteriores mostraron que alrededor del 45-50 % del genoma humano deriva de secuencias relacionadas con elementos móviles. Lejos de ser material residual, muchas de estas secuencias desempeñan funciones reguladoras, participan en la organización de la cromatina y contribuyen a la generación de variabilidad genética.

Radiación, genoma y respuesta biológica

La concepción del genoma como un sistema dinámico tiene implicaciones de interés para la radiobiología. La radiación ionizante induce roturas en el ADN y activa complejos mecanismos celulares de reparación. En este contexto, distintas líneas de investigación han sugerido que determinados elementos móviles pueden activarse en situaciones de estrés genómico.

La movilización de dichos elementos puede generar inserciones adicionales, reordenamientos y alteraciones en la regulación génica. Tales procesos pueden contribuir tanto a respuestas adaptativas como a formas de inestabilidad cromosómica asociadas a la carcinogénesis.

Desde la perspectiva de la protección radiológica, este marco conceptual introduce un nivel adicional de complejidad. Los efectos de la radiación no se reducen a lesiones directas en el ADN, sino que pueden involucrar respuestas reguladoras distribuidas a lo largo del genoma. Ahora bien, la relación entre daño radiogénico, activación de elementos móviles e impacto biológico sigue siendo un campo de investigación abierto, por lo que conviene formular estas conexiones con cautela.

El reconocimiento institucional culminó en 1983, cuando Barbara McClintock recibió el Premio Nobel de Medicina por el descubrimiento de los elementos genéticos móviles. Fue, además, la primera mujer en obtener en solitario ese galardón en esta categoría.

En la actualidad, la movilidad genética constituye un elemento central en disciplinas como la epigenética, la genómica funcional y la biología de sistemas. La capacidad del genoma para reorganizarse en respuesta a estímulos internos y externos resulta clave para comprender procesos biológicos fundamentales. El legado de McClintock no se limita a un descubrimiento concreto: estableció un marco conceptual en el que la estabilidad genética se entiende como el resultado de procesos dinámicos, una perspectiva que sigue siendo decisiva para pensar la plasticidad del genoma. ■



Barbara McClintock, durante su conferencia Nobel, el 8 de diciembre de 1983.



La célula que aprende sin neuronas

El ciliado unicelular *Stentor coeruleus*, protista de agua dulce con morfología de trompeta, ofrece una ventana excepcional al origen celular del aprendizaje. Aunque carece de neuronas, sinapsis y sistema nervioso, este organismo es capaz de modificar su conducta ante estímulos mecánicos repetidos: contrae inicialmente su cuerpo como respuesta defensiva, pero reduce progresivamente esa reacción cuando el estímulo deja de representar una amenaza. El fenómeno, compatible con la habituación, muestra que una sola célula puede discriminar la persistencia de una señal, ajustar su respuesta y conservar una huella funcional de la experiencia. El artículo, publicado en *Current Biology*, identifica rutas moleculares asociadas a la señalización por calcio, la fosforilación proteica y la síntesis de proteínas, con especial implicación de CaMKII y proteínas de unión a calcio con dominios EF-hand. El hallazgo sitúa la memoria en su escala más elemental, allí donde la bioquímica celular integra señales y modula la conducta antes de la aparición de las neuronas. ■

Mensajeros renales de la insuficiencia cardiaca

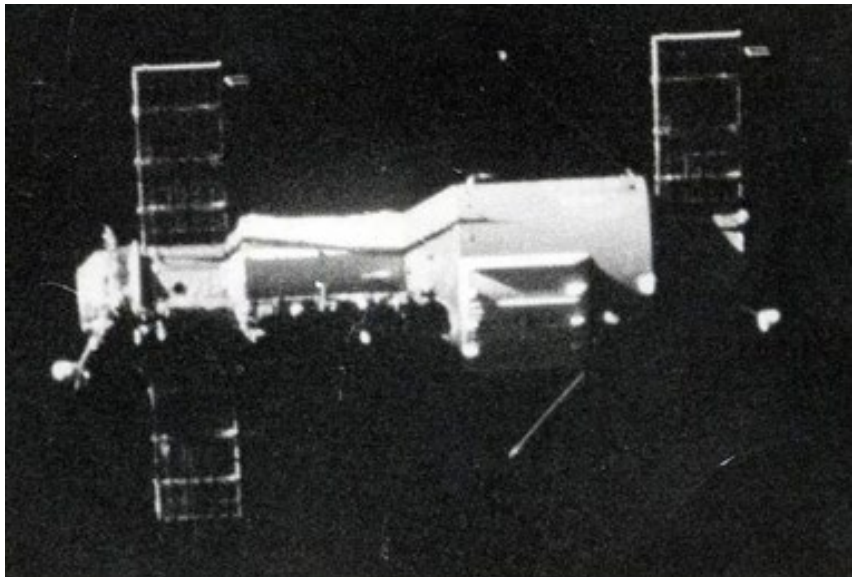
Un estudio publicado en *Circulation* aclara cómo la enfermedad renal crónica puede contribuir al deterioro del corazón. El trabajo muestra que las vesículas extracelulares circulantes presentes en pacientes con enfermedad renal crónica transportan un repertorio específico de microARN de origen renal capaz de inducir daño directo en cardiomiocitos. En modelos celulares, estas vesículas promovieron apoptosis, alteraron el manejo del calcio y deterioraron la contractilidad; en un modelo murino –en ratón– de enfermedad renal crónica, su depleción farmacológica mejoró la función cardiaca y atenuó el fenotipo de insuficiencia cardiaca. Los autores sitúan así a las vesículas extracelulares no solo como marcadores de lesión subclínica, sino como mediadores activos del eje riñón-corazón. El hallazgo abre una vía de interés para estratificar precozmente el riesgo cardiovascular en pacientes renales y explorar futuras intervenciones dirigidas contra señales vesiculares específicas. ■



EFEMÉRIDES

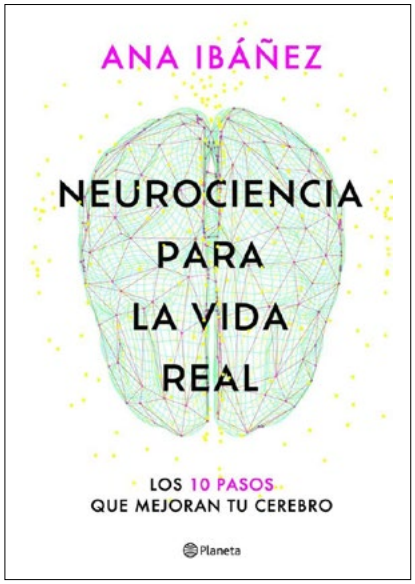
55 años de Salyut 1, el origen de la exploración orbital tripulada

El 19 de abril de 1971, la Unión Soviética puso en órbita la Salyut 1, primera estación espacial de la historia, lanzada desde Baikonur mediante un cohete Protón-K. Designada internamente como DOS-1, inauguró un nuevo paradigma de la astronáutica tripulada: el paso de las cápsulas de corta duración a plataformas presurizadas concebidas para la residencia, la observación y la experimentación en microgravedad. Su configuración combinaba elementos estructurales del programa Almaz, de origen militar, con subsistemas derivados de las naves Soyuz, dando lugar a un complejo orbital de cerca de 19 toneladas. Tras el acoplamiento fallido de la Soyuz 10, la tripulación de la Soyuz 11 ocupó la estación durante veintitrés días, realizando experimentos



de astrofísica, biología, observación terrestre y tecnología. A 55 años de su lanzamiento, la Salyut 1 permanece como el hito fundacional de una genealogía técnica que conduciría a Salyut 6 y 7, a Mir y al módulo Zvezdá de la Estación Espacial Internacional. ■

LIBROS



Neurociencia para la vida real

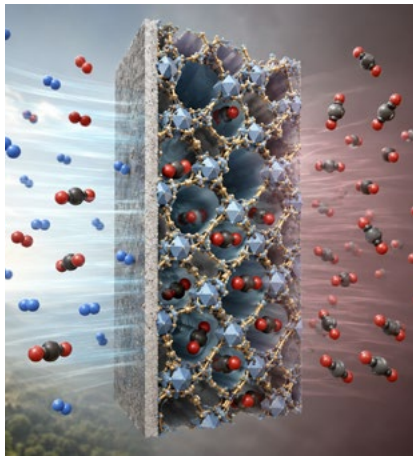
Ana Ibáñez plantea una aproximación aplicada al cerebro como órgano dinámico, moldeable y estrechamente vinculado a la conducta, la emoción y la salud corporal. Desde el marco de la neuroplasticidad, la obra explora cómo los circuitos neuronales pueden reorganizarse mediante el aprendizaje, la atención y la repetición de nuevos patrones de respuesta. Estrés, ansiedad, miedo, descanso, concentración o regulación emocional se abordan como procesos en los que intervienen mecanismos cerebrales modificables, no como estados inamovibles. Con vocación divulgativa, el libro traslada conceptos de la neurociencia al territorio de la vida cotidiana y propone una lectura del bienestar como resultado de la interacción entre biología, experiencia y entrenamiento mental. ■

Ibáñez, A. (2026)
Neurociencia para la vida real: los 10 pasos que mejoran tu cerebro
Editorial Planeta, 400 pp.

EN RED

Membranas MOF para capturar CO_2 del aire

La captura directa de dióxido de carbono de la atmósfera se perfila como una de las líneas de investigación orientadas a reducir la presencia de este gas de efecto invernadero sin depender de focos concretos de emisión. Un estudio del Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA), centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universidad de Zaragoza, explora el uso de membranas basadas en materiales MOF (*metal-organic frameworks* o estructuras metalorgánicas porosas) para la captura directa de aire, conocida como DAC por sus siglas en inglés (*direct air capture*). El trabajo, publicado en *Advanced Materials*, combina estos materiales porosos con polímeros diseñados para favorecer la separación del CO_2 frente a otros gases presentes en el aire. La investigación apunta a una mejora



potencial de la eficiencia de estos sistemas y estudia su integración en procesos de mayor escala, especialmente en instalaciones asociadas a fuentes abundantes de energía renovable. ■

Más información: https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202510740

El sentido magnético de las palomas mensajeras

Un estudio publicado en *Science* sitúa en el hígado un protagonista inesperado de la navegación animal. La investigación identifica en las palomas mensajeras macrófagos –células del sistema inmunitario– ricos en



hierro almacenado en ferritina, con propiedades compatibles con una respuesta al campo magnético terrestre. Tras eliminar selectivamente estas células, las aves entrenadas perdieron la orientación bajo cielo nublado; cuando el sol era visible, recuperaron la ruta. El hallazgo describe un mecanismo complementario al uso de referencias visuales y refuerza la hipótesis de que la magnetorrecepción puede apoyarse en sensores periféricos conectados con el sistema nervioso. Una nueva pieza para comprender cómo algunos animales convierten el campo geomagnético en información útil para orientarse. ■

Más información: https://www.science.org/doi/10.1126/science.ady2486

REDES

Calfis Art

Este canal acerca la astronomía y la geografía al público joven mediante vídeos cortos de formato *shorts*, con un enfoque dinámico y divulgativo. A través de contenidos breves y visuales, combina entretenimiento y explicación científica para fomentar el interés por la ciencia en redes sociales.

IFLScience

Una de las páginas de divulgación científica más seguidas en esta red social. Publica noticias, curiosidades, imágenes y datos llamativos sobre astronomía, biología, física y otras disciplinas, con un tono accesible y más divulgativo que técnico.

@birloque

Jesús Pérez Gil, profesor de la Universidad Complutense de Madrid, bioquímico y biofísico, comparte análisis y comentarios sobre actualidad científica desde una perspectiva académica e institucional. Su tono combina reflexión, análisis crítico y contextualización de noticias científicas.

@alta.ciencia

Una de las cuentas de divulgación científica visual por excelencia de la plataforma. Publica contenidos sobre fenómenos naturales, descubrimientos recientes y explicaciones breves de procesos científicos cotidianos, con especial atención al formato gráfico.

@opedroloos

Con más de dos millones de seguidores, Pedro Loos, creador de contenido brasileño vinculado al proyecto de divulgación «Ciência Todo Dia», uno de los más populares de Brasil, produce contenidos sobre curiosidades científicas con un enfoque divulgativo, dinámico y apoyado en el humor.

El CSN ratifica ante el OIEA la eficacia del modelo regulador español en seguridad nuclear



Una delegación española de la que forma parte el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) ha presentado en Viena el 10.º Informe Nacional de la Convención sobre Seguridad Nuclear, que recoge la actividad reguladora y los resultados en materia de seguridad nuclear y protección radiológica de las centrales nucleares españolas desde la anterior revisión. El CSN ha estado representado por su presidente, Juan Carlos Lentijo, el consejero Javier Dies y la directora técnica de Seguridad Nuclear, Teresa Vázquez, acompañados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) y el Comité de Energía Nuclear (CEN), que reúne a los titulares de las centrales.

La presentación incluyó un análisis de los principales retos del sector en España: la gestión segura de la operación a largo plazo y la transición al desmantelamiento, el relevo generacional y la atracción de talento, la seguridad nuclear en el contexto del cambio climático y la incorporación de nuevas tecnologías, incluida la inteligencia artificial, en las actividades reguladoras. En este marco, el CSN expuso las líneas maestras de su Plan Estratégico 2026-2030, orientado a reforzar la capacidad supervisora del organismo, mejorar la eficiencia operativa, potenciar la preparación y respuesta ante emergencias e impulsar la excelencia de su equipo humano.

Durante el encuentro, el regulador informó de los resultados de la misión de seguimiento IRRS celebrada en 2025, que dio por cerradas todas las recomendaciones y sugerencias formuladas en la misión combinada IRRS-ARTEMIS de 2018. El equipo de expertos de la Convención identificó como buena práctica la herramienta DOSI-APP, diseñada para la gestión centralizada y en tiempo real de las dosis de los actuantes en situaciones de emergencia, y destacó otras dos áreas de desempeño: el carné radiológico digital y la estrategia de los operadores nucleares para fortalecer la cultura de seguridad de las empresas que prestan servicio en las centrales. ■

El CSN defiende una regulación más ágil y comprometida con la igualdad

El CSN participó en la Conferencia Internacional sobre Sistemas Reguladores Nucleares y Radiológicos Eficaces del OIEA, celebrada en Viena. La delegación, encabezada por el presidente Juan Carlos Lentijo, la vicepresidenta Pilar Lucio y la directora técnica de Protección Radiológica, Isabel Villanueva, intervino en las sesiones sobre eficacia reguladora, cultura de seguridad, igualdad de género y resiliencia institucional. El presidente abogó por consolidar la cultura de seguridad mediante el fortalecimiento del liderazgo, alineada con el Plan Estratégico 2026-2030. ■

CSN y Enresa firman un protocolo de actuación para el desarrollo del proyecto del Almacenamiento Geológico Profundo



El CSN y la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa) suscribieron un protocolo general de actuación que ordenará la cooperación entre ambos organismos en el desarrollo del proyecto del Almacenamiento Geológico Profundo (AGP). El acuerdoestablece el marco de relación técnica, regulatoria y de planificación para una infraestructura considerada, por consenso internacional, como la opción más segura para la gestión final del combustible gastado y los residuos de alta actividad. ■

Tercer taller internacional sobre el suministro de radioisótopos médicos de la Agencia de Energía Nuclear

El Consejo de Seguridad Nuclear, representado por la consejera Silvia Calzón y la directora técnica de Protección Radiológica, Isabel Villanueva, ha participado en el Tercer Taller Internacional sobre el Suministro de Radioisótopos Médicos, organizado en París por la Agencia de Energía Nuclear (NEA) de la OCDE. El encuentro ha reunido a reguladores, productores y expertos sanitarios para revisar el estado del mercado de radioisótopos y los retos asociados a su disponibilidad clínica.



El taller continúa la línea de trabajo abierta en 2009 con la creación del Grupo de Alto Nivel sobre la Seguridad del Suministro de Radioisótopos Médicos (HLG-MR), constituido por la NEA para reforzar la cooperación internacional y la estabilidad del mercado del molibdeno-99. La nueva edición se apoya, además, en el Grupo de Expertos sobre Radioisótopos Médicos (EG-MR), encargado de monitorizar tanto los isótopos consolidados como los emergentes y de formular recomendaciones que aseguren la resiliencia del suministro a largo plazo.

Entre los asuntos abordados destaca la evolución de las terapias radioligando (RLT), una modalidad oncológica de creciente desarrollo basada en el uso de moléculas marcadas con radionucleidos que se acumulan selectivamente en las células tumorales. El grupo de expertos trabaja en evaluar la preparación de los sistemas sanitarios ante la expansión de estos tratamientos, en un contexto en el que la demanda global de radioisótopos sigue creciendo y la base productiva mundial continúa concentrada en un número reducido de instalaciones. ■

ACUERDOS DEL PLENO DEL CSN

El CSN informa favorablemente la solicitud de ejecución y montaje del almacén temporal de residuos radiactivos de Vandellós I.

El Pleno ha respaldado, con condiciones y requisitos, la solicitud de Enresa para iniciar la excavación y construir el almacén temporal de la central, en fase de latencia desde 2005. La instalación albergará los residuos resultantes del tratamiento en Francia del combustible gastado de Vandellós I hasta su traslado al futuro AGP.

Acceso a todas las actas

El CSN informa favorablemente la renovación de la autorización de explotación de la fábrica de combustible nuclear de Juzbado.

El Pleno ha informado favorablemente, con límites y condiciones, la renovación por diez años de la autorización de explotación de la fábrica de Juzbado (Salamanca), solicitada por Enusa. La decisión se apoya en los resultados de la Revisión Periódica de la Seguridad y en veintitrés informes técnicos del organismo.

Informe al Comité Asesor de las actuaciones llevadas a cabo durante el apagón

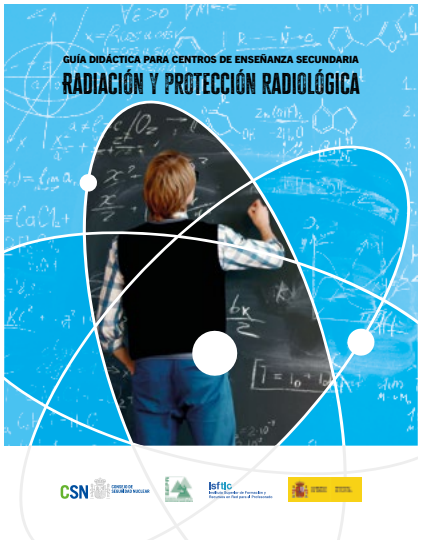
El CSN ha celebrado la 31.ª reunión de su Comité Asesor para la información y participación pública. En el encuentro se expusieron las actuaciones llevadas a cabo por las centrales nucleares y por el propio organismo durante el apagón del 28 de abril de 2025. El análisis del suceso, publicado en abril, recoge las medidas adoptadas desde el punto de vista de la seguridad nuclear y la protección radiológica, así como las lecciones aprendidas para reforzar la respuesta ante situaciones similares. La reunión abordó también los informes preceptivos para autorizar instalaciones de protonterapia del Sistema Nacional de Salud y la presentación del nuevo asistente web del organismo. ■

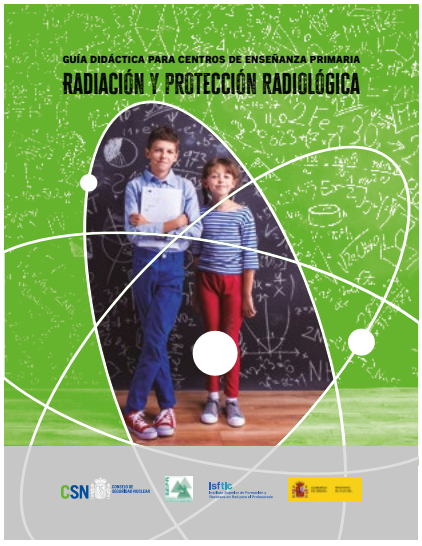
ÚLTIMAS PUBLICACIONES













CSN alfa **Revista de seguridad nuclear y protección radiológica** BOLETÍN DE SUSCRIPCIÓN

Institución/ Empresa

Nombre

Dirección

CP Localidad Provincia

Tel. Correo electrónico

Fecha Firma

Enviar a **Consejo de Seguridad Nuclear – Servicio de Publicaciones.** Pedro Justo Dorado Dellmans, 11 · 28040 Madrid / peticiones@csn.es

También puede suscribirse a la edición digital de la revista *Alfa* a través de este formulario *online* [http://run.gob.es/xdjxkd]

La información facilitada formará parte de un fichero informático con el objeto de constituir automáticamente el *Fichero de destinatarios de publicaciones institucionales del Consejo de Seguridad Nuclear.* Usted tiene derecho a acceder a sus datos personales, así como a su rectificación, corrección y/o cancelación. La cesión de datos, en su caso, se ajustará a los supuestos previstos en las disposiciones legales y reglamentarias en vigor.

ON THE COVER

6 > Chernobyl, Forty Years Later

Life and biological adaptation in the exclusion zone. Forty years after the accident, Chernobyl remains an exceptional natural laboratory for studying chronic radiation, evolution and biological resilience. Mammals, amphibians, microorganisms and recent genomic studies reveal a landscape shaped both by residual contamination and by the abrupt withdrawal of human pressure

REPORTS

14 > Toward Totality

Celestial mechanics, the solar corona and safe observation ahead of the August eclipse. On August 12, 2026, the first total solar eclipse visible from the Iberian Peninsula in more than a century will cross Spain from the northwest to the Balearic Islands. The article examines the geometry of totality, the science of the solar corona and the retinal risk that makes certified eye protection essential in every partial phase

22 > The Invisible Variable

Beyond low Earth orbit, space radiation ceases to be a background factor and becomes a mission variable: medical, material, electronic and operational. Specialists from ESA, INTA and CSIC explain how trapped particles, solar particle events and galactic cosmic rays shape spacecraft design, shielding, electronics, crew protection and mission procedures beyond Earth's natural shield

INTERVIEW

32 > Ángel Luis Fernández Recuero

Editor and CEO of *Jot Down, Mercurio* and *Menéame*

TECHNICAL ARTICLES

36 > MARRTA Project

SCIENCE AND GASTRONOMY

44 > Cooking Enters the Laboratory

Gastronomy has become a field of research where food chemistry, sensory perception and food innovation converge, from molecular gastronomy and neurogastronomy to food irradiation and alternative proteins

RADIOGRAPHY

50 > Licensing of nuclear power plant operating personnel

CSN R&D

52 > Application of ICRP 137, Part 3, to Radon Dose Assessment in Workplaces with Extreme Conditions (RADosis)

The RADosis project assesses how ICRP Publication 137 can be applied to estimate effective doses from radon in complex workplaces such as caves, mines and spas.

ENTITIES

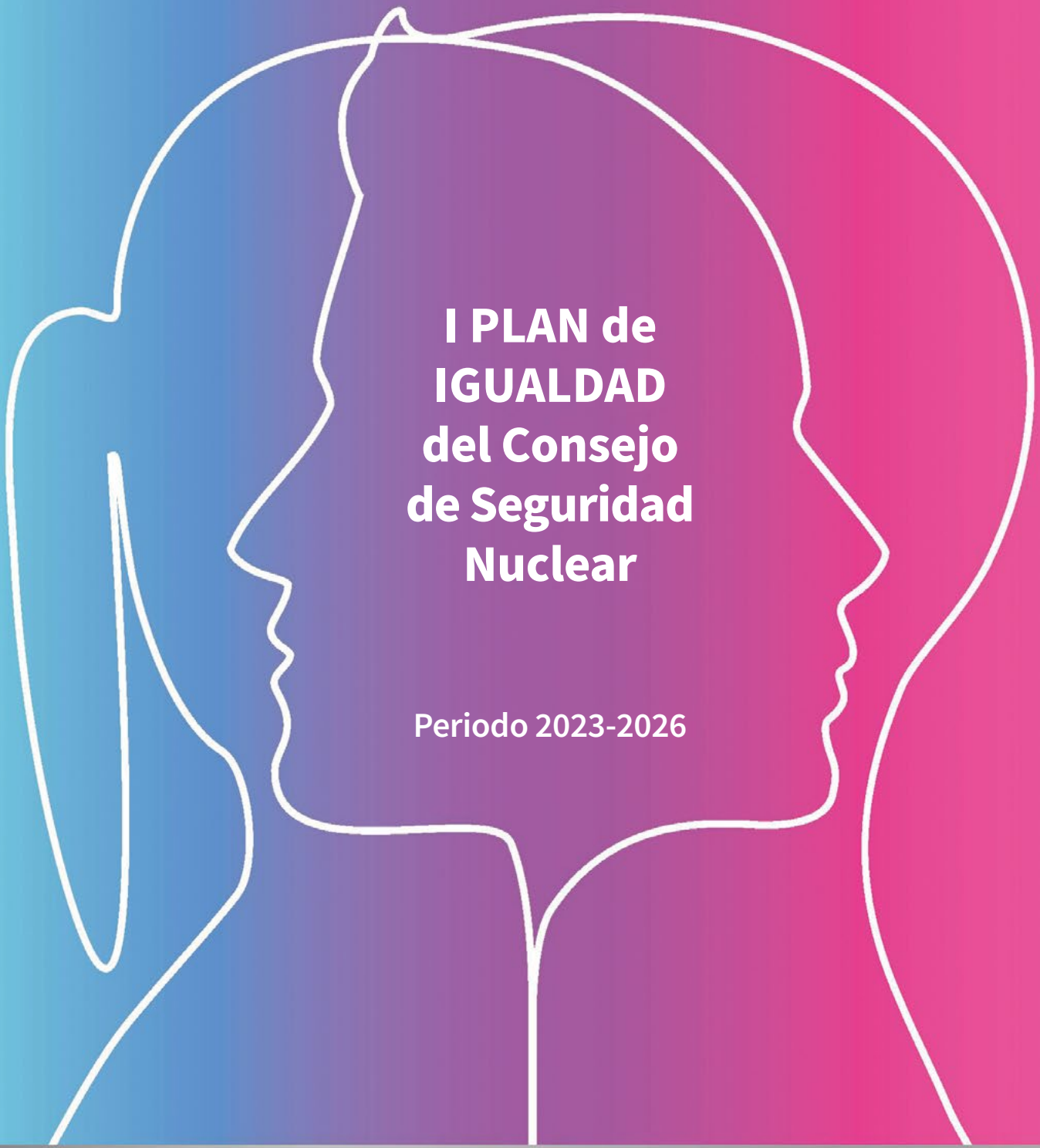
54 > CEIDEN

Strategic coordination for nuclear fission R&D in Spain to coordinate nuclear fission R&D, preserve technical capabilities, support training and strengthen participation in international initiatives

NAMES IN SCIENCE

60 > Barbara McClintock and the Genome in Motion

The scientist who revealed genetic transposition in maize and transformed the view of the genome from a fixed archive into a dynamic system, with implications for genetics, molecular biology and radiobiology



I PLAN de IGUALDAD del Consejo de Seguridad Nuclear

Periodo 2023-2026

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR