



CSN

ALFA

Revista de seguridad
nuclear y protección
radiológica

Consejo de
Seguridad Nuclear

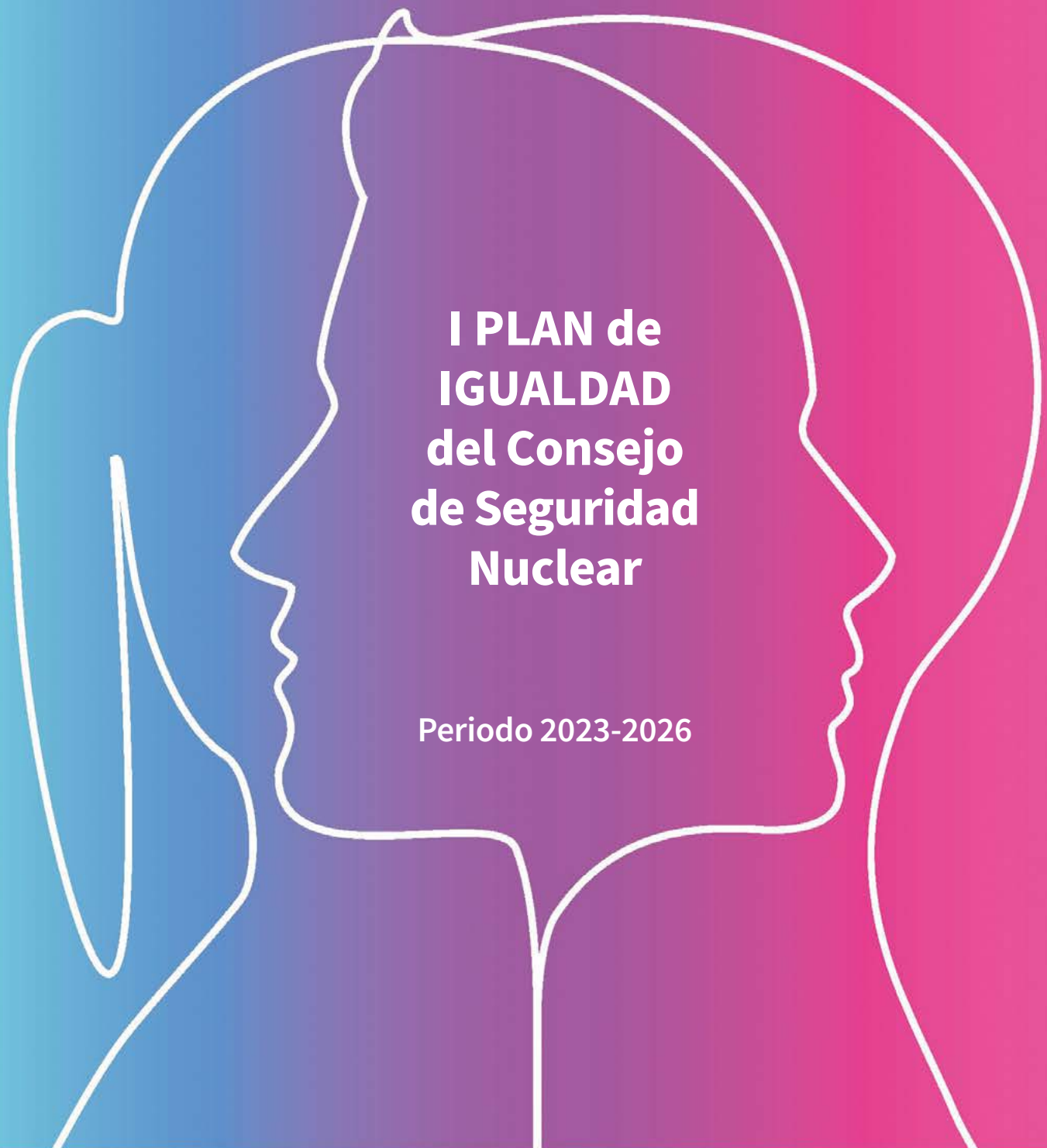
Número 67
Septiembre 2026

Bosque y paisaje Gestión medioambiental frente a los desafíos climáticos

Residuos en custodia:
de los vertidos al mar a la
actual cadena de barreras,
vigilancia y conocimiento

La cadena invisible.
Veinte millones de envíos
al año sostienen
la actividad nuclear

Entrevista a Silvia Calzón
Fernández, consejera
del CSN y exsecretaria
de Estado de Sanidad



I PLAN de IGUALDAD del Consejo de Seguridad Nuclear

Periodo 2023-2026

Hay números que invitan a mirar de cerca aquello que, por habitual, puede pasar inadvertido. Este ejemplar de *Alfa* se abre con una reflexión sobre el paisaje. Un territorio en transformación continua, moldeado por el clima y la actividad humana. Sequías, lluvias extremas, olas de calor e incendios obligan a pensar la gestión ambiental no solo como conservación, sino también como anticipación. El reportaje de portada recorre esa relación entre bosque, suelo y paisaje y muestra cómo la ciencia –incluidas las técnicas basadas en radionucleidos– ayuda a comprender la erosión, la redistribución de sedimentos o la recuperación tras un incendio.

La idea de custodiar atraviesa otro de los grandes reportajes. La gestión de los residuos radiactivos ha cambiado profundamente desde los años en que algunos países recurrieron al vertido en el océano. Hoy exige caracterizar cada residuo, acondicionarlo, confinarlo, vigilarlo y preservar durante décadas la información necesaria para gestionarlo. Las campañas NODSSUM, que han regresado a antiguos emplazamientos del Atlántico nororiental con vehículos submarinos, permiten reconstruir esa evolución: del principio de alejar y diluir a una cultura basada en conocer, contener y demostrar la seguridad.

También existen infraestructuras esenciales que apenas vemos, simplemente porque funcionan. Cada año circulan por el mundo unos veinte millones de envíos de material nuclear y radiactivo. «La cadena invisible» se adentra en los sistemas técnicos y regulatorios que hacen posible ese transporte y plantea una paradoja. Tras más de seis décadas sin incidentes con consecuencias radiológicas significativas, uno de los principales problemas ya no está en los embalajes, sino en las denegaciones y demoras, especialmente críticas para los radiofármacos de vida corta.

La entrevista tiene como protagonista a Silvia Calzón Fernández, consejera del CSN, epidemióloga y exsecretaria de Estado de Sanidad. Desde su experiencia en salud pública, aborda la prevención, la cultura de seguridad, la cooperación institucional y la necesidad de que las organizaciones no solo sean transparentes, sino también comprensibles. Una mirada que conecta con una idea presente en buena parte de la revista: la seguridad se construye antes de que ocurra un incidente, mediante vigilancia, preparación y capacidad de adaptación.

Ese horizonte aparece en el artículo técnico dedicado al almacenamiento geológico profundo. Un taller internacional celebrado en Madrid reunió a especialistas de más de veinte países para analizar cómo se toman decisiones en proyectos que se

desarrollan durante generaciones. Las experiencias internacionales subrayan la importancia de procesos progresivos, marcos reguladores sólidos, gestión de las incertidumbres y diálogo entre reguladores, implementadores y sociedad.

Alfa se detiene además en otro desafío: cómo enseñar ciencia en un entorno saturado de información. «Aprender ciencia haciendo ciencia» defiende una educación capaz de formar no solo en conocimientos, sino también en preguntas, evidencias, contraste de fuentes y juicio crítico. Programas del CSIC, la ESA, el CERN, el CNIC o la Comisión Europea muestran el valor de acercar la investigación real a las aulas.

La investigación y la cooperación científica completan este recorrido. PEPRI conecta a los actores de la I+D+i española en protección radiológica y favorece la creación de alianzas y nuevas líneas de trabajo. Y en «Ciencia con nombre propio», Katalin Karikó permite seguir el largo camino del ARN mensajero desde una línea de investigación considerada durante años demasiado frágil para tener aplicación terapéutica hasta convertirse, tras décadas de trabajo acumulado, en una de las bases de las vacunas de ARNm. Una historia que resume bien el espíritu de este número: observar, medir, aprender y sostener el conocimiento en el tiempo para transformar incertidumbre en capacidad de decisión. ■

alfa

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Editada por el CSN

Número 67
Septiembre 2026



Comité Editorial

Juan Carlos 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
Paula Romero Centeno
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, PEPRI,
CNRS, Enresa, OIEA, Envato,
Freepik, iStock

Producción e impresión

Editorial MIC
Pol. Ind. Trabajo del Camino
24010 León

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

© Consejo de Seguridad Nuclear

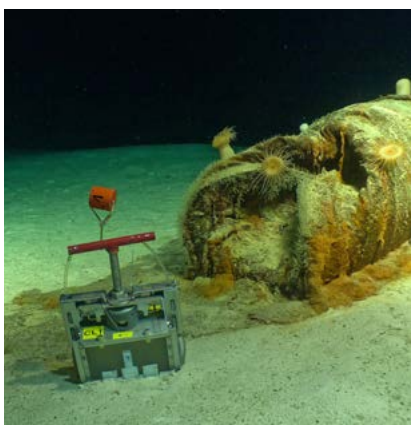
Las opiniones recogidas en esta publicación son responsabilidad exclusiva de sus autores, sin que la revista *Alfa* las comparta necesariamente.



EN PORTADA

6 **Bosque y paisaje**

El paisaje nunca ha sido estático. El clima y la actividad humana han transformado continuamente los territorios, modificando bosques, cultivos, cauces y espacios habitados. Gestionar el territorio significa anticiparse a los cambios y conservar su capacidad para resistirlos



REPORTAJES

14 **Residuos en custodia**

La gestión actual de los residuos radiactivos se basa en su caracterización, acondicionamiento, confinamiento y vigilancia a largo plazo. Custodiar implica mantener durante décadas una cadena continua de control, información y responsabilidades



24 **La cadena invisible**

Veinte millones de envíos al año sostienen la medicina nuclear, la industria y el ciclo del combustible. Su principal amenaza no es un accidente, sino un rechazo

ENTREVISTA

30 **Silvia Calzón Fernández**

Consejera del CSN, exsecretaria de Estado de Sanidad, epidemióloga y especialista en medicina preventiva y salud pública



ARTÍCULOS TÉCNICOS

36 **Taller internacional sobre la toma de decisiones en el desarrollo de proyectos de almacenamiento geológico profundo**

Plataforma de reflexión y diálogo en torno a uno de los desafíos más complejos y de mayor proyección temporal

CIENCIA Y EDUCACIÓN

44 **Aprender ciencia haciendo ciencia. La necesidad de interpretar, contrastar y decidir**

Enseñar ciencia como método de análisis constituye una tarea central de cualquier sistema educativo



RADIOGRAFÍA

50 **Intercomparaciones: medir mejor para vigilar con más eficiencia**

CSN I+D

52 **Optimización del diseño de núcleo mediante inteligencia artificial**



ENTIDADES

54 **PEPRI**

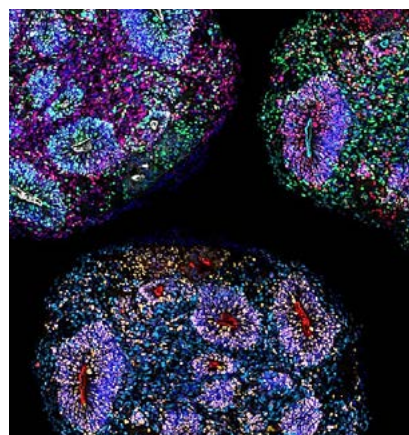
Actúa desde 2014 como punto de encuentro de la I+D+i nacional en protección radiológica. Impulsada por la SEPR y el CSN, favorece alianzas y nuevas líneas de trabajo



CIENCIA CON NOMBRE PROPIO

60 **Katalin Karikó: el largo camino del ARN mensajero**

Cómo una investigación básica, sostenida durante años, puede acabar sustentando una transformación médica de alcance mundial



65 **Reacción en cadena**

68 **Panorama**

70 **Últimas publicaciones**



Bosque y paisaje

Gestión medioambiental frente a los desafíos climáticos

El paisaje nunca ha sido estático. El clima y la actividad humana han transformado continuamente los territorios, modificando bosques, cultivos, cauces y espacios habitados. El cambio climático está alterando las condiciones en las que se producen estas transformaciones y aumentando la incidencia de sequías, lluvias extremas, olas de calor e incendios. Gestionar el territorio significa también anticiparse a estos cambios y conservar su capacidad para resistirlos.

■ Texto: Isabel Robles

Cuando los primeros grupos de *Homo antecesor* llegaron a la sierra de Atapuerca, el paisaje que observaron era muy distinto del actual. Zonas boscosas, humedales y praderas en las que pastaban grandes herbívoros, como ciervos o bisontes,

componían un entorno en el que también existían otros depredadores, como los osos. Más de 850 000 años después, el paisaje es distinto. La reducción de las precipitaciones, la variación de las temperaturas, la evolución de los ecosistemas, la desaparición

de especies y la actividad humana han ido transformando el territorio hasta configurar un entorno en el que los campos de cultivo se mezclan con pastizales, zonas de matorral, masas forestales, vías de comunicación y asentamientos humanos.



Gestión forestal, en cifras

La Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2025 de la FAO estima que 2130 millones de hectáreas forestales –el 55 % de la superficie forestal mundial– cuentan con planes de gestión a largo plazo. En Europa, la proporción alcanza el 94 %. Estos instrumentos permiten integrar objetivos de producción, conservación de la biodiversidad y protección del suelo y del agua en la planificación de los bosques.

El paisaje y la gestión medioambiental

Los paisajes son el resultado de la interacción entre los elementos naturales y las actividades humanas. El Convenio Europeo del Paisaje, que entró en vigor en España en 2008, adopta una definición amplia que incluye también los entornos urbanos e industriales, como el de Blaenavon, en el Reino Unido, declarado Patrimonio de la Humanidad.

Sin embargo, los paisajes no son estáticos: cambian a medida que lo hacen las condiciones naturales y la forma en que las sociedades utilizan el territorio. La expansión de las ciudades y las infraestructuras, la intensificación de la agricultura y el posterior abandono de cultivos, la introducción de especies exógenas o la transformación de los bos-

ques modifican la distribución y la composición de los diferentes hábitats y pueden llegar a provocar la pérdida de ecosistemas. No obstante, estas modificaciones también dan lugar a la creación de nuevos entornos; es el caso de determinados paisajes agrícolas y ganaderos en los que la actividad humana resulta esencial para conservar su estructura y mantener o incluso aumentar su biodiversidad.

En Países Bajos, el proyecto *Biodiverse Field Mosaic* (BAM) se basa en esta premisa. El predominio del monocultivo redujo la biodiversidad, por lo que se propuso a varios agricultores combinar especies, franjas de vegetación herbácea y plantas destinadas a generar hábitats para insectos y aves, creando un paisaje agrícola en mosaico sin perder su carácter productivo.

También se ha fomentado la reducción del uso de productos químicos para el control de malas hierbas y plagas, la plantación de cultivos de cobertura y la adaptación de las labores de siega y cosecha con el propósito de reducir su impacto sobre la fauna, lo que ha contribuido a favorecer la biodiversidad de la zona.

Además, algunas intervenciones pueden aumentar el valor del paisaje. En España, las dehesas constituyen un buen ejemplo: se extienden por cinco comunidades autónomas, con especial presencia en Extremadura. A partir de antiguas formaciones de bosque mediterráneo, encinas y alcornoques, bajo los que crecen jaras, retamas y cantuesos, dan forma a un entorno donde conviven el aprovechamiento ganadero, agrícola y forestal y una elevada diversidad de especies.



Reservas de la Biosfera, territorios en equilibrio

La sierra de Grazalema, entre Málaga y Cádiz, y Ordesa-Viñamala, en Huesca, fueron los primeros entornos naturales declarados Reserva de la Biosfera, ambos en 1977. A partir de ahí se fueron sumando otros territorios hasta alcanzar las 55 reservas que existen en España. Cuatro son transfronterizas: tres con Portugal –Gerês-Xurés, Meseta Ibérica y Tajo-Tejo– y una intercontinental con Marruecos –la del Mediterráneo–.

Estos territorios, en los que la conservación de la naturaleza y la actividad humana buscan un equilibrio, suponen un modelo de gestión en el que se promueven actividades económicas para el desarrollo de sus poblaciones al mismo tiempo que se protege la naturaleza. Además, las reservas abarcan gran variedad de paisajes, desde montañas y bosques hasta humedales, zonas costeras e islas. Integradas en la Red Mundial de Reservas de Biosfera, algunas han adquirido también un papel destacado en la cooperación internacional y el intercambio de conocimiento, como las reservas de Menorca y de los valles de Omaña y Luna.

La primera, declarada en 1993, incluye una extensa superficie marina y comparte con la Reserva de Biosfera de Jeju, en Corea del Sur, la Secretaría Técnica de la Red Mundial de Reservas de Biosfera Insulares y Costeras; la segunda, ubicada en la vertiente leonesa de la cordillera Cantábrica, en un punto en el que convergen especies de clima mediterráneo y atlántico, alberga desde 2021 la Secretaría Técnica de la Red Mundial de Reservas de Biosfera de Montaña, en colaboración con el Centro de Investigación de Ciencias Ecoambientales de la Academia de Ciencias china.

Para determinar cuánto suelo se pierde, de dónde procede y dónde acaba depositándose pueden emplearse técnicas basadas en radionucleidos de deposición atmosférica

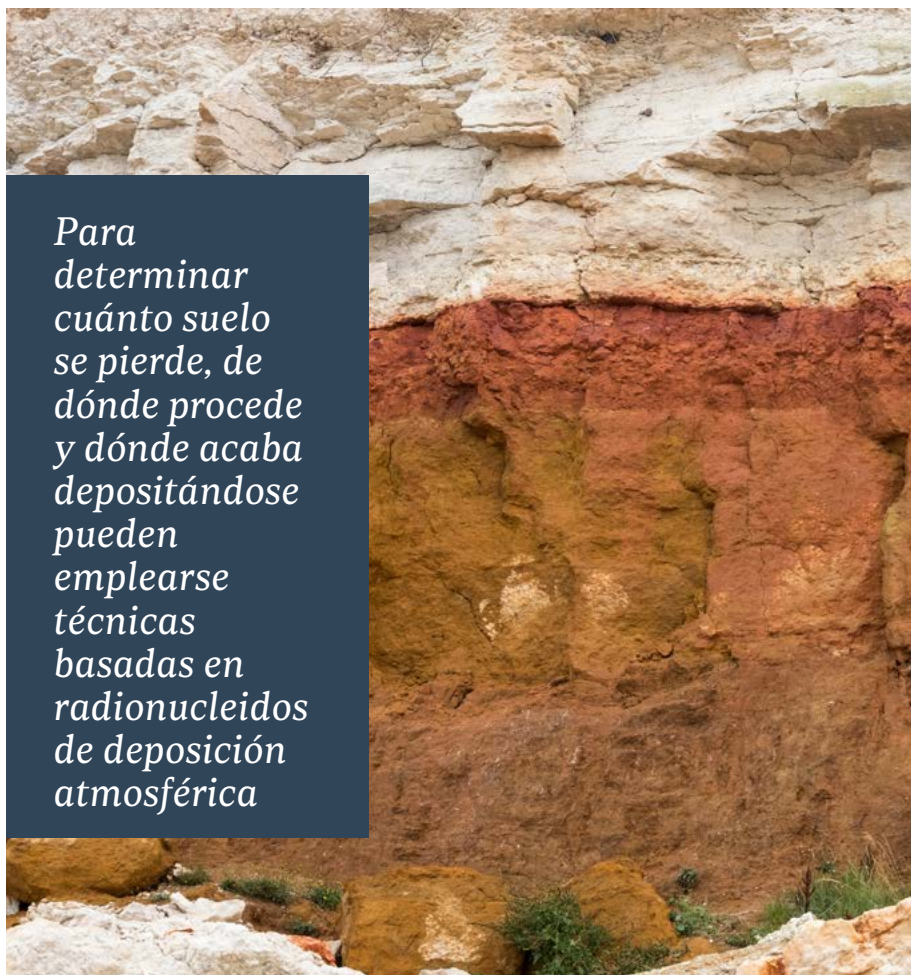
Sin embargo, el cambio climático, la despoblación y el abandono de algunas actividades tradicionales amenazan la pervivencia de estos paisajes.

Retos del planeta

Sequías extremas, episodios de lluvia torrencial o tormentas de granizo son algunos de los fenómenos que se reparten con cada vez más frecuencia por todo el globo. Un estudio publicado en julio de 2026 por World Weather Attribution sobre la sequía que afectó a Europa durante la primavera y el comienzo del verano muestra que el calentamiento está agravando este tipo de episodios. Entre abril y junio, amplias zonas del continente, desde Portugal hasta Finlandia, recibieron menos precipitaciones de lo habitual. Sin embargo, el análisis concluye que fue el calor, al intensifi-

car la demanda evaporativa de la atmósfera, el principal factor que agravó la sequía. «Los resultados muestran que esta sequía no se debe principalmente a las escasas precipitaciones, sino a una atmósfera más cálida que está provocando un mayor déficit de humedad en la tierra», explicó Mariam Zachariah, una de las autoras del estudio. «Esto significa que incluso en las regiones donde la cantidad de precipitación apenas ha variado o se ha llegado a incrementar, las sequías continuarán aumentando».

El calentamiento global está intensificando las condiciones que favorecen las sequías y elevan el riesgo de incendios. «Si el aire es cálido, secará el terreno. Si cada vez aumenta más su temperatura, la tierra se reseca más, lo que hace que sea propensa





La sequía no se debe solo a las escasas precipitaciones, sino a una atmósfera más cálida que está provocando un mayor déficit de humedad en la tierra

a incendios forestales», añadió Dominik Schumacher, otro de los autores del estudio.

Además, dependiendo del entorno y su transformación, las consecuencias pueden ser distintas. Un episodio de lluvia intensa no tendrá el mismo efecto en un lugar cubierto de vegetación que en una zona urbana en la que el suelo está cubierto por asfalto y otras superficies impermeables, que reducen la infiltración del agua. Según la Agencia Europea de Medio Ambiente, el terreno que ocupan las ciudades de la Unión Europea ha aumentado un 78 % desde mediados de la década de 1950 y cerca de la mitad de su superficie está actualmente sellada, lo que favorece las inundaciones.

Del mismo modo, la pérdida de vegetación facilita la erosión, altera las propiedades del suelo y reduce su capacidad para retener humedad. La FAO estima que más de mil

seiscientos millones de hectáreas de tierra están degradadas por prácticas de uso y gestión no sostenibles. Cuando las partículas de la capa superficial de estos suelos llegan a los cauces, aumenta la carga de sedimentos y pueden afectar a los ecosistemas; el problema suele hacerse evidente cuando la pérdida de suelo ya es considerable.

Para determinar cuánto suelo se pierde, de dónde procede y dónde acaba depositándose pueden emplearse técnicas basadas en radionucleidos de deposición atmosférica. Entre los más utilizados se encuentran el cesio-137 (^{137}Cs), el plomo-210 en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) y el berilio-7 (^7Be), que, una vez depositados, se asocian fuertemente a las partículas del suelo y se desplazan con ellas cuando estas son movilizadas por la erosión. Su distinto origen y, sobre todo, su diferente historia de deposición permiten estudiar la redistribución

del suelo en varias escalas temporales. El ^{137}Cs , introducido en el medio principalmente por las pruebas nucleares atmosféricas realizadas a partir de mediados del siglo XX, proporciona información sobre procesos ocurridos durante aproximadamente las últimas cinco o seis décadas. El $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, de origen natural y depositado continuamente desde la atmósfera, permite ampliar esa perspectiva y estimar tasas de redistribución del suelo correspondientes a periodos de hasta aproximadamente un siglo. Por su parte, el ^7Be , con un periodo de semidesintegración de unos 53 días, permite analizar procesos recientes e incluso la redistribución asociada a episodios concretos de precipitación. El uso combinado de estos trazadores permite reconstruir la evolución de la erosión y la sedimentación a diferentes escalas temporales y localizar las zonas en las que la pérdida o acumulación de suelo es mayor.



Los 63 grandes incendios forestales registrados en España en 2025 representaron solo el 0,77 % de los siniestros, pero concentraron el 87,42 % de la superficie forestal afectada



Estas técnicas pueden complementarse con el análisis de isótopos estables. Entre ellos, el carbono-13 permite identificar el origen de los sedimentos a partir de la firma isotópica de determinados compuestos orgánicos asociados a la vegetación y a los distintos usos del suelo. Al comparar esas firmas con las presentes en el material acumulado en un cauce o una zona de depósito, es posible determinar qué áreas de una cuenca contribuyen en mayor medida al aporte de sedimentos y orientar hacia ellas las medidas de conservación y gestión del territorio.

Bosques, fuego y gestión

Los bosques cubren el 31,81 % de la superficie terrestre del planeta y casi el 40 % de la de Europa. Además de almacenar carbono y albergar una parte importante de la biodiversidad, regulan el ciclo del agua, protegen el suelo y pro-

porcionan recursos a millones de personas. Lamentablemente, cada año se reducen las hectáreas forestales debido, entre otras causas, a los incendios, cuyo riesgo y severidad pueden verse agravados por el cambio climático.

En 2025, España y Portugal acumularon alrededor de 646 000 hectáreas quemadas hasta finales de agosto, el 65 % de toda la superficie afectada por incendios en Europa. En España se alcanzaron 380 877 hectáreas y, en Portugal, 265 139, cifras acumuladas récord para ambos países en la serie del Sistema Europeo de Información sobre Incendios Forestales (EFFIS). Aunque el número de incendios es elevado, una pequeña parte concentra la mayor superficie quemada. Según el avance informativo del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, los 63 grandes incendios forestales registrados en

España en 2025 representaron solo el 0,77 % de los siniestros, pero concentraron el 87,42 % de la superficie forestal afectada.

Alrededor del 95 % de los incendios forestales tiene origen humano. Una chispa procedente del uso de maquinaria agrícola o un fuego mal apagado pueden iniciar el incendio; que ese foco se transforme después en un fuego difícil de controlar depende de la cantidad y continuidad del combustible vegetal, de la humedad, de las condiciones meteorológicas y de la topografía.

Precisamente, el relieve tiene un papel muy importante. El fuego avanza con mayor rapidez por las pendientes ascendentes porque el calor de las llamas calienta y seca la vegetación situada por encima del frente.

El viento puede acelerar esa propagación y transportar pavesas a zonas situadas por delante del

Si se gestiona el territorio de manera adecuada, se puede recuperar un paisaje más heterogéneo, en el que las masas forestales alternen con cultivos, pastizales, matorrales y otras áreas abiertas para reducir la continuidad de la vegetación



El carbono-13 permite identificar el origen de los sedimentos a partir de la firma isotópica de determinados compuestos orgánicos asociados a la vegetación y a los distintos usos del suelo

incendio, generando nuevos focos. Cuando estas condiciones coinciden con una vegetación seca y continua, el comportamiento del fuego llega a superar la capacidad de los medios de extinción y obliga a los equipos a concentrarse en proteger las poblaciones, las infraestructuras y determinados puntos estratégicos mientras esperan a que cambien las condiciones que alimentan el incendio.

Estas situaciones son cada vez más frecuentes. El análisis de la campaña de 2025 realizado por Copernicus² muestra que durante el verano la península ibérica experimentó condiciones meteorológicas excepcionalmente favorables para la propagación del fuego: en algunas zonas del noroeste peninsular, agosto registró 18 días con un índice meteorológico de peligro de incendios extremo, aproximadamente

cuatro veces la media del periodo 1991-2020.

Dado que las condiciones meteorológicas no pueden controlarse, las acciones para reducir el impacto de estos fenómenos adquieren una relevancia cada vez mayor. La Comisión Europea considera que la gestión de la vegetación que puede actuar como combustible es una de las principales medidas para disminuir el riesgo de grandes incendios.

Si se gestiona el territorio de manera adecuada se puede recuperar un paisaje más heterogéneo, en el que las masas forestales alternen con cultivos, pastizales, matorrales y otras áreas abiertas para reducir la continuidad de la vegetación. En este sentido, el pastoreo extensivo puede contribuir a mantener estas zonas abiertas al

² Véase: ESOTC 2025, disponible en: <https://climate.copernicus.eu/esotc/2025/wildfires>

Recuperación del suelo

La pérdida de la vegetación deja el suelo expuesto a los fenómenos atmosféricos y modifica sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Además, tras un incendio, la degradación del terreno aumenta la escorrentía y la erosión. Por lo tanto, para evitar que el suelo que queda se pierda con las primeras precipitaciones, es necesario llevar a cabo diferentes actuaciones que dependen de la pendiente, el tipo de suelo, la severidad del fuego y la capacidad de regeneración natural de la vegetación. Entre las medidas utilizadas se encuentran la colocación de fajas-troncos o restos vegetales dispuestos siguiendo las curvas de nivel- y la construcción de pequeñas barreras o albarradas en las cárcavas para frenar la velocidad del agua y retener sedimentos. También pueden emplearse acolchados vegetales de modo que cubran el terreno y reduzcan el impacto directo de la lluvia. Un análisis² realizado en cuatro zonas de Castilla-La Mancha y basado en diez años de observaciones mostró que no todas las actuaciones tras un incendio tienen la misma eficacia

frente a la erosión. Entre las medidas estudiadas, los acolchados vegetales fueron los que ofrecieron mejores resultados, especialmente los realizados con paja de trigo.

La recuperación de la cubierta vegetal es otra de las herramientas fundamentales, pero no siempre es necesario reforestar de forma inmediata. La restauración debe partir de la capacidad de regeneración del propio ecosistema y reservar las plantaciones para las zonas en las que la recuperación natural no sea suficiente.

Además, un estudio en el que participaron investigadores del CSIC³ y de las universidades de Évora y Sevilla comprobó, mediante espectrometría de masas de ultraalta resolución, que las actuaciones de restauración aplicadas después de un incendio no consiguen recuperar a corto plazo la composición original de la materia orgánica del suelo. Las cubiertas vegetales pueden acelerar algunos procesos, pero la recuperación de la materia orgánica requiere el aporte continuado de restos vegetales y el desarrollo de actividad microbiana durante años.

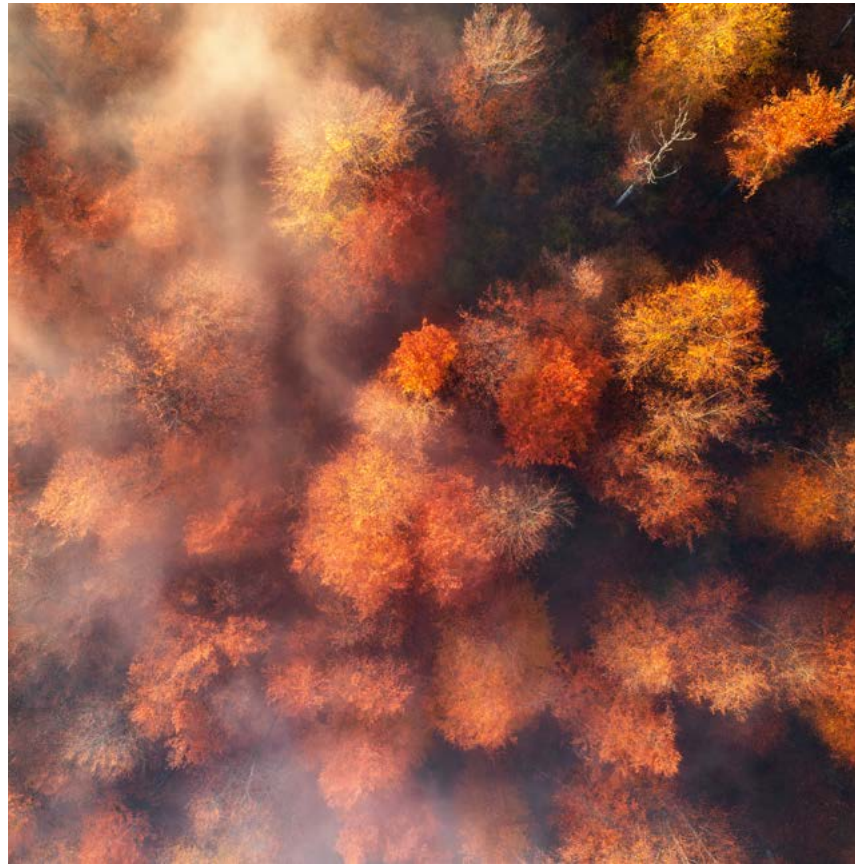
2 Lucas-Borja, M. E. y Zema, D. A. (2025). Surface runoff and soil loss after fire and post-fire treatments in forests of Castilla-La Mancha: a meta-analysis on a 10-year database. *Forest Systems*, 34(2), 20956. Disponible en: <https://doi.org/10.5424/fs/2025342-20956>

3 Jiménez-Morillo et al. (2020). Effect of a wildfire and of post-fire restoration actions in the organic matter structure in soil fractions. *Science of The Total Environment*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138715>



Para evitar que el suelo que queda se pierda con las primeras precipitaciones, es necesario llevar a cabo diferentes actuaciones que dependen de la pendiente, el tipo de suelo, la severidad del fuego y la capacidad de regeneración natural de la vegetación





consumir parte de la biomasa que, si se acumula, se convierte en combustible durante los periodos de sequía. El proyecto europeo LIFE Landscape Fire, desarrollado entre 2019 y 2024 en la región portuguesa de Viseu Dão Lafões y en las comarcas extremeñas de Sierra de Gata, Las Hurdes y Sierra de San Pedro, ha puesto en marcha esta idea combinando quemas prescritas y pastoreo para generar paisajes más resistentes al fuego. Más de 3300 hectáreas fueron objeto de estas actuaciones piloto, entre las que también se incluyeron formación, cercados móviles y sistemas de vallado virtual para dirigir el pastoreo hacia las áreas en las que era necesario reducir la biomasa. Esta metodología se ha implementado con éxito en zonas de Andalucía y Cataluña.

La prevención puede actuar también directamente sobre la estructura del bosque. La selvicultura preventiva incluye podas, desbroces y reducción de la densidad del

arbolado para disminuir la cantidad de combustible y crear discontinuidades que dificulten la propagación del fuego, en especial en las zonas más expuestas, en puntos estratégicos o alrededor de áreas habitadas.

En este último caso es importante reducir el combustible alrededor de las construcciones y, al mismo tiempo, evitar que las propias edificaciones y sus alrededores se conviertan en nuevos focos de propagación.

A estas medidas se suma la vigilancia para detectar un incendio durante sus primeras fases. A escala europea, el EFFIS integra datos sobre peligro de incendio, focos activos y superficie afectada y permite seguir la evolución de los incendios casi en tiempo real.

Ante unas condiciones climáticas que ya están cambiando, una gestión integral del paisaje puede reducir la vulnerabilidad del territorio y mejorar su resiliencia frente a los fenómenos extremos. ■

Residuos en custodia

De los vertidos al mar a la actual cadena de barreras, vigilancia y conocimiento

Durante las primeras décadas de la industria nuclear, el océano llegó a considerarse un destino admisible para determinados residuos radiactivos. Hoy la gestión se apoya en un principio opuesto: conocer cada residuo, acondicionarlo, confinarlo mediante barreras sucesivas y mantener una cadena de vigilancia, información y responsabilidades durante décadas. Custodiar no consiste simplemente en guardar.



■ Texto: **Diego Rodríguez**

Un residuo radiactivo no llega solo a su destino. Lo acompaña una identidad técnica: de dónde procede, qué radionucleidos contiene, cuál es su actividad, qué forma física y química presenta y qué requisitos debe cumplir el bulto que lo contiene. Esa información condiciona su transporte, el lugar que ocupará, los controles que recibirá y la solución prevista para el final de su recorrido.

La imagen habitual de un almacén –un espacio donde algo se deposita y queda inmóvil– resul-

ta insuficiente. El confinamiento material forma parte de un sistema más amplio: hay barreras de acero y hormigón, pero también criterios de aceptación, autorizaciones, inspecciones, programas de vigilancia, registros, recursos económicos y equipos capaces de intervenir. La seguridad depende de que todos esos elementos sigan formando una cadena.

Cuando alejar parecía resolver

La historia de esta custodia no empezó con las soluciones ac-

tuales. Durante décadas, varios países arrojaron al mar bidones con residuos radiactivos acondicionados: en el Atlántico noroccidental fueron depositados más de doscientos mil entre 1946 y 1990, según los datos del Centro Nacional para la Investigación Científica (CNRS) francés, a más de cuatro mil metros de profundidad. La distancia a la costa y la capacidad de dispersión del océano formaban parte del razonamiento con el que se evaluaba entonces esta práctica.



Barril muy degradado con derrame de material radiactivo / NODSSUM Cruise, CNRS, Flotte Océanographique Française.

Conviene evitar una reconstrucción demasiado cómoda del pasado. Los vertidos no se realizaban en ausencia de criterio técnico; se estudiaban emplazamientos y se establecían mecanismos internacionales de control. Lo que ha cambiado es el principio que organiza la gestión. Allí donde se confiaba en alejar y diluir, hoy se exige caracterizar, contener, aislar y demostrar la seguridad de cada etapa.

El Convenio de Londres, en vigor desde 1975, sometió los vertidos al mar a un marco internacional; las enmiendas de 1993 prohibie-

ron el de residuos radiactivos de baja actividad y el Protocolo de 1996 invirtió la regla general, que pasó a ser la prohibición salvo una relación limitada de materiales autorizables.

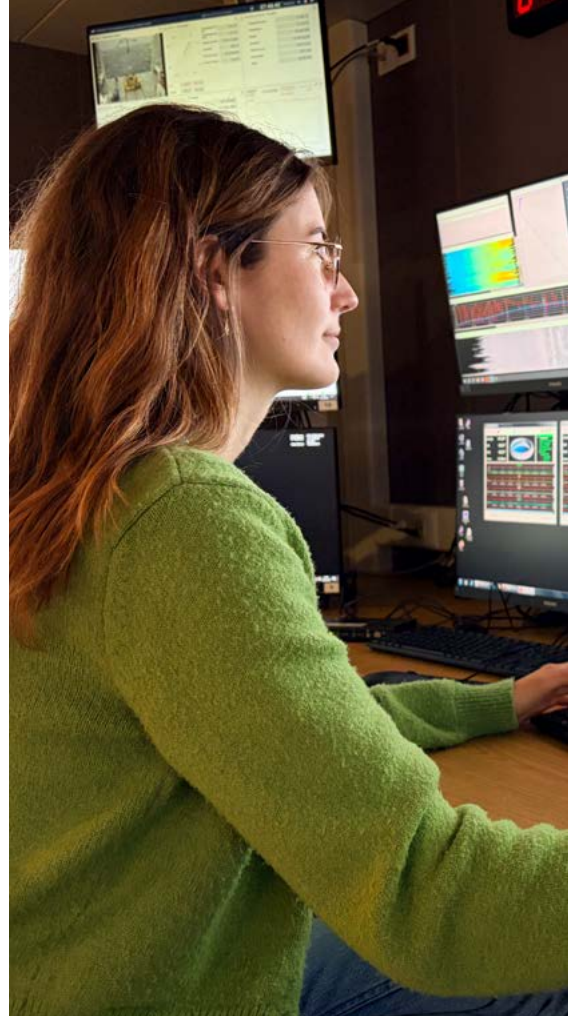
Los residuos sumergidos no desaparecieron con el cambio normativo. En 2025 y 2026, las campañas NODSSUM (Nuclear Ocean Dump Site Survey and Monitoring), proyecto de cartografiado y seguimiento de los lugares de vertido de residuos nucleares en el océano, regresaron a la zona de vertido con medios impensa-

bles en los primeros estudios. El vehículo autónomo *UlyX*, en sus primeras inmersiones científicas, localizó con un sonar interferométrico de alta resolución más de 3500 bidones en 165 km². Esa cartografía permitió seleccionar las áreas que en 2026 inspeccionó el submarino habitado *Nautil*, que tomó muestras de sedimento, agua y biota.

«La primera conclusión es que los barriles están degradados, aunque en grado variable: todos muestran corrosión, algunos están abiertos y con su contenido vertido, y otros completamente



Nautile siendo izado por el buque de investigación Pourquoi Pas? al finalizar una inmersión a 4700 metros de profundidad en el emplazamiento de vertido de residuos radiactivos del Atlántico nororiental, durante la campaña NODSSUM 2026 / NODSSUM Cruise, CNRS, Flotte Océanographique Française.



Los vertidos no se realizaban en ausencia de criterio técnico; se estudiaban emplazamientos y se establecían mecanismos internacionales de control

desintegrados», resume Javier Escartín, director de investigación del CNRS en la École Normale Supérieure de París y corresponsable científico de NODSSUM. Los equipos han observado también que los bidones sirven de sustrato a la vida abisal y aparecen colonizados por anémonas y corales. Han detectado radionucleidos artificiales con los instrumentos de a bordo, pero evaluar su dispersión, biodisponibilidad y posible impacto ambiental depende de los análisis de laboratorio en curso.

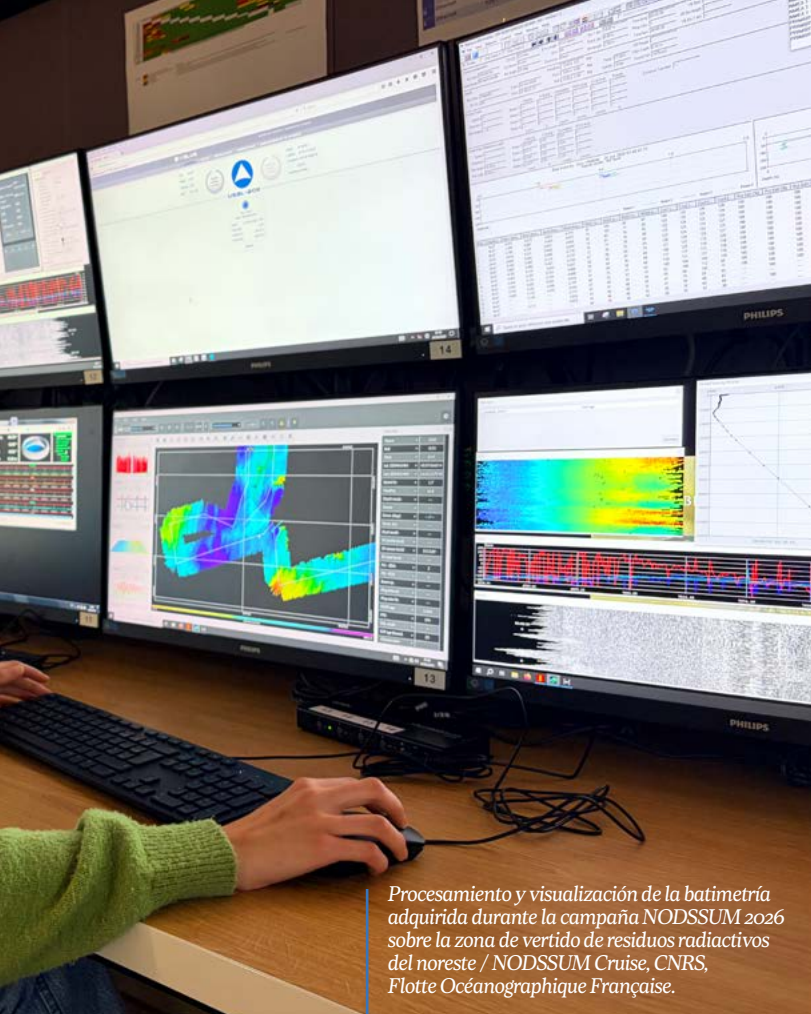
Sus respuestas introducen un matiz importante en la lectura histórica. Las zonas de vertido y

las cantidades aproximadas eran conocidas; la incógnita era la posición exacta de los recipientes. Los estudios de impacto de los años ochenta no disponían de la cartografía actual, y sus medidas no podían situarse respecto a cada barril. «No se trata en ningún caso de identificar el origen de los barriles y establecer su trazabilidad», precisa Escartín. El objetivo, añade, es desarrollar métodos de muestreo, protocolos y experiencia aplicables a futuros estudios científicos y ambientales.

El cambio de principio

La gestión contemporánea comienza antes de que exista el





Procesamiento y visualización de la batimetría adquirida durante la campaña NODSSUM 2026 sobre la zona de vertido de residuos radiactivos del noreste / NODSSUM Cruise, CNRS, Flotte Océanographique Française.



Extracción de agua de los sedimentos muestreados mediante sondeos por el Nautille en el sitio de vertido de residuos radiactivos del Atlántico nororiental, a una profundidad de 4700 m, durante la campaña NODSSUM 2026 / NODSSUM Cruise, CNRS, Flotte Océanographique Française.



Muestras de agua obtenidas durante una inmersión del Nautille a 4700 m de profundidad, en las inmediaciones de barriles que contenían residuos radiactivos en el Atlántico nororiental (NODSSUM 2026) / NODSSUM Cruise, CNRS, Flotte Océanographique Française.

bulto. El primer objetivo es reducir la generación de residuos en la medida razonablemente posible y separar los materiales según sus características. Después se suceden la caracterización, el tratamiento, el acondicionamiento en una forma estable, el almacenamiento, el transporte y, para las corrientes que cuentan con una solución final, el almacenamiento definitivo. Cada paso debe ser compatible con el siguiente: compactar o solidificar un material no resuelve nada si el resultado no puede transportarse, aceptarse en la instalación de destino o mantenerse en condiciones seguras durante el periodo previsto.

También ha cambiado el significado de la demostración de seguridad. No basta con afirmar que un sistema es resistente: deben identificarse sus funciones, los sucesos que podrían afectarlo y las medidas de vigilancia o intervención. Las instalaciones pasan por procesos de autorización y supervisión; los titulares mantie-

nen responsabilidades operativas, Enresa gestiona los residuos que asume dentro del sistema nacional y el Consejo de Seguridad Nuclear evalúa e inspecciona en el ámbito de sus competencias. La custodia es, por tanto, material e institucional.

El lenguaje distingue, además, entre guardar durante un periodo limitado y proporcionar una solución final. El almacenamiento temporal conserva la posibilidad de recuperar el material para inspeccionarlo, repararlo o trasladarlo; el definitivo está concebido como el final de la gestión. Confundir ambos crea una falsa sensación de continuidad, ya que una instalación temporal puede funcionar durante décadas, pero su prolongación no la convierte en una solución definitiva.

No existe un único residuo radiactivo

La palabra «residuo» reúne materiales muy distintos: ropa, filtros o herramientas contaminadas; fuentes empleadas en medicina,



EVA NOGUERO

DIRECTORA DEL CENTRO
EL CABRIL

A la llegada a El Cbril se repiten los controles documentales y físicos, y toda la información se carga en el Sistema de Gestión de Residuos, que permite conocer en cualquier momento su identificación, actividad, tratamiento aplicado y ubicación



Amanecer en la instalación de El Cbril / El Cbril, Enresa.

industria o investigación; hormigones y metales de un desmantelamiento; o el combustible gastado descargado de un reactor. Sus necesidades de gestión no dependen de una etiqueta genérica, sino de propiedades concretas.

La clasificación española para la gestión final considera la actividad inicial y el periodo de semidesintegración de los radionucleidos predominantes. Distingue residuos de muy baja actividad, de baja y media actividad y de alta actividad, con subdivisiones según contengan radionucleidos de vida corta y media –periodos inferiores a treinta años– o de vida larga. El combustible gastado es el principal exponente de los de alta actividad: contiene radionucleidos de vida larga y

sigue generando calor tras salir del reactor. De ahí que no exista un contenedor universal.

En España, El Cbril, en Hornachuelos (Córdoba), recibe residuos de muy baja, baja y media actividad que cumplen sus criterios de aceptación. Los de baja y media actividad, acondicionados en bidones, se disponen en contenedores de hormigón y se inmovilizan con mortero; ese conjunto ocupa las celdas de almacenamiento. Los de muy baja actividad tienen celdas propias, excavadas y aisladas con barreras arcillosas y láminas de polietileno.

La llegada de un bulto no es el comienzo de su identificación. Antes de aceptarlo debe com-

probarse que su contenido y su acondicionamiento responden a la documentación y a los límites establecidos.

«Antes de retirar los residuos, Enresa comprueba que cada bulto dispone de un documento de aceptación vigente y que su tasa de dosis y su actividad coinciden con lo declarado por el productor», explica Eva Noguero, directora del centro. «A la llegada a El Cbril se repiten los controles documentales y físicos, y toda la información se carga en el Sistema de Gestión de Residuos, que permite conocer en cualquier momento su identificación, actividad, tratamiento aplicado y ubicación». Esos registros se consideran permanentes. La Instrucción IS-24 del Consejo de



Carga de bultos de RBMA en un contenedor CE2a / El Cabil, Enresa.



Residuos radiactivos de muy baja actividad acondicionados en la celda 30 de la instalación complementaria de almacenamiento de este tipo de residuos / El Cabil, Enresa.



Contenedor de material radiactivo / OIEA.



Celda de almacenamiento / El Cabil, Enresa.

Seguridad Nuclear obliga a conservarlos durante toda la vida útil de la instalación, por duplicado y en archivos separados.

Del agua al almacenamiento en seco

El recorrido del combustible gastado obedece a otra escala. Al descargarse del núcleo, los productos de fisión siguen desintegrándose y generan calor residual, por lo que los elementos permanecen inicialmente en piscinas. El agua ayuda a extraer ese calor y actúa como blindaje frente a las radiaciones ionizantes.

Con el tiempo disminuyen la actividad y la potencia térmica residual. Tras el enfriamiento previsto, y comprobado el cum-



Entrada del Centro de Información de El Cabril / El Cabril, Enresa.



Nave de fabricación de contenedores / El Cabril, Enresa.

plimiento de los requisitos aplicables, el combustible puede transferirse a contenedores de almacenamiento en seco. En España se ubican en almacenes temporales individualizados (ATI) dentro de los emplazamientos de las centrales.

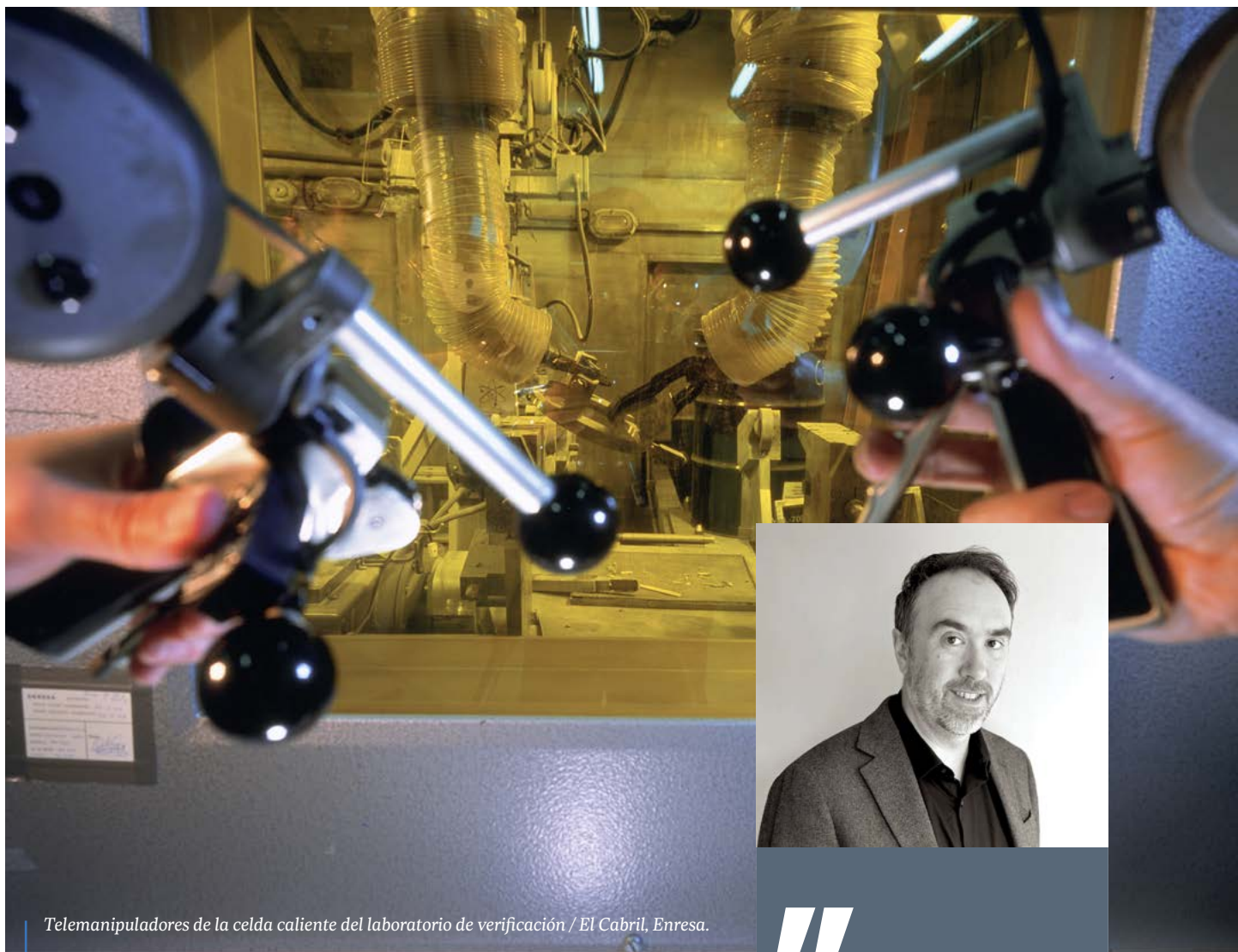
Un contenedor debe mantener a la vez varias funciones de seguridad: confinamiento de las sustancias radiactivas, blindaje, evacuación del calor y mantenimiento de la subcriticidad. Los diseños las resuelven de maneras distintas –cuerpos metálicos con bastidores que fijan la geometría del combustible, cápsulas soldadas en módulos de hormigón–, y en varios la circulación natural del aire basta para evacuar el calor sin refrigeración activa.

Esa característica suele resumirse como «seguridad pasiva», pero el término puede inducir a error. Pasivo describe el modo en que se cumple una función –por propiedades físicas, gravedad o convección natural–, no la ausencia de control. Durante el almacenamiento se vigilan parámetros, se inspeccionan las instalaciones, se conserva la capacidad de actuar y se evalúa el comportamiento de estructuras, componentes y materiales a medida que envejecen.

El 7.º Plan General de Residuos Radiactivos, aprobado en diciembre de 2023, prevé mantener el combustible gastado, los residuos de alta actividad y determinados residuos especiales en los emplazamientos de las centrales mediante una estrategia de alma-

cenamiento temporal descentralizado. Los siete futuros almacenes temporales descentralizados (ATD) incorporarán los ATI y los medios para mantener y reparar contenedores y garantizar su recuperabilidad, y operarán hasta el traslado de los materiales a un almacén geológico profundo, cuya puesta en marcha se sitúa, dentro de la planificación vigente, en 2073.

La fecha ordena actuaciones, inversiones y necesidades técnicas; no convierte el intervalo en un tiempo vacío. Habrá que operar instalaciones que pueden sobrevivir a las centrales para las que se construyeron, renovar autorizaciones y gestionar el envejecimiento. El cierre de una



Telemanipuladores de la celda caliente del laboratorio de verificación / El Cabril, Enresa.

central no cierra la historia de su combustible.

La barrera que no se ve

Una instalación puede diseñarse para resistir durante décadas, pero ninguna plantilla permanece intacta todo ese tiempo: se jubilan especialistas, cambian contratistas y se reorganizan instituciones. La documentación debe seguir siendo localizable e inteligible cuando ya no estén quienes tomaron las primeras decisiones, y eso no consiste solo en archivar informes: incluye las hipótesis de diseño, los resultados de inspección, los criterios con los que se aceptó un material y la experiencia que permite interpretarlo. Si una organización sabe qué contiene un sistema y

por qué se decidió así, puede detectar desviaciones y responder. Cuando esa información se fragmenta o depende de unas pocas personas, disminuye la capacidad de actuar aunque la instalación física no haya cambiado.

Pensar por relevos

El antropólogo Vincent Ialenti, investigador sénior de la Universidad de Tampere, estudió entre 2012 y 2014, durante 32 meses de trabajo de campo, a los especialistas que elaboraban el estudio de seguridad del programa finlandés de almacenamiento geológico. Su investigación encontró el tiempo profundo en un lugar poco espectacular: oficinas, modelos, reuniones, jubilaciones, archivos y relevos profesionales.



VINCENT IALENTI

ANTROPÓLOGO E
INVESTIGADOR SÉNIOR DE LA
UNIVERSIDAD DE TAMPERE

Los registros capturan el pensamiento como sustantivo: un artefacto acabado y archivado del pasado. No capturan el pensar como verbo: el juicio vivo que decide qué hipótesis importa, qué modelo merece confianza o cómo sopesar una incertidumbre frente a un plazo



Piscina de combustible gastado de la unidad 2 de la central nuclear Brunswick.

Uno de los episodios que documentó fue la muerte, en 2005, de un especialista al que se refiere con el seudónimo de Seppo. Durante unos quince años había sido uno de los principales modelizadores de la evaluación de seguridad del repositorio, y sus colegas describían el proyecto como «un espectáculo de un solo hombre». Su fallecimiento repentino detuvo en seco parte del trabajo. Buena parte de lo que sabía era conocimiento tácito, adquirido en años de práctica y nunca trasladado a un manual, y él mismo era reacio a documentar las hipótesis de sus propios cálculos. Sus sucesores tuvieron que practicar una suerte de «arqueología forense» de una mente, rastrear carpetas y descifrar notas al margen. Parte del conocimiento pudo recuperarse; otra parte se perdió.

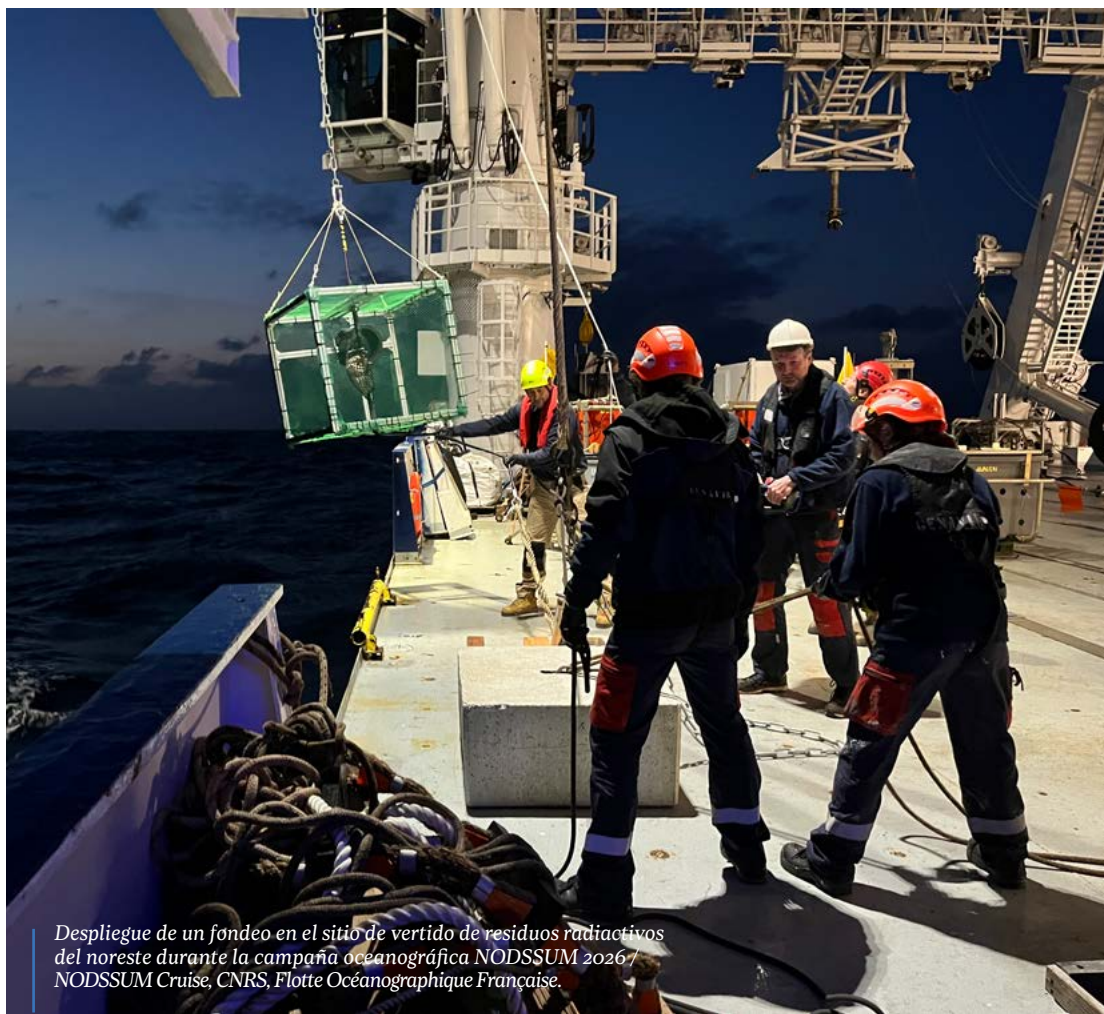


Durante la operación, la seguridad vive en las personas: en quienes vigilan los contenedores, en los reguladores que inspeccionan, en las instituciones que miden, mantienen e intervienen

La lección institucional fue dejar de concentrar conocimiento vital en un único especialista y repartir responsabilidades en un equipo más amplio. Ialenti subraya una ironía instructiva: las reformas posteriores –describir las incertidumbres con más transparencia, documentar cómo se construyó cada modelo y dónde estaban sus lagunas– eran precisamente los cambios burocráticos que aquel experto había detestado en vida. Y advierte de que la muerte es la

forma más brusca de perder a un experto, pero no la única: la jubilación drena el mismo conocimiento tácito más despacio y, por parecer ordenada, se afronta con menos urgencia.

«Los registros capturan el pensamiento como sustantivo: un artefacto acabado y archivado del pasado. No capturan el pensar como verbo: el juicio vivo que decide qué hipótesis importa, qué modelo merece confianza o cómo sopesar una incertidumbre



Despliegue de un fondeo en el sitio de vertido de residuos radiactivos del noreste durante la campaña oceanográfica NODSSUM 2026 / NODSSUM Cruise, CNRS, Flotte Océanographique Française.

frente a un plazo», explica. «El verdadero trabajo de la sucesión no consiste solo en transferir documentos, sino en cultivar intérpretes vivos capaces de llevar adelante el razonamiento de sus predecesores».

La lección no obliga a cada profesional a representar mentalmente cien mil años antes de tomar una decisión cotidiana. «Dividir el tiempo profundo en periodos manejables es una condición previa para actuar con responsabilidad con el combustible gastado», sostiene Ialenti. «El cerebro humano no puede abarcar un millón de años de una sola vez. Tomado sin dividir, el tiempo profundo tiende a paralizar», afirma. La segmentación fue lo que permitió a los especialistas finlandeses no quedarse inmóviles ante la escala del problema. El horizonte lejano orienta el

objetivo; los periodos próximos lo convierten en inspecciones, revisiones y transferencias de conocimiento realizables. Dividir la responsabilidad en etapas puede hacerla gobernable, siempre que cada una entregue a la siguiente instalaciones seguras, información comprensible y capacidad real de decidir. La diferencia entre una estrategia gradual y una postergación reside en la calidad de ese relevo.

El límite de la vigilancia

El modelo actual ha sustituido la lógica de alejar y dispersar por otra basada en conocer, contener y demostrar. Ha permitido asignar soluciones distintas a materiales diferentes y mantener la posibilidad de intervenir durante el almacenamiento temporal. Pero ninguna de esas tareas sucede una sola vez: la custodia se

renueva en cada control, en cada revisión y en cada relevo.

Mientras los residuos permanezcan bajo custodia activa, será posible inspeccionarlos, mantener las instalaciones y actuar si aparece un problema. «Durante la operación, la seguridad vive en las personas: en quienes vigilan los contenedores, en los reguladores que inspeccionan, en las instituciones que miden, mantienen e intervienen», señala Ialenti. «La seguridad pasiva, en cambio, pide que la seguridad emigre de las manos humanas a la materia». Cuando esa cadena se proyecta hacia siglos y milenios, la pregunta cambia: ya no se trata únicamente de quién custodiará los residuos, sino de cómo hacer que sigan siendo seguros cuando la custodia humana deje de poder darse por supuesta. ■

La cadena invisible

Veinte millones de envíos al año sostienen la medicina nuclear, la industria y el ciclo del combustible. Su principal amenaza no es un accidente, sino un rechazo

Transporte desde la central nuclear Cofrentes / Enresa.

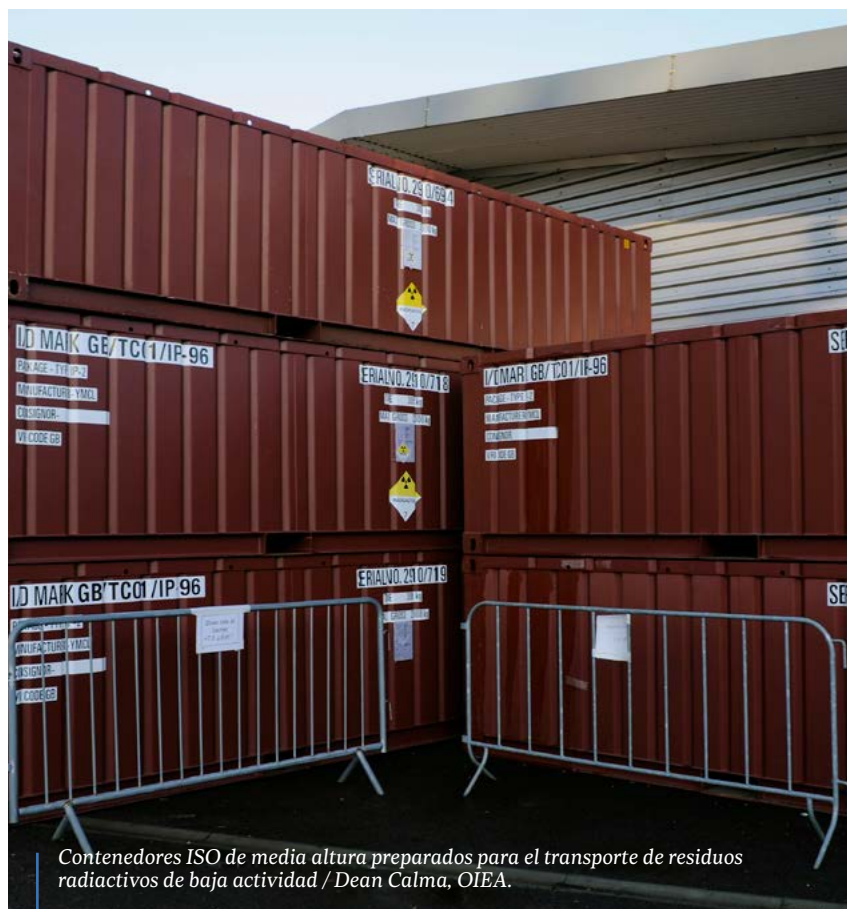
Cada año se mueven por el mundo unos veinte millones de envíos de material nuclear y radiactivo para usos pacíficos. A lo largo de más de sesenta años ninguno ha provocado un incidente de transporte con consecuencias radiológicas significativas. La cadena que lo consigue es tan fiable que resulta invisible. Por eso apenas llama la atención el problema que la amenaza: no un accidente en la carretera, sino la negativa de un puerto, un aeropuerto o un transportista a aceptar una expedición que cumple toda la reglamentación.

■ Texto: Segundo Diéguez

La cifra, que maneja el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), reúne realidades distintas: radiofármacos camino de un servicio de medicina

nuclear, fuentes selladas para equipos industriales, materiales para investigación y agricultura y todo el ciclo del combustible, de los concentrados de uranio al combustible

fabricado. La inmensa mayoría contiene cantidades pequeñas de material radiactivo. Ninguna es noticia, y ahí está el indicio de que el sistema funciona.



Contenedores ISO de media altura preparados para el transporte de residuos radiactivos de baja actividad / Dean Calma, OIEA.

Buena parte de ese tráfico viaja por aire por una razón física, no logística: los isótopos de diagnóstico decaen mientras se desplazan. El molibdeno-99, del que se obtiene el tecnecio-99m usado en la mayoría de las exploraciones de medicina nuclear en el mundo, tiene un periodo de semidesintegración de unas 66 horas; el propio tecnecio-99m, de seis, y el flúor-18 de la tomografía por emisión de positrones no llega a las dos. Un generador que sale de Europa hacia un hospital lejano llega con menos actividad de la que tenía al partir, y cada escala o trámite aduanero resta producto útil.

Esa aritmética convierte la puntualidad en un requisito clínico. Un retraso no encarece un envío de radiofármacos, pero lo degrada.

Por eso la diferencia práctica entre un rechazo y una demora tiende a desaparecer. Ambas terminan en lo mismo, una exploración o un tratamiento que no se hace.

El embalaje responde por el contenido

La fiabilidad de esa cadena no descansa donde suele imaginarse. La seguridad en el transporte de material radiactivo se apoya ante todo en el diseño de los embalajes, junto con la preparación, señalización y documentación del contenedor –el embalaje más su contenido–. Persigue cuatro objetivos: confinar el material, controlar la radiación exterior, prevenir la criticidad –una reacción en cadena no controlada– con materiales fisiónables y evitar

los daños causados por el calor de determinados contenidos.

El sistema es graduado. La reglamentación distingue bultos exceptuados, industriales y de los tipos A, B y C, con requisitos que crecen con el riesgo potencial del contenido, más disposiciones específicas para los materiales fisiónables y el hexafluoruro de uranio. De ahí una característica que suele sorprender. Si contenido, embalaje y condiciones cumplen lo establecido, la mayoría de las expediciones no requiere autorización previa ni depende de un permiso individual antes de cada salida. Solo determinados diseños y expediciones se someten a aprobación, con evaluación técnica del regulador.

Las obligaciones, en cambio, se reparten de forma exhaustiva. El expedidor responde de la preparación, el marcado, el etiquetado y la documentación de los contenedores; el transportista, de la formación de su personal, del estado de los vehículos y de la estiba. Por eso una inspección de transporte se parece poco a un control de carretera. No se mira sobre todo el vehículo, sino los papeles, las etiquetas, las medidas radiológicas y la formación de quien manipula la carga.

Nueve metros de caída sobre una superficie indeformable

Los embalajes de mayores prestaciones deben demostrar que conservan sus funciones de seguridad en condiciones de accidente severo. Para los de tipo B eso incluye una caída libre desde nueve metros sobre una superficie indeformable,

una perforación por caída sobre barra, un ensayo térmico a 800 °C durante media hora y otro de inmersión, en las condiciones más desfavorables.

Esas cifras no son arbitrarias. El CSN calcula que, para causar en un contenedor el daño de la caída de nueve metros, haría falta un accidente real con una velocidad de impacto de entre 65 y 120 km/h contra un material duro, como la roca o el hormigón, y de entre 100 y 300 contra otros más blandos, como el suelo, el agua o la estructura de un vehículo.

El criterio de éxito desmiente una intuición común. No se exige que el embalaje salga intacto de cualquier accidente, ya que puede deformarse y quedar inservible. Lo que debe conservar son las funciones que importan: la contención del ma-

Cinco tipos de contenedor

No hay un embalaje único para «lo radiactivo»: la reglamentación define cinco tipos, con exigencias crecientes según el riesgo del contenido.



Convoy para el transporte por carretera de residuos radiactivos de alta actividad. Cherburgo, Francia / Dean Calma, OIEA.

Tipo de contenedor	Qué contiene	Qué condiciones debe soportar	Aprobación de diseño
Exceptuado	Cantidades muy pequeñas, fracciones de los valores A1 y A2. Instrumentos y artículos manufacturados, uranio o torio natural, embalajes vacíos.	Solo las condiciones rutinarias del transporte. Está exceptuado de la mayoría de los requisitos de embalaje y señalización.	No
Industrial (BI-1, BI-2, BI-3)	Materiales de baja actividad específica (BAE) y objetos contaminados en superficie (OCS). Es el embalaje habitual de los residuos de baja y media actividad.	El BI-1, solo condiciones rutinarias. El BI-2 y el BI-3, ensayos de condiciones normales: caída, apilamiento, aspersión con agua y penetración.	No
Tipo A	Actividades relativamente pequeñas, por debajo de los valores A1 o A2 de cada radionucleido. Es el contenedor habitual del radiofármaco y de la fuente de uso médico e industrial.	Ensayos de condiciones normales de transporte, con pruebas adicionales si el contenido es líquido o gaseoso. No se diseña para accidente.	No
Tipo B (B(U) y B(M))	Actividades superiores a A1 o A2. Fuentes de radioterapia, equipos de gammagrafía industrial y contenedores de combustible irradiado.	Además de las normales, condiciones de accidente: caída de nueve metros sobre superficie indeformable, perforación, aplastamiento cuando procede, fuego a 800 °C durante 30 minutos e inmersión.	Sí (unilateral en el B(U), multilateral en el B(M))
Tipo C (solo vía aérea)	Altas actividades destinadas al transporte aéreo.	Los ensayos del tipo B y otros más severos que simulan un accidente aéreo: impacto a 90 m/s, fuego a 800 °C durante una hora e inmersión reforzada a 200 metros.	Sí

A1 y A2 son valores de actividad que varían por radionucleido según su radiotoxicidad: A1 rige para material en forma especial –sólido no dispersable o cápsula sellada– y A2 para el resto. A los contenedores con sustancias fisiónables y hexafluoruro de uranio se les exigen requisitos añadidos. Alrededor del 90 % de los contenedores son exceptuados o de tipo A, según el CSN, y no precisan aprobación previa del diseño.



Precintado del vehículo tras la inspección / Dean Calma, OIEA.



El OIEA llama denegación de expedición al rechazo de un puerto, un aeropuerto o un transportista a aceptar un envío que cumple la reglamentación

terial, un blindaje suficiente y, con materiales fisionables, la subcriticidad. La pregunta tras un golpe no es si el contenedor presenta daños visibles, sino si afectan a lo que el diseño debía garantizar.

Una carga que cumple y nadie quiere llevar

Con ese aparato técnico resuelto, el punto débil de la cadena se ha desplazado. El OIEA llama denegación de expedición al rechazo de un puerto, un aeropuerto o un transportista a aceptar un envío que cumple la reglamentación. No

es un episodio aislado, sino que es cotidiano en todo el mundo y lleva más de dos décadas en la agenda internacional. A las denegaciones se suman las demoras, más frecuentes en la práctica y, con isótopos de vida corta, igual de destructivas.

El diagnóstico incomoda por lo que descarta. El problema ya no es la falta de reglamentación internacional, sino su aplicación desigual. Entre las barreras figuran las interrupciones del transporte aéreo, la aceptación limitada de aerolíneas y aeropuertos, las diferencias entre

normativas nacionales, la falta de armonización y el desconocimiento, que hace que la percepción del riesgo pese más que el beneficio para el paciente. Dicho de otro modo, la carga es segura, está autorizada y viaja en un contenedor ensayado, y aun así alguien decide no subirla al avión.

La respuesta usa instrumentos modestos. Una red de puntos focales nacionales –personas a las que acudir cuando una expedición se atasca– que alcanza ya a 72 países, y un grupo de trabajo sobre denegaciones para 2023-2026 con 75 representantes de 30 Estados miembros y tres organizaciones internacionales. Hay también formación dirigida a las administraciones aduaneras, un cuello de botella habitual. El OIEA repite ante los operadores aéreos que un transporte fiable es parte de la asistencia sanitaria y que no resolverlo equivale a una crisis sanitaria de baja intensidad y larga duración.



Transporte de seguridad de material radiactivo / Dean Calma, OIEA.



Enresa acumula más de cuarenta años de actividad, más de 7500 expediciones de residuos de baja y media actividad y más de 5,6 millones de kilómetros

Viena, marzo de 2026

Ese fue el telón de fondo de la conferencia internacional sobre transporte seguro y protegido de material nuclear y radiactivo que el OIEA celebró en Viena del 23 al 27 de marzo de 2026, con cerca de quinientos expertos y decisores; era la tercera de una serie, tras las de 2011 y 2021. Junto a los asuntos clásicos, el programa incorporó cuestiones que hace quince años no habrían tenido sitio, como drones e inteligencia artificial, el transporte de reactores modulares pequeños y de

centrales nucleares flotantes y la sostenibilidad de la cadena de suministro de radiofármacos.

La conferencia coincidió con la publicación de la edición de 2025 del reglamento del OIEA para el transporte seguro de materiales radiactivos, que actualiza la de 2018. Llegó tras examinar cerca de trescientas propuestas de los países miembros, revisadas por un panel internacional, y trajo dos novedades de fondo: plazos para retirar los contenedores diseñados

con normas ya superadas y disposiciones sobre los efectos del envejecimiento en su diseño.

Conviene no confundir la publicación con la aplicación. El reglamento del OIEA es recomendatorio; su contenido se traslada luego a las normas de obligado cumplimiento de cada modo de transporte, y los requisitos vigentes siguen siendo los de 2018. Ese desfase explica que la nueva edición se discutiera en Viena mientras los transportes seguían rigiéndose por la anterior.

El eslabón español

España participa en las dos direcciones. En la de entrada, con el suministro de material radiactivo para aplicaciones médicas e industriales, que llega sobre todo por aire y se reparte por carretera en contenedores pequeños hasta



Escáner de código de barras para seguimiento de paquetes / Dean Calma, OIEA.



Señalización de un transporte de residuos radiactivos de baja y media actividad / Enresa.

hospitales y centros. En la de salida, con la retirada de residuos. En 2025 llegaron al Centro de Almacenamiento de El Cabril, en Hornachuelos (Córdoba), 2442 m³ en 280 expediciones, y Enresa acumula más de cuarenta años de actividad, más de 7500 expediciones de residuos de baja y media actividad y más de 5,6 millones de kilómetros.

El control recae en el CSN, y su informe anual de inspecciones señala las tensiones reales. El último disponible, del periodo de noviembre de 2023 a octubre de 2024, recoge 62 inspecciones con desviaciones en 11 y tres apercebimientos, motivados por una dosimetría personal incorrecta, incumplimientos del ADR y de los programas de protección radiológica y de garantía de calidad y deficiencias en la formación exigida por la Instrucción IS-38. La mayo-

ría no fueron significativas para la seguridad, pero se concentraron en expedidores y transportistas del suministro médico e industrial, el sector prioritario para el regulador. Es, otra vez, la cadena del radiofármaco y no la del residuo.

La experiencia operativa apunta igual. De los ocho sucesos notificados en ese periodo, dos se produjeron en el acarreo y almacenamiento de contenedores en terminales aeroportuarias, dos por arrastre de vehículos durante la riada de Valencia, tres por robos de vehículos y uno por el etiquetado de los sobreembalajes. Ninguno tuvo su origen en un accidente de carretera. Entre 2017 y 2024 la media fue de unos seis sucesos anuales, la mayoría por debajo de la escala internacional INES.

El marco nacional también se ha movido. El Real Decreto 1217/2024 añadió requisitos de registro para los transportistas de materiales radiactivos por vía terrestre en contenedores no exceptuados, incluida la exigencia de un programa de protección radiológica aplicable al transporte antes de la inscripción.

Sesenta años sin un incidente de transporte con consecuencias radiológicas significativas son un aval difícil de mejorar, y explican por qué esta infraestructura no aparece en los titulares. El problema de una cadena diseñada para no fallar es que su fragilidad se traslada a otro sitio. Hoy no está en el contenedor, que resiste nueve metros de caída y media hora de fuego, sino en la decisión de un operador que prefiere no cargarlo. ■

Silvia Calzón Fernández

Consejera del CSN, exsecretaria de Estado de Sanidad, epidemióloga y especialista en medicina preventiva y salud pública

«La seguridad no se mide únicamente por cómo se responde a una incidencia, sino también por la capacidad de evitar que llegue a producirse»

Médica especialista en medicina preventiva y salud pública, epidemióloga y exsecretaria de Estado de Sanidad, Silvia Calzón (Sevilla, 1975) forma parte del Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) desde abril de 2025. Su trayectoria profesional ha estado ligada a la prevención, la gestión de riesgos complejos y la dirección de organizaciones sanitarias y políticas públicas, desde la gestión sanitaria hasta la coordinación de la campaña de vacunación frente a la covid-19 y el impulso de políticas públicas de ámbito estatal. En el CSN aporta una visión especialmente vinculada a la protección de la salud, la cultura preventiva y la relación entre innovación, seguridad y confianza pública.

■ Texto: Pablo Santamarta | Fotos: CSN

Ha trabajado en ámbitos muy vinculados a la prevención, la protección de la salud y la gestión de riesgos complejos. ¿Qué paralelismos encuentra entre su experiencia y el trabajo que desarrolla en el CSN?

A lo largo de mi trayectoria he trabajado siempre con un mismo objetivo: proteger la salud de las personas frente a riesgos muy diversos, desde enfermedades transmisibles hasta factores ambientales, laborales o tec-

nológicos. La protección radiológica forma parte también de ese ámbito.

La medicina preventiva y la salud pública me enseñaron que la mejor protección es la que se ejerce antes de que aparezca el daño, mediante la vigilancia, la anticipación y la prevención. Esa misma lógica está muy presente en el trabajo del CSN.

Por eso, encuentro una gran coherencia entre mi trayectoria y la labor del Consejo. Compartimos una misma cultura de prevención y una

misma vocación de servicio público: que el avance científico y tecnológico vaya siempre acompañado de las máximas garantías de seguridad.

¿Hay alguna lección aprendida que considere especialmente útil para un organismo regulador como el CSN?

La gestión sanitaria me enseñó que la seguridad no depende únicamente del conocimiento técnico. También exige organizaciones capaces de coordinar miles de



La mejor protección es la que se ejerce antes de que aparezca el daño, mediante la vigilancia, la anticipación y la prevención



La pandemia puso de manifiesto además el valor de la preparación. Los sistemas más resilientes son aquellos que han invertido previamente en vigilancia, formación, planificación y coordinación

profesionales, gestionar el cambio y compartir objetivos.

Mi etapa en la Administración general del Estado reforzó además la importancia del diálogo entre instituciones, comunidad científica, profesionales y sociedad. Buena parte de mi trabajo ha consistido precisamente en tender puentes entre ámbitos distintos para construir soluciones comunes.

Esa experiencia me resulta especialmente útil en el CSN, donde el rigor técnico debe ir acompañado de cooperación institucional y capacidad de diálogo.

¿Qué aporta una mirada de salud pública a la toma de decisiones de un organismo regulador?

La salud pública aporta una visión integradora del riesgo, que conecta la evidencia científica, la toma de decisiones y el impacto social.

Esa mirada ayuda a plantear preguntas complementarias: cómo anticipar los riesgos, cómo comunicarlos y cómo asegurar que las medidas de protección lleguen efectivamente a trabajadores, pacientes y ciudadanía.

No se trata de sustituir otras perspectivas, sino de complementarlas desde una visión centrada en la protección de la salud de las personas.

La pandemia supuso un escenario inédito en el que hubo que tomar decisiones complejas en un contexto de gran incertidumbre. ¿Qué aprendizajes de aquella experiencia le resultan hoy más útiles en el contexto del CSN?

Una de las principales enseñanzas de aquella etapa fue comprobar que las decisiones complejas rara

vez se toman en condiciones de certeza absoluta. Hay que actuar con la mejor evidencia científica disponible, pero manteniendo siempre la capacidad de revisar y adaptar las decisiones a medida que evoluciona el conocimiento.

La pandemia puso de manifiesto además el valor de la preparación. Los sistemas más resilientes son aquellos que han invertido previamente en vigilancia, formación, planificación y coordinación.

La seguridad se hace más visible cuando falla. ¿Cómo se evalúa y se explica a la sociedad la eficacia de una labor cuyo mejor resultado es que no ocurra nada?

La prevención tiene una peculiaridad: cuando funciona, suele pasar desapercibida. Ocurre con la seguridad alimentaria. Consumimos alimentos cada día con normalidad sin ser conscientes del enorme trabajo de vigilancia, evaluación y control que existe detrás para proteger nuestra salud.

Algo parecido sucede con la seguridad nuclear y la protección radiológica. Cuando los sistemas funcionan adecuadamente, no suelen ocupar titulares. Pero detrás de esa aparente normalidad existe un trabajo continuo de supervisión, evaluación e inspección.

La seguridad no se mide únicamente por cómo se responde a una incidencia, sino también por la capacidad de evitar que llegue a producirse. Por eso es importante explicar cómo se construye esa seguridad, qué controles existen y cómo se toman las decisiones.

En ese sentido, el CSN comparte una característica con muchas actividades de salud pública:



una parte importante de su éxito consiste precisamente en que los riesgos estén identificados, controlados y sometidos a vigilancia permanente.

Hablar de seguridad conduce casi siempre a infraestructuras o tecnologías. Sin embargo, usted insiste en las organizaciones y las personas. ¿Hasta qué punto la seguridad es también una cuestión de cultura institucional?

Con frecuencia asociamos la seguridad a infraestructuras, equipos o procedimientos, pero detrás de todos ellos siempre hay personas y organizaciones que toman decisiones.

La experiencia me ha enseñado que los mejores resultados se alcanzan cuando existe una cultura compartida de responsabilidad, aprendizaje y mejora continua.

La cultura de seguridad del ámbito nuclear destaca precisamente por esa capacidad de anticipación y aprendizaje continuo.



Una institución moderna debe aspirar no solo a ser transparente, sino también a ser comprensible

En definitiva, la tecnología es imprescindible, pero la seguridad también es una cuestión de valores, comportamientos y compromiso colectivo.

¿Es posible gestionar riesgos complejos sin una verdadera cultura de cooperación institucional?

No lo creo. Los riesgos complejos rara vez pueden gestionarse desde una única institución o disciplina. Cuanto más complejo es un riesgo, más necesario resulta integrar conocimientos, capacidades y responsabilidades diferentes.

La seguridad nuclear y la protección radiológica responden a esa misma lógica. La cooperación institucional

no es un elemento accesorio, sino una condición necesaria para tomar mejores decisiones y disponer de sistemas de protección más eficaces.

Transparencia no significa únicamente publicar más información. ¿Qué distingue a una institución que informa de otra que consigue que la ciudadanía comprenda y pueda valorar sus decisiones?

La transparencia es una condición necesaria, pero no siempre suficiente. Una institución puede poner a disposición de la ciudadanía una enorme cantidad de información y, aun así, no conseguir que se comprendan sus decisiones.

La diferencia está en la capacidad de contextualizar y explicar qué significan esos datos, qué criterios sustentan una decisión y qué alternativas se han valorado.

Creo que una institución moderna debe aspirar no solo a ser transparente, sino también a ser comprensible. La confianza no se construye únicamente compartiendo información, sino ayudando a que las personas entiendan cómo y por qué se toman las decisiones que les afectan.

En el Ministerio de Sanidad impulsó la incorporación al Sistema Nacional de Salud de tecnologías avanzadas, desde los equipos de alta tecnología del Plan INVEAT hasta la implantación de la protonterapia. ¿Qué ha aprendido sobre el equilibrio entre innovación y seguridad cuando se introducen nuevas tecnologías sanitarias?

Una de las principales lecciones que he aprendido es que la innovación



*La clave está en
acompañar la
velocidad de la
innovación con
la preparación
de los sistemas
sanitarios y
la evolución
de los marcos
regulatorios*

y la seguridad no son objetivos contrapuestos. Al contrario, las innovaciones que transforman realmente un sistema sanitario son aquellas que incorporan la seguridad desde el principio.

A menudo asociamos la innovación a la adquisición de una nueva tecnología, pero el verdadero desafío está en conseguir que se integre adecuadamente en el sistema. Eso exige profesionales formados, infraestructuras adecuadas, procedimientos bien definidos y una evaluación continua de los resultados.

Cada avance tecnológico plantea nuevos retos y exige reforzar capacidades en formación, protección radiológica e infraestructuras.

Por eso creo que la pregunta no es cuánto tardamos en incorporar una innovación, sino cómo conseguimos hacerlo de manera segura, equitativa y sostenible. La innovación sanitaria solo alcanza todo su potencial cuando el sistema está preparado para integrarla.

La medicina nuclear, la radioterapia y el auge de la teragnosis amplían las posibilidades diagnósticas y terapéuticas, pero plantean nuevas necesidades de producción y suministro de radioisótopos, de formación y de protección radiológica. ¿Está evolucionando la capacidad reguladora al mismo ritmo que estas aplicaciones clínicas?

La capacidad reguladora está evolucionando, pero deberá seguir haciéndolo de forma continua para acompañar unos avances que se producen a gran velocidad. Estamos viviendo un auténtico cambio de paradigma en la medicina nuclear. El desarrollo de la teragnosis y de nuevos radiofármacos está impulsando una medicina cada vez más personalizada, precisa y con mayores posibilidades terapéuticas.

Este avance exige reforzar capacidades en ámbitos como la producción y el suministro de radioisótopos, la formación de los profesionales, las radiofarmacias, las infraestructuras sanitarias, la protección radiológica y la regula-



La seguridad no se logra reaccionando ante los problemas, sino construyendo organizaciones capaces de aprender, anticiparse y mejorar de forma continua

ción. En el ámbito de los radiofármacos, el suministro forma parte de la propia prestación sanitaria.

El reto no consiste solo en garantizar la seguridad, sino en hacerlo de forma que pacientes y profesionales puedan beneficiarse de estas innovaciones con todas las garantías.

En definitiva, la clave está en acompañar la velocidad de la innovación con la preparación de los sistemas sanitarios y la evolución de los marcos regulatorios. Esa combinación de innovación y seguridad será una de las grandes cuestiones de los próximos años.

La cultura de seguridad ocupa un lugar central en el ámbito sanitario y en el de la protección radiológica. ¿Qué elementos considera esenciales para construir organizaciones verdaderamente seguras?

Creo que los principios fundamentales son muy similares en todos los sectores donde la seguridad es crítica. Las organizaciones más seguras no son las que asumen que los errores nunca ocurrirán, sino las que desarrollan mecanismos para identificarlos, analizarlos y aprender de ellos.

En sanidad hemos aprendido mucho sobre el análisis de incidentes, el trabajo multidisciplinar y la necesidad de situar a las personas en el centro de los procesos. Por su parte, la seguridad nuclear cuenta con una larga tradición en metodologías de análisis del riesgo y en cultura de seguridad.

Una de las experiencias más interesantes ha sido precisamente la traslación de algunas de estas metodologías al ámbito sanitario. Proyectos como MARR (matrices de riesgo en radioterapia) y

MARRTA (matrices de riesgo en radioterapia con técnicas avanzadas) han permitido aplicar herramientas de análisis prospectivo de riesgos a los procesos de radioterapia, ayudando a identificar fallos potenciales antes de que lleguen a afectar a pacientes o profesionales.

En el fondo, la principal lección es que la seguridad no se logra reaccionando ante los problemas, sino construyendo organizaciones capaces de aprender, anticiparse y mejorar de forma continua.

¿Qué líneas de investigación considera prioritarias para España en los próximos años?

La protección radiológica se enfrenta a desafíos cada vez más complejos y la investigación seguirá siendo esencial para anticipar riesgos y apoyar decisiones basadas en la evidencia. Creo que serán especialmente relevantes las nuevas aplicaciones médicas de las radiaciones ionizantes, la protección radiológica en un contexto de rápida innovación tecnológica y el aprovechamiento responsable de herramientas como la inteligencia artificial.

¿Por qué cambio concreto le gustaría que se recordara su paso por el Consejo al término de su mandato?

Me gustaría que mi paso por el Consejo contribuyera a fortalecer una visión más abierta y colaborativa de la protección radiológica, tendiendo puentes entre el CSN, el sistema sanitario, las sociedades científicas, los colegios profesionales, la comunidad investigadora y la ciudadanía.

Si dentro de unos años pudiéramos decir que hemos acercado un poco más la protección radiológica a la salud pública, al sistema sanitario y a la sociedad, me daría por satisfecha. ■

TALLER INTERNACIONAL SOBRE LA TOMA DE DECISIONES EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO PROFUNDO

■ Texto: **M.ª Aránzazu Sogo Aldamendi** / Técnica del Área de Residuos de Alta Actividad
Fernando Conde Montero / Becario del Área de Residuos de Alta Actividad

El encuentro, organizado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), en colaboración con el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa) y el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), reunió a cerca de setenta expertos procedentes de más de veinte países, así como a representantes de organizaciones internacionales, de la sociedad civil y del sector eléctrico. El taller sirvió como plataforma de reflexión y diálogo en torno a uno de los desafíos más complejos y de mayor proyección temporal del ámbito nuclear: el desarrollo de un almacenamiento geológico profundo para la gestión definitiva del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos de alta actividad.



Participantes en el evento en el salón de actos de la Escuela de Minas.

La Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía de la Universidad Politécnica de Madrid acogió en noviembre de 2025 el taller internacional sobre el proceso de toma de decisiones y el papel de reguladores e implementadores en el desarrollo de proyectos de almacenamiento geológico profundo. En el ámbito nacional, se enmarca en las actividades desarrolladas bajo la coordinación del Comité de Enlace del CSN con Enresa y, en particular, del Grupo de Trabajo Tripartito MITECO-Enresa-CSN, en relación con el proyecto de desarrollo de un almacenamiento geológico profundo (AGP) en España. Esta colaboración interinstitucional constituye un elemento clave para garantizar una visión integral y coordinada de los aspectos técnicos, reguladores y sociales asociados a la toma de decisiones en proyectos de almacenamiento definitivo del combustible nuclear gastado y de los residuos de alta actividad. En este contexto, la organización del taller respondió al objetivo de incentivar la comunicación y la cooperación entre regulador e implementador, así como de impulsar el diálogo con otras partes interesadas, de acuerdo con los principios de seguridad y transparencia y con la necesidad de promover la confianza pública. Desde una perspectiva internacional, el taller se concibió como una plataforma para analizar y mejorar los procesos de toma de decisiones en países que cuentan con proyectos de AGP o prevén desarrollarlos, teniendo en cuenta la complejidad técnica, reguladora y social inherente a este tipo de instalaciones y promoviendo una comprensión compartida de los marcos de decisión a lo largo de todas las fases del proyecto.

El taller contó con la participación de cerca de setenta expertos procedentes de más de veinte países. Entre ellos, representantes de organismos reguladores, entidades implementadoras, organizaciones de apoyo técnico y otras partes interesadas –como organizaciones ecologistas y representantes municipales–, además de



Sesión inaugural. De izquierda a derecha: Karine Herviou (OIEA), Juan Carlos Lentijo (CSN), Joan Groizard (MITECO) y Olga García (Enresa).

organismos internacionales como el OIEA y la Agencia de Energía Nuclear (NEA) de la OCDE.

El desarrollo y la implantación satisfactorios de un proyecto de AGP requieren un marco de toma de decisiones sólido y transparente. Este debe sustentarse en una estrecha colaboración entre el implementador y los organismos reguladores e involucrar a otras partes interesadas para generar confianza pública y favorecer la aceptación social. Para ello, los actores deben comprender con claridad qué decisiones se adoptarán y cuándo, en qué se fundamentará cada una, qué función desempeñará cada parte y cómo se articulará su participación. El evento se estructuró en torno a dos ejes principales. Por un lado, varios países presentaron sus experiencias sobre el estado de sus proyectos de AGP y las características de sus marcos reguladores y de toma de decisiones. Por otro, se realizaron actividades de trabajo en grupo con el objetivo de trazar la secuencia de decisiones desde la concepción del proyecto hasta la clausura de la instalación, mejorar la calidad de esas decisiones mediante la comprensión de las funciones y perspectivas de cada parte y optimizar la colaboración entre implementadores, reguladores y demás partes interesadas.

Asimismo, se abordó el desarrollo de capacidades de todos los actores, de modo que el implementador pueda cumplir los requisitos reguladores, el regulador evaluar eficazmente las solicitudes y el público participar de manera activa e informada.

LA TOMA DE DECISIONES Y LAS FUNCIONES DE LOS ACTORES EN EL PROYECTO DE AGP

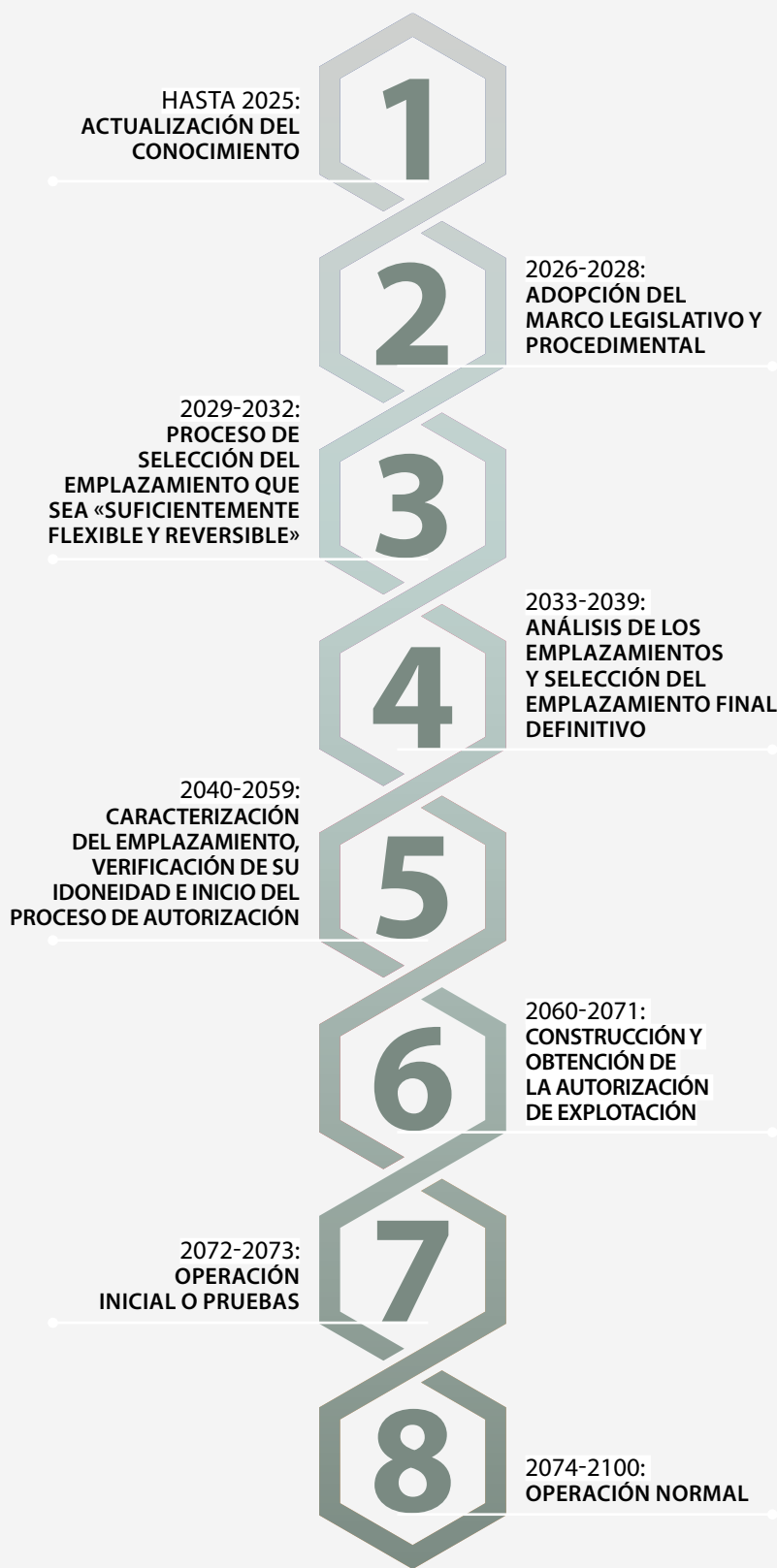
La sesión inaugural contó con la intervención de Karine Herviou, directora general adjunta y jefa del Departamento de Seguridad Nuclear Tecnológica y Física del OIEA; Olga García, presidenta de Enresa; Joan Groizard, secretario de Estado de Energía, y Juan Carlos Lentijo, presidente del CSN.

En sus intervenciones se subrayó la importancia de las normas internacionales como marco común para la seguridad nuclear, la colaboración entre los distintos actores y partes interesadas en el desarrollo de un AGP y el papel central que debe desempeñar el diálogo social.

Armin Lagumdziya, especialista en seguridad de los residuos radiactivos del OIEA, inauguró las ponencias técnicas con una exposición que situó el almacenamiento definitivo en el marco de las normas de seguridad del organismo

7.º PGRR

HOJA DE RUTA HACIA EL AGP, PUBLICADA EN 2024



Hoja de ruta en ocho etapas para el desarrollo del AGP.

para la gestión de residuos radiactivos. Asimismo, destacó los diversos mecanismos que ofrece el OIEA para ayudar a sus Estados miembros a desarrollar el marco normativo y apoyarlos en la aplicación de las normas de seguridad, entre ellos los programas de cooperación técnica, los cursos de formación, los talleres especializados y las reuniones técnicas. También destacó la importancia de establecer un marco legal y reglamentario sólido para regular la seguridad de las instalaciones y actividades, que incluya un organismo regulador independiente, dotado de autoridad y recursos suficientes, conforme a los requisitos establecidos en la norma GSR Part 1 (Rev. 1) del OIEA, relativa al marco gubernamental, legal y regulador para la seguridad. Lagumdziya repasó asimismo algunos de los requisitos más relevantes de la norma SSR-5, aplicables a la disposición final de residuos radiactivos, y recalcó las responsabilidades de titulares y reguladores. En particular, recordó que la responsabilidad fundamental de la seguridad recae en el titular de la instalación, que debe desarrollar y mantener un estudio de seguridad capaz de demostrar el cumplimiento de los objetivos de seguridad a lo largo del ciclo de vida de la instalación. Otra de las ideas clave de su intervención fue que el desarrollo de un AGP debe articularse como un proceso escalonado e iterativo, con decisiones respaldadas por el estudio de seguridad y con una participación activa de las partes interesadas.

LA ESTRATEGIA NACIONAL

A continuación intervinieron los representantes del Grupo Tripartito CSN-Enresa-MITECO –Juan José Montesinos, Elena Vico y Rafael Felpeto–, que realizaron una presentación conjunta sobre las etapas del proceso de licenciamiento del AGP en España. En primer lugar, detalla-

ron la estrategia y el marco regulador nacionales para su desarrollo. El 7.º Plan General de Residuos Radiactivos (PGRR), aprobado en diciembre de 2023, establece una hoja de ruta de ocho etapas que se extiende hasta 2100 y prevé el inicio de la operación del AGP en 2073. El proceso se apoya, entre otros antecedentes, en las recomendaciones de la misión combinada IRRS-ARTEMIS del OIEA realizada en España en 2018.

España cuenta con antecedentes de varias décadas en la búsqueda y el estudio de soluciones de emplazamiento para un AGP. Enresa, de acuerdo con las estrategias recogidas en las sucesivas ediciones del Plan General de Residuos Radiactivos, trabajó desde mediados de la década de los ochenta en el desarrollo de esta solución mediante el Plan de Búsqueda de Emplazamientos, que incluyó, además del proceso de selección, el desarrollo de diseños conceptuales y de programas de I+D asociados. Tras una primera etapa de elevada prioridad, la estrategia nacional pasó a concentrar sus esfuerzos en el almacenamiento temporal del combustible gastado

y de los residuos de alta actividad. Con la aprobación del 7.º Plan General de Residuos Radiactivos se retomaron las actividades para el desarrollo del proyecto AGP conforme a las etapas definidas en la hoja de ruta. En diciembre de 2025 concluyó la Etapa 1 de «actualización de conocimientos», con un informe final elaborado por Enresa y actualmente se encuentra en la Etapa 2, de «adopción del marco legislativo».

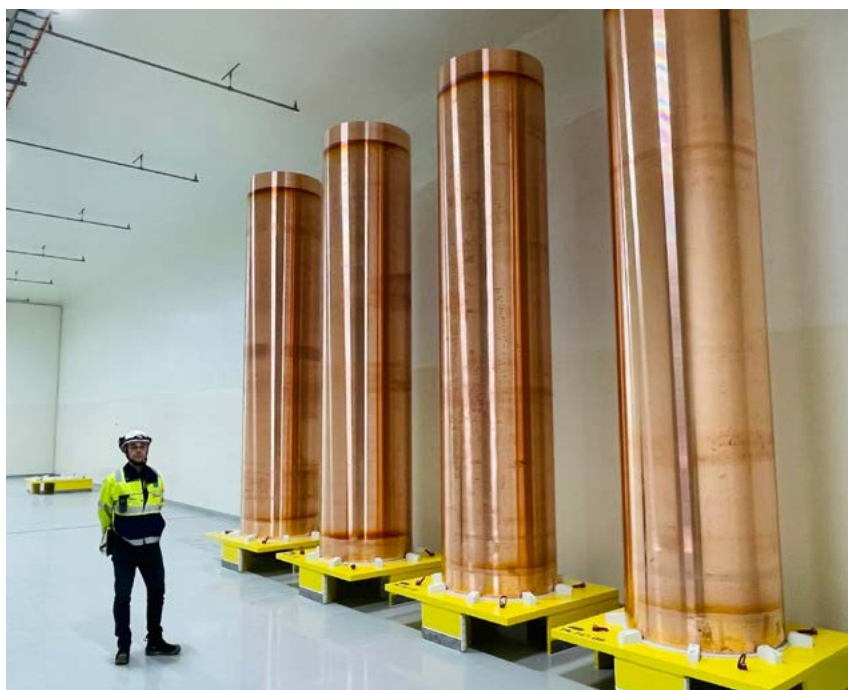
Juan José Montesinos, subdirector de Tecnología Nuclear del CSN, destacó que el papel del organismo, como regulador independiente, incluye el desarrollo del marco normativo técnico aplicable al AGP y la participación en un proceso escalonado de licenciamiento, sustentado en evaluaciones rigurosas de aspectos como el estudio de seguridad, los diseños genéricos y la seguridad a largo plazo. Asimismo, corresponde al CSN emitir los informes preceptivos previos a la concesión de las autorizaciones, favoreciendo la transparencia y la confianza pública.

EXPERIENCIAS INTERNACIONALES DE REFERENCIA

A lo largo del evento, representantes de más de veinte países expusieron el estado de sus programas de AGP y ofrecieron una panorámica internacional de los distintos enfoques reguladores, técnicos y de participación social. Especial interés revistieron las exposiciones de los organismos reguladores y de las entidades implementadoras de dos de los programas de AGP más avanzados: los de Finlandia y Francia. Estas intervenciones permitieron contrastar las perspectivas de los dos actores principales y sus respectivos enfoques del proceso de licenciamiento, así como el objetivo compartido de desarrollar instalaciones seguras y robustas a largo plazo.

El organismo regulador finlandés, STUK, describió su función a lo largo del ciclo de vida del proyecto Onkalo. En Finlandia, de acuerdo con los principios de seguridad del OIEA, la responsabilidad fundamental de la seguridad recae en el titular, Posiva, mientras que STUK establece los requisitos reguladores, evalúa la seguridad y supervisa su cumplimiento. El proceso se articula mediante autorizaciones sucesivas y un diálogo continuo con el operador, especialmente relevante para gestionar las incertidumbres inherentes a un proyecto de estas características. El representante de STUK subrayó, además, la utilidad de disponer de cauces de comunicación tanto formales como informales entre regulador e implementador.

La experiencia del proyecto Onkalo ilustra cómo el enfoque regulador evoluciona en cada fase, desde la I+D y la selección del emplazamiento hasta el diseño, la construcción y, finalmente, la fase de operación. STUK dispone de un sistema detallado de guías técnicas sometido a revisión y actualización. Durante la presentación se subrayaron asimismo la transparencia del proceso, la participación de múltiples actores –incluido el municipio



Cápsulas para el almacenamiento definitivo de combustible nuclear gastado que se emplearán en Onkalo.



Instalación de disposición final para combustible gastado ONKALO / Posiva.

anfitrión- y la necesidad de una supervisión técnica rigurosa.

Por su parte, Posiva describió el desarrollo del proyecto como un proceso iterativo y adaptativo, en el que los cambios de diseño forman parte del avance del programa a medida que se incorpora nueva información, con el objetivo de alcanzar una solución robusta y tan sencilla como sea posible. La entidad destacó la conveniencia de utilizar, en la medida de lo po-

sible, componentes comerciales estándar (*off-the-shelf*), en lugar de soluciones diseñadas específicamente, porque pueden simplificar la implantación y favorecer la fiabilidad y la sostenibilidad a largo plazo. También hizo hincapié en la necesidad de mantener una comunicación transparente y un diálogo continuo con el regulador. En este contexto, el representante de Posiva señaló como cuestión central la gestión de las incerti-

dumbres residuales del estudio de seguridad y el tratamiento de escenarios de muy baja probabilidad y consecuencias a muy largo plazo. También planteó la conveniencia de disponer de orientaciones internacionales que permitan valorar de forma más homogénea la relevancia de esas incertidumbres en los proyectos de AGP.

En relación con Francia, Annabelle Quenet, jefa de la División de Comunicación y Diálogo con la Sociedad Civil de Andra, presentó el proceso de licenciamiento del proyecto de AGP francés (Cigéo), desde la perspectiva de la entidad implementadora. La solicitud de autorización de construcción (*demande d'autorisation de création, DAC*), presentada por Andra, constituye el procedimiento necesario para autorizar la construcción del centro; el almacenamiento de residuos requerirá, posteriormente, las autorizaciones correspondientes a su puesta en servicio y explotación. Según explicó Quenet, en el proceso de toma de decisiones participan



Esquema del proceso de licenciamiento de Cigéo presentado durante el taller.



La prueba operativa de Posiva en Onkalo –su instalación de disposición final de combustible nuclear gastado– se lleva a cabo mediante control remoto integral desde instalaciones blindadas contra la radiación / Posiva.

múltiples actores: el Parlamento y el Gobierno, que establecen el marco legal y de política pública; el territorio de acogida, situado en los departamentos de Meuse y Haute-Marne; la sociedad civil, a través de distintos mecanismos de información y participación, y la Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection (ASNR), organismo regulador encargado de la evaluación de la seguridad. La comunicación y el diálogo constituyen pilares del proceso francés. Andra garantiza la transparencia con la publicación de documentación sobre el proyecto y desarrolla acciones de información dirigidas a los públicos local y nacional, mientras que el procedimiento regulador incorpora mecanismos formales de participación pública. La encuesta pública relativa a la DAC de Cigéo se desarrolló entre mayo y julio de 2026.

Olivier Lareynie, responsable de la unidad de gestión de residuos radiactivos de la ASNR, presentó el estado de la evaluación de la

solicitud de autorización de construcción de Cigéo. La revisión técnica se estructuró en tres grandes bloques: los datos de entrada, la seguridad durante la operación y la seguridad a largo plazo. Según lo expuesto durante el taller, el estudio de seguridad había alcanzado un grado de madurez global adecuado para esta etapa, aunque se habían identificado aspectos que requerían información complementaria. En aquel momento se situaba la posible emisión de la autorización en el horizonte de 2027-2028.

El regulador francés también destacó las acciones de participación pública desarrolladas desde la fase previa al licenciamiento. Junto con la federación de comités locales y Andra, se impulsó un programa de «diálogo técnico», basado en talleres y consultas, que permitió a organizaciones de la sociedad civil, comités locales y expertos no institucionales reforzar sus capacidades técnicas y plantear preguntas y preocupa-

ciones durante el proceso de revisión. La ASNR subrayó, además, que este compromiso con el diálogo social genera beneficios recíprocos: fortalece la capacidad del regulador, mejora la transparencia y la confianza en el proceso y contribuye a robustecer la seguridad mediante la incorporación de perspectivas diversas.

Durante el encuentro se presentaron los procesos de selección de emplazamientos y los marcos de decisión de otros países, entre ellos Canadá, China, Ghana, Malasia, Rumanía, Polonia y Lituania.

Stephen Dooley, de Nuclear Waste Services (NWS), organización responsable del desarrollo del futuro almacenamiento geológico profundo en Inglaterra, presentó los avances del proceso de selección de emplazamiento, basado en la idoneidad técnica y en el consentimiento de la comunidad potencialmente anfitriona. La política británica exige que exista un emplazamiento adecuado

y que la comunidad confirme su disposición a albergar la instalación mediante una «prueba de apoyo público» (*test of public support*). Dooley explicó un enfoque basado en tres pilares: disposición de la comunidad, idoneidad del emplazamiento y viabilidad del programa, evaluados mediante un marco formal y documentado de toma de decisiones. En cuanto a la regulación, señaló el papel de la Environment Agency y de la Office for Nuclear Regulation en las fases correspondientes de evaluación y autorización del proyecto, sin atribuirles la selección inicial del emplazamiento.

También se analizó el marco de toma de decisiones del programa belga de la mano de Frédéric Bernier, experto del organismo regulador FANC, quien describió el contexto singular de un proyecto de AGP, marcado por la existencia de incertidumbres, la imposibilidad de disponer de pruebas directas de seguridad que abarquen escalas temporales tan extensas y la participación de múltiples partes interesadas a lo largo de varias generaciones.

El regulador belga destacó que el marco de decisión se concibe como un proceso progresivo, trazable y susceptible de revisión, en el que los estudios de seguridad evolucionan de forma gradual en cada fase. Las decisiones se apoyan en la optimización de la protección radiológica y en la evaluación de la seguridad operacional y a largo plazo, y requieren un enfoque explícito para gestionar y reducir las incertidumbres.

También se subrayó la existencia de un diálogo estructurado entre el regulador, la entidad responsable de la gestión de los residuos y la sociedad civil, con el objetivo de promover una cultura de seguridad compartida y comprendida por las partes interesadas. Según lo expuesto, la política nacional adoptada en 2022 estableció la disposición geológica profunda como solución de referencia y el calendario del programa no prevé una autorización del AGP antes de 2060.

LA VISIÓN DE OTROS ORGANISMOS

El programa se completó con intervenciones monográficas de la NEA y del OIEA sobre iniciativas internacionales relacionadas con el desarrollo de los AGP.

Morgan Packer, especialista en gestión de residuos radiactivos de la NEA, presentó el trabajo del grupo de expertos RIDD, creado para promover un diálogo constructivo entre reguladores e implementadores durante el desarrollo de proyectos de AGP. El grupo actúa como foro neutral y centra buena parte de su actividad en la fase previa al licenciamiento. Entre sus objetivos figuran estructurar un diálogo eficaz a largo plazo, abordar la gestión de incertidumbres y preservar la independencia de los reguladores, en coordinación con otras iniciativas internacionales.

Packer expuso las principales aportaciones del grupo, entre ellas el informe publicado en 2024 sobre el diálogo entre reguladores e implementadores durante la fase previa al licenciamiento, que identifica buenas prácticas como la definición clara de expectativas reguladoras, la combinación de cauces formales e informales y una comunicación abierta. Asimismo, el grupo trabaja en una hoja de ruta genérica para adaptar ese diálogo a las características de cada programa nacional. También subrayó la importancia de delimitar con precisión las funciones de cada actor, preservar la independencia del regulador y garantizar la transparencia de la comunicación con las partes interesadas.

Por su parte, Armin Lagumdzija explicó que el OIEA estaba desarrollando un documento técnico (*TECDOC*) destinado a orientar a los organismos reguladores en su preparación para la supervisión de programas de AGP. Su objetivo es mejorar la comprensión de las actividades preparatorias que un regulador debe considerar, especialmente durante las fases previas al licenciamiento y sus primeras etapas. La iniciativa pone el acento en la necesidad de un marco legal claro, en las interacciones tempranas y estructuradas con el futuro titular y con las instancias nacionales responsables de la toma de decisiones, y en la capacidad del regulador para emitir juicios sólidos en presencia de las incertidumbres inherentes a proyectos de tan largo plazo.

El documento aborda cuestiones como las competencias específicas que debe desarrollar el regulador –técnicas, jurídicas y de comportamiento organizativo–, la asignación de recursos y la evolución de esas necesidades a lo largo del programa. Asimismo, dedica especial atención a la gestión de incertidumbres mediante un enfoque progresivo de identificación, análisis y tratamiento, acompañado de planes que permitan demostrar que las etapas futuras podrán cumplir los objetivos de seguridad. Según se indicó, la publicación del *TECDOC*, prevista para 2026, aspira a servir de apoyo para que los reguladores mantengan su independencia y credibilidad al tiempo que fomentan un diálogo constructivo y transparente con las partes interesadas.

INTERCAMBIO DE OPINIONES

Las jornadas incluyeron sesiones de trabajo en grupo con representación equilibrada de reguladores, implementadores y otros actores de distintos países. Cada grupo abordó un tema específico relacionado con el proceso de toma de decisiones en el desarrollo de un AGP. Los debates se centra-

ron, entre otras materias, en las funciones de los distintos actores durante el desarrollo del proyecto y la selección del emplazamiento; el marco regulador y la financiación; la decisión inicial de optar por un AGP y la comunicación con las partes interesadas; y, finalmente, el desarrollo de capacidades, el concepto técnico y las

actividades de I+D. Como cuestiones transversales se analizaron la información de base necesaria para adoptar cada decisión, las responsabilidades del regulador y del operador, los asuntos que deben abordarse en cada fase, los medios más eficaces de interacción y las capacidades y competencias requeridas para desempeñar cada función.

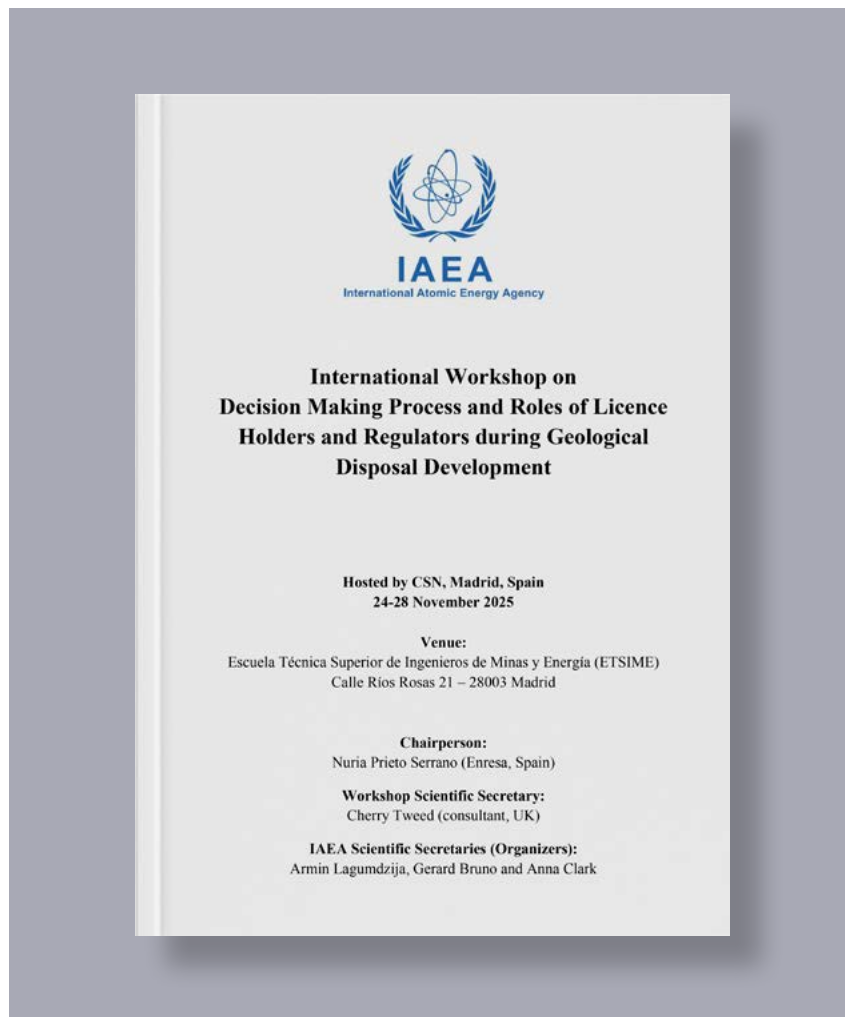
Los participantes en los grupos de trabajo destacaron el valor del intercambio de perspectivas internacionales y del debate entre los distintos actores del sector.

La jornada de clausura contó con las intervenciones de Víctor Marcos, director general de Planificación y Coordinación Energética del MITECO; Pilar Lucio, vicepresidenta del CSN; Anna Clark, jefa de la Sección de Residuos y Seguridad Ambiental del OIEA, y Mariano Navarro, director técnico de Enresa. Los ponentes pusieron en valor este tipo de encuentros como instrumento *para* integrar los aspectos técnicos, reguladores y sociales asociados a la toma de decisiones en los proyectos de AGP, reforzar la cooperación entre regulador e implementador y favorecer el conocimiento público del programa español de almacenamiento definitivo del combustible nuclear gastado y de los residuos de alta actividad.

CLAVES DEL TALLER

El taller permitió identificar una serie de mensajes comunes a los distintos programas nacionales de almacenamiento geológico profundo, con independencia de su grado de avance. El primero es que el desarrollo de un AGP no puede abordarse como una decisión única, sino como un proceso progresivo, escalonado y transparente, en el que cada etapa debe sustentarse en una base técnica suficiente y en un marco de decisión previamente definido.

Un segundo mensaje fue la necesidad de delimitar con claridad las funciones y responsabilidades de cada actor. El titular o implementador debe asumir la responsabilidad fundamental de la seguridad y desarrollar un estudio de seguri-



dad robusto y actualizado a lo largo del ciclo de vida del proyecto. El regulador, por su parte, debe mantener su independencia, establecer expectativas claras, evaluar la seguridad y supervisar el avance del programa sin sustituir al titular en sus responsabilidades.

La gestión de las incertidumbres se consolidó como uno de los elementos centrales del proceso. En proyectos con horizontes temporales extremadamente largos, la demostración de la seguridad no puede basarse en la eliminación completa de toda incertidumbre, sino en su identificación, análisis, reducción cuando sea posible y tratamiento explícito dentro del estudio de seguridad y del proceso de toma de decisiones.

Otro aspecto recurrente fue la importancia de un diálogo temprano, estructurado y transparente entre regulador, implementador, admi-

nistraciones públicas, comunidades potencialmente afectadas y sociedad civil. La experiencia internacional pone de relieve que la participación de las partes interesadas y la generación de confianza pública son factores determinantes para la viabilidad social de proyectos de tan largo alcance.

Finalmente, el taller puso de manifiesto la necesidad de desarrollar y mantener en el tiempo capacidades técnicas, reguladoras e institucionales. Para España, inmersa en la reactivación del programa de AGP conforme a la hoja de ruta del 7.º PGR, estos mensajes resultan especialmente relevantes para consolidar el marco normativo, reforzar la coordinación interinstitucional y preparar las futuras etapas del proceso de licenciamiento. ■

A child with dark hair, seen from the back, is drawing a solar system on a chalkboard. The drawing features a central yellow star, several concentric white orbits, and small yellow and orange circles representing planets. The child is wearing a red plaid shirt.

Aprender ciencia haciendo ciencia

La necesidad de interpretar, contrastar y decidir

La ciencia ocupa un lugar cada vez más relevante en las decisiones sociales e individuales. La energía, el cambio climático, la salud, la inteligencia artificial o la genética plantean retos que exigen interpretar datos, identificar fuentes fiables y construir un juicio crítico. En este escenario, enseñar ciencia como método de análisis constituye una tarea central de cualquier sistema educativo.

■ Texto: Miguel Sánchez

La información científica ha adquirido una presencia inédita en la vida cotidiana. Los descubrimientos llegan a los medios de comunicación, circulan por las redes sociales y se incorporan a las conversaciones. Se habla de algoritmos, vacunas, emisiones, radiactividad, fenómenos meteorológicos extremos, edición genética o nuevas fuentes de energía; conceptos que

hasta hace poco parecían circunscritos a ámbitos especializados.

Sin embargo, acumular información no implica comprenderla mejor. La abundancia de contenidos convive con explicaciones simplistas, titulares confusos, datos descontextualizados y mensajes de fuerte componente emocional sin respaldo suficiente en fuentes verificables. En

una misma pantalla, una investigación fundamentada o una noticia rigurosa pueden aparecer junto a una interpretación sesgada o un vídeo que no identifica el origen de sus afirmaciones.

Los resultados de PISA 2022 permiten dimensionar este desafío. En España, el 79 % del alumnado de 15 años alcanzó al menos el nivel 2 de competencia científica,

Los sistemas de recomendación pueden favorecer los contenidos que generan más interacción, pero ese criterio no garantiza su rigor científico; aprender ciencia en las redes también exige contrastar las fuentes

considerado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) el nivel mínimo de referencia para desenvolverse en situaciones que requieren conocimientos científicos elementales. Esto significa que alrededor de uno de cada cinco estudiantes no llegó a ese nivel.

En el conjunto de la Unión Europea, el 24,2 % del alumnado quedó por debajo del nivel básico en ciencias en 2022, frente al 21,6 % de 2018. La presencia cotidiana de la ciencia y la tecnología no garantiza, por tanto, que se disponga de las herramientas necesarias para comprenderlas.

La educación científica cumple una función que excede la formación de quienes trabajarán en laboratorios, hospitales, universidades o instalaciones industriales. Debe proporcionar al conjunto de la ciudadanía recursos para interpretar una gráfica, comprender las indicaciones de un

medicamento, valorar los beneficios y riesgos de una tecnología o participar con criterio en el debate público.

De memorizar respuestas a formular preguntas

Durante mucho tiempo, el aprendizaje de las ciencias se ha identificado con la asimilación de conceptos, fórmulas, leyes y clasificaciones. Ese conocimiento sigue siendo necesario, pero conocer las respuestas científicas no equivale a entender cómo se ha llegado a ellas.

El trabajo científico puede comenzar con una pregunta, una observación, un problema no resuelto o la necesidad de comprobar una explicación anterior. Según la disciplina y el objeto de estudio, se formulan hipótesis, se diseñan experimentos u observaciones sistemáticas, se reúnen datos y se comparan los resultados con las explicaciones disponibles. Los métodos y las conclusiones se someten al examen de la comunidad científica y pueden revisarse cuando aparecen nuevas evidencias.

Trasladar esta forma de trabajo al aula implica enseñar a preguntarse qué pruebas respaldan una afirmación. También supone entender el error como una oportunidad para revisar el proceso y asumir la duda razonada como punto de partida de la investigación. La circulación de mensajes simplistas en las redes sociales plantea el reto de formar al alumnado para que examine las afirmaciones, contraste las fuentes y distinga los hechos comprobados de las opiniones o interpretaciones.

Aprender haciendo

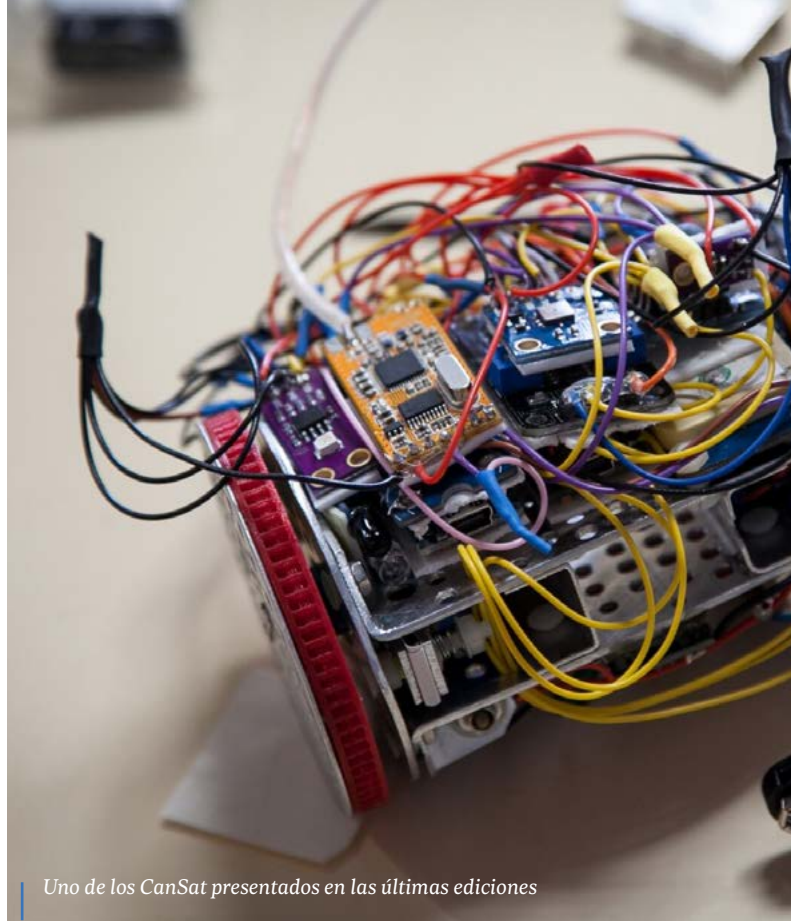
La educación científica adquiere una dimensión diferente cuando el alumnado trabaja con datos reales, diseña experimentos o entra en contacto directo con investigadores. Grandes organismos científicos y educativos mantienen programas que trasladan estas experiencias a estudiantes en edad escolar:



La educación STEM, prioridad europea

En marzo de 2025, la Comisión Europea presentó el Plan Estratégico para la Educación STEM (*Science, Technology, Engineering and Mathematics*; Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas). El documento plantea reforzar las competencias científicas desde la escuela, reducir el bajo rendimiento y ampliar la participación en los itinerarios STEM. Entre sus referencias figura el objetivo europeo de situar por debajo del 15 % la proporción de jóvenes de 15 años con bajo rendimiento en ciencias en 2030. El plan también propone medidas específicas para incrementar la participación de niñas y mujeres en los estudios y profesiones STEM.

- **CSIC: conectar las aulas con la investigación.** El Consejo Superior de Investigaciones Científicas desarrolla numerosas iniciativas para acercar la investigación al sistema educativo. *El CSIC en la Escuela* combina formación del profesorado, materiales didácticos y experiencias prácticas en colaboración con personal investigador. A esta labor se suman programas como *Ciencia en el Barrio*, *Científic@s en prácticas* y *Exper-i-ciencia en Galicia*, además de otras actividades impulsadas por institutos, centros y delegaciones territoriales del organismo.
- **Rutas Científicas, Artísticas y Literarias.** El Ministerio de Educación, Formación Profesional y



Uno de los CanSat presentados en las últimas ediciones

Deportes desarrolla este programa nacional, dirigido a alumnado desde 5.º de primaria hasta Bachillerato, Formación Profesional de grado medio y enseñanzas artísticas, además de determinados niveles de educación especial. La convocatoria 2026-2027 contempla ayudas para 96 grupos de 20 a 24 estudiantes y dos docentes cada uno (de 10 a 18 estudiantes y dos a cuatro docentes los de educación especial).

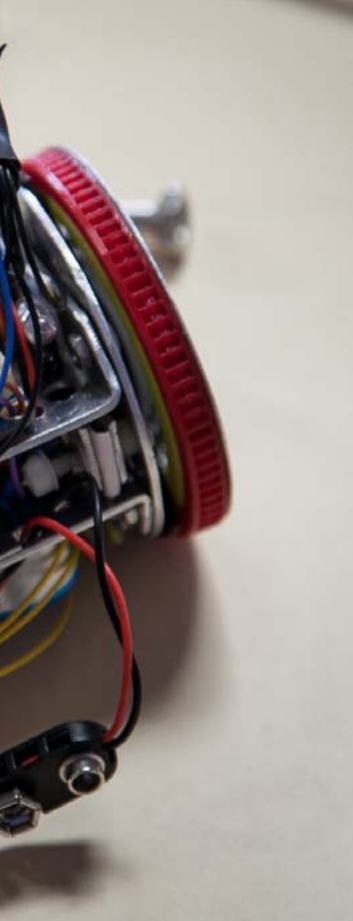
- **CNIC-JOVEN: investigación biomédica desde edades tempranas.** El Centro Nacional de Investigaciones Cardiovasculares Carlos III desarrolla programas formativos dirigidos a diferentes etapas, desde Educación Secundaria y Formación Profesional hasta la formación universitaria, predoctoral y posdoctoral. Entre sus iniciativas figura *Acércate*, dirigido a estudiantes que han finalizado segundo de Bachillerato de Ciencias y Tecnología. El programa permite realizar experimentos, conocer técnicas de investigación biomédica y trabajar junto al personal investigador del centro. En 2026 celebró su decimoctava edición, con ocho participantes seleccionados. El CNIC también organiza estancias

para alumnado de 4.º de ESO y ofrece prácticas de Formación Profesional en ámbitos como ciencias biosanitarias, informática y sistemas, y administración y finanzas.

- **ESERO: el espacio como laboratorio educativo.** La Agencia Espacial Europea abrió en 2006 la primera oficina de la red European Space Education Resource Office (ESERO), en los Países Bajos. En 2026, la red desarrolla actividades en 22 Estados miembros de la ESA y proporciona recursos y formación al profesorado para acercar las disciplinas STEM a millones de estudiantes. Sus proyectos utilizan el espacio como contexto para trabajar competencias científicas y tecnológicas mediante experiencias prácticas. *Astro Pi* permite desarrollar programas informáticos que se ejecutan en ordenadores situados en la Estación Espacial Internacional; *Climate Detectives* utiliza datos de observación de la Tierra para investigar problemas ambientales; *Moon Camp* propone diseñar hábitats espaciales, y *CanSat* reproduce a pequeña escala las fases de una misión satelital.

- **Beamline for Schools.** Desde 2014, la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) organiza *Beamline for Schools* (BL4S), dirigido a estudiantes de secundaria de todo el mundo. Los participantes proponen un experimento de física de partículas y los equipos seleccionados pueden desarrollarlo con apoyo científico en instalaciones de investigación. En 2026 se recibieron 712 propuestas, presentadas por 4051 estudiantes de 89 países. Desde la creación del programa, más de veintiocho mil jóvenes han presentado proyectos.

- **International Physics Masterclasses.** El Grupo Internacional de Divulgación de la Física de Partículas (IPPOG) permite que estudiantes de entre 15 y 19 años trabajen con datos reales procedentes de experimentos de física de partículas. Cada año participan más de 13 000 estudiantes de unos 60 países, en actividades organizadas por alrededor de 225 universidades y centros de investigación. Al finalizar, los grupos comparan sus resultados mediante videoconferencias internacionales.



Equipo alicantino «Nimbusat», ganador de CanSat Spain 2026.

▪ **Science is Wonderful! y Researchers at Schools.** Dentro de las Acciones Marie Skłodowska-Curie, la Comisión Europea promueve el contacto directo entre investigadores y alumnado. *Science is Wonderful!* reúne cada año en Bruselas a escolares y científicos mediante experimentos y demostraciones. En 2026 participaron más de 150 investigadores de más de 30 países y asistieron 4500 jóvenes. *Researchers at Schools* traslada este contacto con la investigación al entorno educativo.

Aunque difieren en escala y especialización, estas iniciativas comparten un principio: acercar al alumnado a los procedimientos propios de la investigación. Formular preguntas, diseñar experimentos, realizar observaciones, interpretar datos y contrastar evidencias permite comprender la ciencia como un conjunto de conocimientos y como una forma sistemática de obtenerlos y revisarlos.

Ciencia en redes

YouTube, TikTok, Instagram, Twitch y los podcasts han ampliado los espacios en los que se enseña y aprende ciencia. Divulgadores especializados



La educación científica debe enseñar a formular preguntas, interpretar evidencias y construir un juicio crítico, además de transmitir conocimientos y respuestas consolidadas

explican conceptos mediante animaciones, experimentos, entrevistas o vídeos breves capaces de despertar la curiosidad de públicos que quizá no buscarían esos contenidos en un libro o una conferencia. Su lenguaje cercano puede complementar el trabajo del aula, proporcionar nuevos referentes y visibilizar los procesos, las personas y los perfiles profesionales vinculados con la producción de conocimiento.

Un ejemplo fue *Science Truck*, proyecto puesto en marcha por la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT) en diciembre de 2018. En su etapa inicial, el programa llevó a centros de Educación Secundaria a divulgadores de YouTube, entre ellos el físico Javier Santaolalla y la entonces doctoranda Inés Dawson. Las sesiones, emitidas desde los centros educativos, com-

binaron explicaciones, preguntas del alumnado y participación de especialistas en distintas disciplinas.

El formato plantea sus propios retos. Muchas plataformas emplean sistemas de recomendación optimizados para mantener la interacción del público mediante señales como el tiempo de visualización, los clics o las reacciones. Esos criterios no garantizan por sí mismos el rigor científico de los contenidos seleccionados. La brevedad puede borrar matices, y una explicación convincente no siempre está respaldada por evidencias.

La respuesta educativa no consiste en excluir estos contenidos digitales, sino en incorporarlos de forma crítica: comparar vídeos sobre un mismo asunto, identificar las fuentes, distinguir entre divulgación y opinión o reconstruir el razonamiento que



Educar en ciencia para ampliar oportunidades

La educación científica influye en la imagen que niños y jóvenes construyen de la ciencia como opción académica y profesional. Las vocaciones dependen de factores como las expectativas del entorno, la orientación recibida, los referentes disponibles y la posibilidad de experimentar la ciencia de forma cercana y vinculada con problemas reales.

Estas oportunidades todavía se distribuyen de manera desigual. Los informes europeos y españoles muestran que las mujeres son mayoría en el conjunto de la educación superior, pero siguen infra-representadas en varias ramas STEM, especialmente en ingeniería, tecnologías de la información y determinados itinerarios de Formación Profesional. La brecha también persiste en algunas etapas avanzadas de la carrera académica e investigadora.

La manera de enseñar y divulgar ciencia puede influir en la relación del alumnado con estas materias. Un estudio promovido por FECYT y CosmoCaixa siguió durante dos cursos escolares a más de 2500 estudiantes de secundaria para analizar el efecto de distintas actividades científicas. Según resultados difundidos por FECYT, el interés por estudiar ciencias aumentó cerca de un 6 %, y el incremento fue especialmente apreciable entre el alumnado que partía de un rendimiento académico más bajo. Los datos apuntan a que el contacto con actividades científicas puede ampliar el interés del alumnado. No permiten concluir por sí solos que una intervención concreta corrija las desigualdades de género o de origen socioeconómico. Para conocer el alcance de sus efectos es necesario considerar el diseño, la duración, el contexto y los grupos participantes en cada actuación.



conduce a una conclusión. El profesorado adquiere así una función decisiva: ayudar al alumnado a pasar de consumir contenidos científicos a interrogarlos, contrastarlos y comprenderlos.

Explicar lo complejo

La energía nuclear ilustra con especial claridad los retos de la educación científica. En ella confluyen conceptos físicos difíciles de visualizar, aplicaciones diversas, acontecimientos históricos, decisiones políticas, consideraciones ambientales y percepciones sociales sobre la seguridad y el riesgo. Además, el alumnado llega al aula con imágenes e ideas procedentes de la cultura popular, asociadas con frecuencia al armamento o a los accidentes nucleares.

La primera dificultad consiste en diferenciar conceptos que el lenguaje cotidiano suele confundir. Radiación y radiactividad no son términos equivalentes; tampoco lo son peligro, exposición y riesgo. Los posibles efectos dependen, entre otros factores, del tipo de radiación, la dosis y la tasa de dosis, la vía de exposición y la parte del organismo expuesta. Sin estas

distinciones resulta difícil construir una comprensión adecuada.

También es necesario situar el fenómeno en un contexto más amplio. La energía nuclear y las radiaciones ionizantes se asocian a acontecimientos que aún marcan la memoria colectiva, pero las tecnologías nucleares y radiológicas se emplean asimismo en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades, la investigación, la industria, la agricultura, el análisis de materiales y la conservación del patrimonio.

El Consejo de Seguridad Nuclear ha publicado una nueva edición de sus *Guías didácticas para centros de enseñanza primaria y secundaria sobre radiación y protección radiológica*, actualizadas por la Dirección Técnica de Protección Radiológica del CSN en colaboración con la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR). El material aborda las radiaciones ionizantes, sus usos cotidianos y los principios básicos de protección radiológica, y está concebido como apoyo para el profesorado de Educación Primaria y Secundaria.



Una cámara de niebla permite hacer visibles las trayectorias de determinadas partículas cargadas ionizantes. El dispositivo contiene un vapor sobresaturado, normalmente de alcohol. Cuando una partícula cargada atraviesa ese medio, ioniza las moléculas que encuentra a su paso. El vapor se condensa alrededor de los iones y forma una sucesión de pequeñas gotas que permite observar la trayectoria seguida por la partícula.

Las diferentes formas y longitudes de las estelas aportan información sobre el tipo de interacción, aunque la cámara no identifica por sí sola el origen exacto de cada partícula. En un entorno educativo permite mostrar las trazas producidas por partículas asociadas a la radiación cósmica y al fondo radiactivo natural. Utilizada junto con otros instrumentos y con una explicación adecuada, ayuda a comprender que la radiación ionizante también puede tener un origen natural y forma parte del entorno.

Comprender una tecnología no determina su aceptación o rechazo, pero permite fundamentar mejor la posición adoptada. Esta es una de las principales aportaciones de la educación científica.

Debates científicos en el aula

La genética abre posibilidades en la prevención, el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades, al tiempo que plantea interrogantes sobre la privacidad y los límites de determinadas intervenciones. El desarrollo de sistemas de inteligencia artificial se apoya en disciplinas como las matemáticas, la programación y el tratamiento de datos, y suscita debates sobre los sesgos, la propiedad intelectual y la responsabilidad por las decisiones automatizadas.

Una actividad didáctica puede consistir en pedir al alumnado que diseñe un sistema eléctrico capaz de atender la demanda de un territorio. Para hacerlo, debe comparar fuentes de energía a partir de datos sobre emisiones, disponibilidad, capacidad de producción, costes, ocupación del suelo, materias primas, residuos y necesidades de almacenamiento o respaldo. Si todos los grupos trabajan con la misma información científica, no necesariamente llegarán a la misma solución: unos pueden priorizar la reducción de emisiones; otros, la seguridad del suministro, el precio o la autonomía energética.

El ejercicio muestra que la evidencia científica permite contrastar afirmaciones, descartar aquellas que resultan incompatibles con los datos disponibles y anticipar posibles consecuencias. Sin embargo, no establece por sí sola qué criterios debe anteponer una sociedad. Esa decisión exige hacer explícitos los valores y las prioridades que la orientan.

Decidir con conocimiento

La educación científica enseña a observar, formular preguntas, experimentar cuando resulta pertinente, interpretar resultados y comprender cómo se construye una explicación fiable. Los proyectos desarrollados en las aulas, la formación del profesorado y la colaboración con universidades, centros de investigación e instituciones científicas acercan ese proceso al alumnado.

La energía nuclear, el cambio climático, la genética o la inteligencia artificial ofrecen problemas concretos con los que aprender. Convertir la curiosidad en conocimiento y favorecer que niños y jóvenes perciban la ciencia como una forma de explorar, comprender y participar en el mundo constituye uno de los principales retos de la relación entre ciencia y educación. ■

INTERCOMPARACIONES medir mejor para vigilar con más eficiencia

■ Texto: P. Ozores, J.A. Trinidad, A. Ortiz, M. Herbella, F.J. Castillo y S. Luque

La vigilancia radiológica ambiental exige resultados fiables y comparables. Desde hace más de 30 años, el CSN organiza ejercicios de intercomparación que permiten evaluar y mejorar la calidad de las mediciones de los laboratorios participantes.

+30
AÑOS de ejercicios de intercomparación del CSN

4
MATRICES agua, suelo, filtros y alimentos

5
AÑOS frecuencia de la intercomparación de radiación gamma ambiental

i

POR QUÉ SE HACEN

España cuenta con una red consolidada de laboratorios que analiza muestras de aire, agua, suelo y alimentos y puede detectar cantidades extremadamente pequeñas de radionucleidos.

Las intercomparaciones permiten comprobar que los resultados sean precisos, fiables y comparables. También ayudan a detectar desviaciones, revisar procedimientos y aplicar mejoras cuando resulta necesario.

OBJETIVO

Reforzar la confianza en los datos utilizados para la vigilancia radiológica ambiental.

CÓMO FUNCIONA UNA INTERCOMPARACIÓN



1. PREPARAR

Se preparan muestras ambientales con concentraciones conocidas de radionucleidos naturales y artificiales.



2. DISTRIBUIR

Las muestras se envían a los laboratorios sin revelar los valores de referencia.



3. ANALIZAR

Cada laboratorio utiliza sus procedimientos habituales y comunica los resultados obtenidos.



4. EVALUAR

Los resultados se someten a análisis estadístico para determinar la exactitud y la precisión de las mediciones.



5. MEJORAR

La evaluación permite detectar posibles desviaciones y aplicar acciones de mejora cuando son necesarias.

¿CÓMO SE VALORAN LOS RESULTADOS?

Parámetros estadísticos reconocidos internacionalmente, como el z-score, permiten clasificar el desempeño.

SATISFACTORIO · DUDOSO · NO SATISFACTORIO

UNA RED QUE HA CRECIDO Y SE HA DIVERSIFICADO

Desde la década de los ochenta, las intercomparaciones del CSN han aumentado en complejidad, participación y variedad de matrices, consolidando una cultura de calidad y mejora continua.

50

LABORATORIOS
invitados
en la campaña
de 2024

UB

UNIVERSIDAD DE
BARCELONA
Colabora en la
preparación de las
muestras

CIEMAT

Participa en la
evaluación de los
resultados



PARTICIPACIÓN INTERNACIONAL

Además de universidades y centros públicos y privados españoles, participan laboratorios de otros países europeos.

DEL RESULTADO A LA MEJORA

1.

RESULTADOS

Se reúnen los datos de los laboratorios participantes.

2.

ANÁLISIS

Se evalúan conjuntamente los resultados y las posibles desviaciones.

3.

JORNADA ANUAL

El CSN reúne a los participantes en su sede para compartir experiencias y resolver dudas.

4.

MEJORA CONTINUA

Las conclusiones se trasladan a la revisión de procedimientos y a la calidad de las mediciones.

¿QUÉ SE ANALIZA?

CICLO CUATRIENAL

- Agua
- Suelo
- Filtros
- Alimentos

CICLO QUINQUENAL

- Radiación gamma ambiental

Optimización del diseño de núcleo mediante inteligencia artificial

■ Texto: Rafael Miró, Teresa Barrachina, Pablo Pallarés, Enrique S. Quintana-Ortí, José Gozálviz, Juan Carlos García, Javier Jorge, José García-Sanjuán / Universitat Politècnica de València

El proyecto CLPD-IA ha establecido una base metodológica sólida para optimizar el diseño del núcleo de los reactores de agua ligera mediante la combinación de simulaciones neutrónico-termohidráulicas y técnicas avanzadas de inteligencia artificial.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño del núcleo consiste en el estudio previo de su comportamiento a lo largo de un ciclo de operación comprendido entre dos recargas de combustible. Se basa en un cálculo termohidráulico y neutrónico estacionario cuasiestático, cuyo objetivo es determinar los valores de las variables de control necesarios para operar el reactor a plena potencia a lo largo del ciclo. En los reactores PWR, se determina la concentración de boro, expresada en partes por millón (ppm), que mantiene el reactor en estado crítico en cada uno de los pasos de quemado en los que se divide el ciclo (unos 30 para un ciclo de dos años). El ciclo teórico se considera finalizado cuando dicha concentración de boro alcanza o ppm. En los reactores BWR, en cambio, el control de la reactividad se realiza mediante la inserción y el reposicionamiento de las barras de control en un número determinado de pasos o muescas a lo largo del ciclo de quemado (unos 200 para un ciclo de dos años). El ciclo concluye cuando el reactor alcanza la criticidad con todos los grupos de barras de control completamente extraídos.

En este proyecto se ha trabajado con modelos de núcleo de reactores PWR de tecnología Westinghouse para un diseño de núcleo de ciclo 1, así como con los de dos reactores BWR GE/6, tanto para un diseño de núcleo completo con el código termohidráulico-neutrónico PATHS

(v2.00)/PARCS (v3.4.5), incluidos los parámetros nucleares, como para un diseño de núcleo de ciclo 1. Los resultados se han contrastado con los proporcionados por las centrales.

2. AUTOMATIZACIÓN, INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y ESTRATEGIAS HÍBRIDAS

Una de las líneas fundamentales de desarrollo del proyecto se ha orientado a mejorar la eficiencia computacional mediante la automatización de procesos y la integración de técnicas de inteligencia artificial. En el diseño de núcleos, donde es necesario evaluar un número muy elevado de configuraciones, la reducción de los tiempos de cálculo constituye un factor clave.

Por ello, se han desarrollado herramientas que automatizan la generación de archivos de entrada (MATLAB® y Python), la ejecución de simulaciones en clústeres de cálculo y el posprocesado de resultados. Esto ha permitido explorar de forma sistemática grandes espacios de diseño mediante la simulación de miles de patrones de carga. La figura 1 muestra un ejemplo de uno de los patrones de carga aleatorios utilizados en el conjunto de datos.

En paralelo, los modelos subrogados basados en redes neuronales han demostrado ser una herramienta eficaz. Estos modelos, entrenados con bases de datos generadas a partir de miles de simulaciones físicas, han permitido predecir con elevada precisión variables relevantes, como la concentración de boro, la potencia pico o la duración del ciclo. Su principal ventaja es la reducción drástica del tiempo de evaluación en comparación con los códigos neutrónico-termohidráulicos tradicionales.

A partir de estas capacidades, se ha desarrollado una estrategia hí-

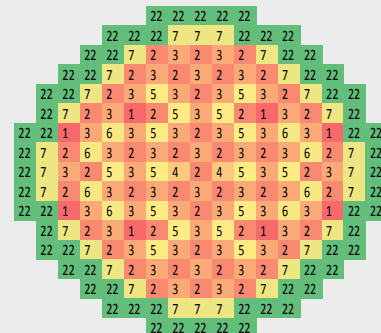


Figura 1. Ejemplo de patrón de carga PWR utilizado en el entrenamiento de modelos.

brida en la que las redes neuronales se emplean para realizar un filtrado rápido de configuraciones prometedoras. Posteriormente, dichas configuraciones se validan mediante simulaciones completas con PARCS/PATHS. Este enfoque permite reducir significativamente el número de simulaciones de elevado coste computacional sin prescindir de la verificación física final.

3. RESULTADOS Y POTENCIAL DE LAS METODOLOGÍAS DESARROLLADAS

El diseño del núcleo de un reactor implica encontrar un equilibrio entre múltiples variables, como la duración del ciclo, la reactividad, la potencia pico o los márgenes de seguridad. En este contexto, la optimización multiobjetivo constituye una herramienta fundamental para abordar el problema de manera integral.

Los resultados obtenidos en el proyecto ponen de manifiesto el potencial de combinar la simulación física y la inteligencia artificial para el diseño del núcleo. En particular, las redes neuronales entrenadas han demostrado una elevada capacidad predictiva, con coeficientes de

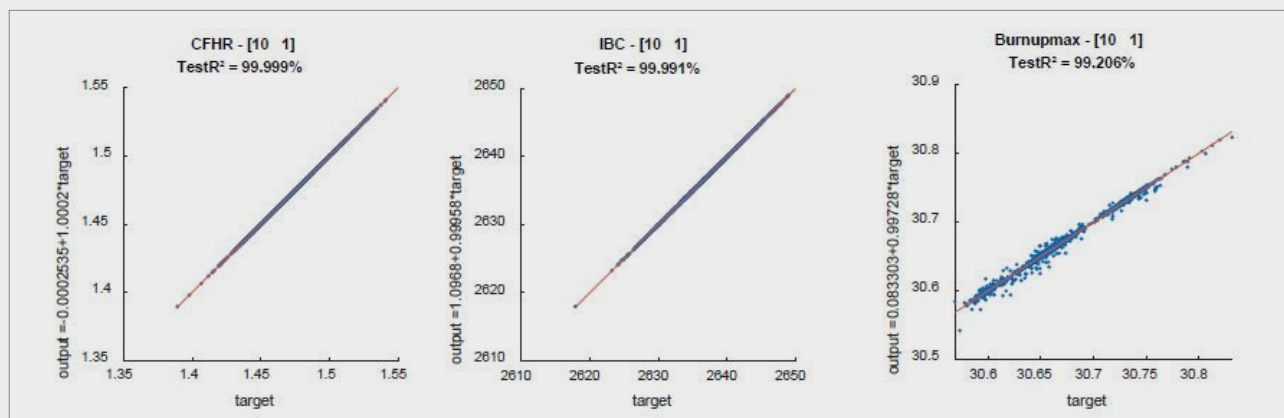


Figura 2. Ejemplos de análisis de ajustes con distintos niveles de calidad.

determinación (R^2) cercanos a la unidad para las variables principales, junto con bajos valores de error cuadrático medio, lo que evidencia su buen comportamiento como modelos subrogados (figura 2).

En las 14 variables clave utilizadas en el análisis del reactor PWR, las redes neuronales alcanzan precisiones elevadas, con valores de R^2 próximos a 1 (tabla 1).

Además, los algoritmos de optimización, como el recocido simula-

do (*simulated annealing*, SA), han permitido obtener configuraciones más eficientes que las identificadas mediante muestreo aleatorio, incluso con un número significativamente menor de evaluaciones.

Asimismo, la combinación de modelos subrogados y técnicas de optimización ha permitido evaluar con rapidez un gran número de configuraciones y obtener mejores aproximaciones de la frontera de Pareto en problemas multiobjetivo. Esta representación de frontera propor-

cional soluciones no dominadas que representan diferentes equilibrios entre los objetivos y facilita la toma de decisiones basada en criterios técnicos y regulatorios. Además, es posible visualizar las relaciones entre variables clave y seleccionar configuraciones óptimas conforme a distintos criterios tanto operativos como regulatorios (figura 3).

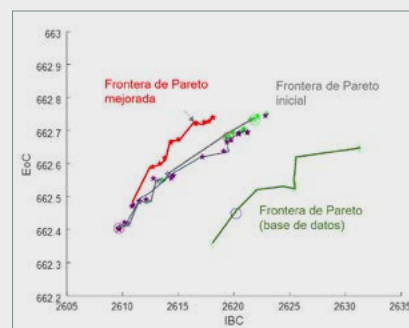


Figura 3. Frontera de Pareto en problemas de optimización multiobjetivo.

En conjunto, los resultados evidencian que la metodología desarrollada reduce el coste computacional asociado a la exploración del espacio de diseño y facilita la identificación de configuraciones prometedoras, lo que refuerza su potencial aplicación en entornos industriales.

En fases futuras, se prevé explorar modelos más avanzados, basados en las redes convolucionales o las redes de grafos, potencialmente más adecuados para representar la topología espacial del núcleo, e incorporar nuevas variables objetivo relacionadas con criterios de seguridad y con la distribución tridimensional de la potencia. ■

Variable	Neuronas	MSE	NMSE	R^2 (%)
EoC	7	3.762E-04	1.524E-02	98.476
IBC	10	1.805E-03	8.873E-05	99.991
Pow1D	10	1.827E-09	3.363E-03	99.668
Pow2D	16	3.057E-09	3.418E-06	99.999
Pow3D	14	9.366E-09	6.272E-06	99.999
Burnup	8	4.321E-07	1.533E-02	98.469
Burnupmax	10	1.301E-05	7.970E-03	99.206
AxOffset	16	7.466E-07	1.776E-04	99.982
CFHR	10	5.355E-09	1.004E-05	99.999
Hmax	14	3.235E-04	6.652E-06	99.999
Tc	14	1.011E-01	1.112E-04	99.989
Tcoolmax	8	1.611E-04	2.304E-02	97.729
TcoolHmax	22	4.424E-07	1.391E-05	99.999
Ts	7	3.973E-03	8.555E-04	99.915

Tabla 1. Resultados de las estructuras de red neuronal óptimas obtenidas para las distintas variables de respuesta sin agrupamiento. Parámetros calculados con el conjunto de prueba: MSE = error cuadrático medio, NMSE = error cuadrático medio normalizado y R^2 obtenido.



Plataforma Nacional de I+D en protección radiológica (PEPRI)

Alianzas I+D frente a la radiación

Proyecto CRATER. Caracterización radiológica de terrenos afectados por radionucleidos naturales mediante espectrometría gamma in situ.

■ Texto: Ana Fernández | Fotos: PEPRI

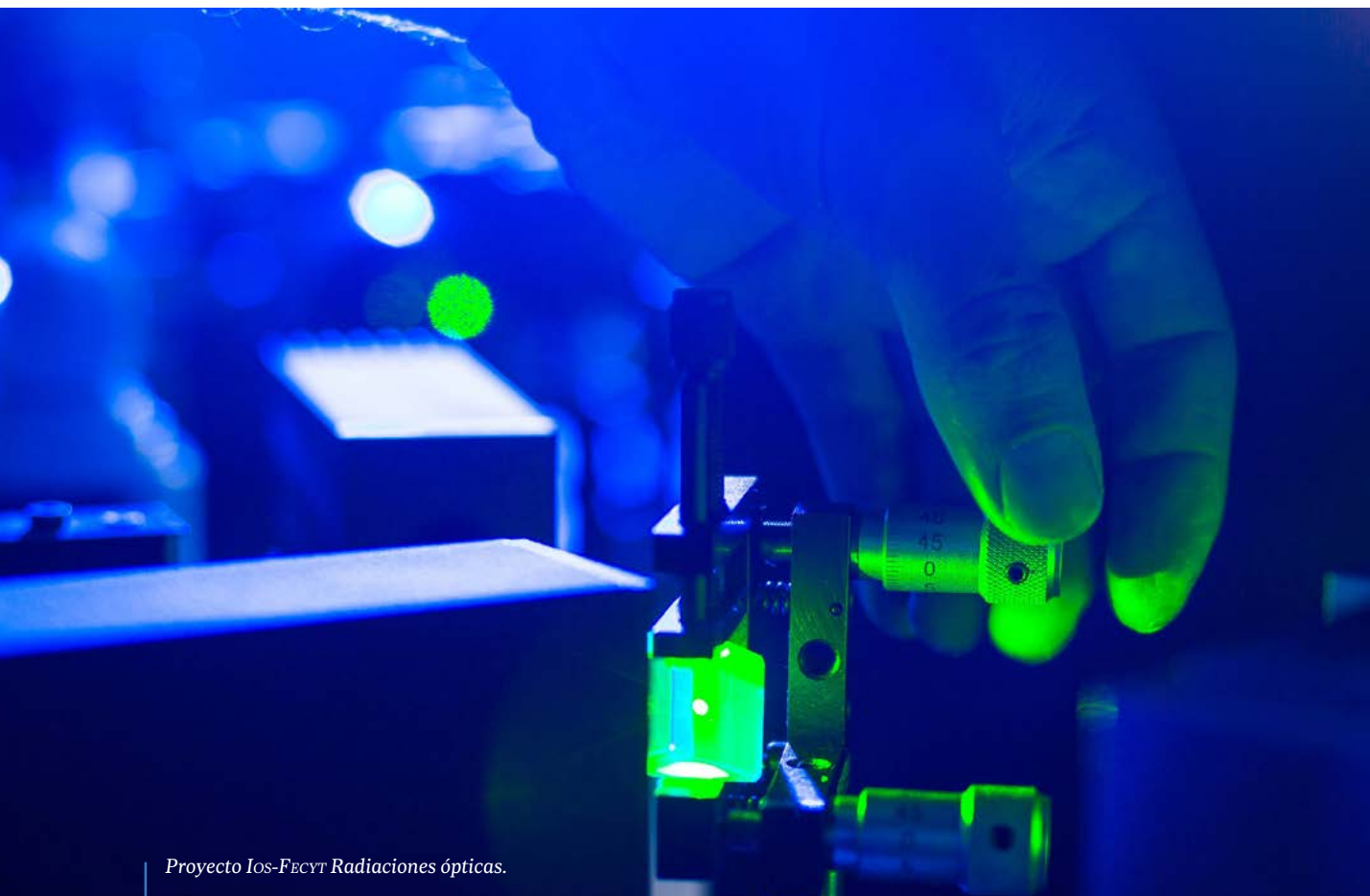
PEPRI surgió en 2014 con el respaldo de la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR) y el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), y el objetivo de funcionar como punto de encuentro entre los distintos actores nacionales de la I+D+i en protección radiológica. Aunque no posee personalidad jurídica ni ejecuta proyectos por sí misma, funciona como catalizador, facilitador de alianzas e impulsor de nuevas líneas de trabajo que responden a necesidades detectadas por los profesionales y organismos vinculados a la entidad. Doce años después de su constitución, cuenta con once grupos de trabajo en continua evolución y más de un centenar de entidades miembro.

En el escenario en el que nació PEPRI en 2014, ya existían en España grupos consolidados de investigación en protección radiológica. La necesidad que venía a cubrir no era la falta de capaci-

dad investigadora, sino la coordinación eficaz entre los distintos grupos y entidades. Las capacidades estaban repartidas entre organismos públicos, universidades, hospitales, centros de inves-

tigación, instalaciones y empresas que tendían a trabajar conforme a sus necesidades inmediatas.

La SEPR impulsó la plataforma junto con el CSN para crear ese punto de encuentro necesario, así



Proyecto IOS-FECYT Radiaciones ópticas.

como para facilitar la detección de nuevas líneas de investigación en un contexto en constante evolución. Otro de los objetivos clave de PEPRI, según explica María Antonia López, representante de la SEPR en la plataforma, era dar mayor visibilidad a la investigación española y reforzar la capacidad de la comunidad científica para trasladar sus necesidades a quienes definen las prioridades y los programas de financiación.

Los estatutos de PEPRI establecen que carece de personalidad jurídica y patrimonio propios y que actúa a través de sus miembros. Por tanto, la plataforma se encarga de ordenar prioridades, conectar equipos y ayudar a construir propuestas, pero son las entidades participantes las que aportan las capacidades, ejecutan los proyectos y concurren a las fuentes de financiación.

La plataforma cuenta con una Asamblea General como órgano



PEPRI aborda la protección frente a las radiaciones ionizantes y no ionizantes en ámbitos médicos, laborales, ambientales e industriales

de decisión y un Consejo Gestor que se ocupa de la dirección ejecutiva. El CSN ostenta la presidencia de la plataforma desde enero de 2017. La Secretaría General, por su parte, corresponde a la SEPR y proporciona continuidad al trabajo de la presidencia, el Consejo Gestor y los grupos.

Grupos de trabajo

La actividad técnica de PEPRI se articula actualmente en once grupos de trabajo orientados a cubrir las diferentes necesidades en materia de protección radiológica presentes en el mundo actual. Cada grupo reúne perfiles de distintos sectores, identi-

fica líneas prioritarias y trabaja para convertirlas en propuestas de investigación. Los grupos se reúnen, sobre todo por vía telemática, cuando el trabajo lo requiere, y los miembros intercambian documentación y desarrollan las propuestas.

La Secretaría destaca la capacidad de evolución y adaptación de los grupos de trabajo de PEPRI. Los estatutos de PEPRI no contemplan a los grupos de trabajo como unidades fijas, sino que se crean para responder a una necesidad y, una vez realizado su trabajo, pueden disolverse, reformularse o fusionarse para adaptarse a nuevas necesidades.

GRUPOS DE TRABAJO DE PEPRI

1 EXPOSICIÓN PLANIFICADA

Protección radiológica ocupacional en centrales nucleares, ciclo del combustible, transporte y aplicaciones médicas, industriales, agrícolas y de investigación.

2 EXPOSICIÓN EXISTENTE

Estudio de situaciones de exposición ya existentes, incluidas las relacionadas con fuentes naturales, como el radón y la radiactividad en el agua potable.

3 EMERGENCIA Y SEGURIDAD FÍSICA

Preparación y respuesta ante emergencias radiológicas, atención a personas expuestas y criterios de gestión durante la emergencia y la recuperación.

4 PÚBLICO Y MEDIOAMBIENTE

Protección radiológica del público y del medioambiente, incluida la vigilancia de la radiación ambiental.

5 GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS

Protección radiológica en la generación, el acondicionamiento y la gestión de residuos; fuentes en desuso; y desmantelamiento y clausura de instalaciones.

6 RADIACIONES NO IONIZANTES

Estudio de los efectos biológicos de los campos electromagnéticos, incluidos los utilizados en telefonía móvil y redes wifi, en población general, profesionales y pacientes.

7 MEDICINA

Protección radiológica en diagnóstico por imagen, procedimientos intervencionistas y tratamientos de oncología radioterápica; dosimetría del paciente, imagen médica y control de calidad del equipamiento.

8 RADIOBIOLOGÍA Y EPIDEMIOLOGÍA

Estudio de los efectos de las radiaciones mediante la radiobiología, la epidemiología y la radiobiología clínica.

9 DETECCIÓN Y MEDIDA

Dosimetría externa, interna, neutrónica, biológica, especial y computacional; instrumentación, medida de radiaciones, maniquíes, calibración y metrología.

10 ASPECTOS SOCIALES

Percepción social del riesgo radiológico e implicaciones éticas de la protección radiológica.

11 ASPECTOS JURÍDICOS

Aspectos jurídicos de la protección radiológica.



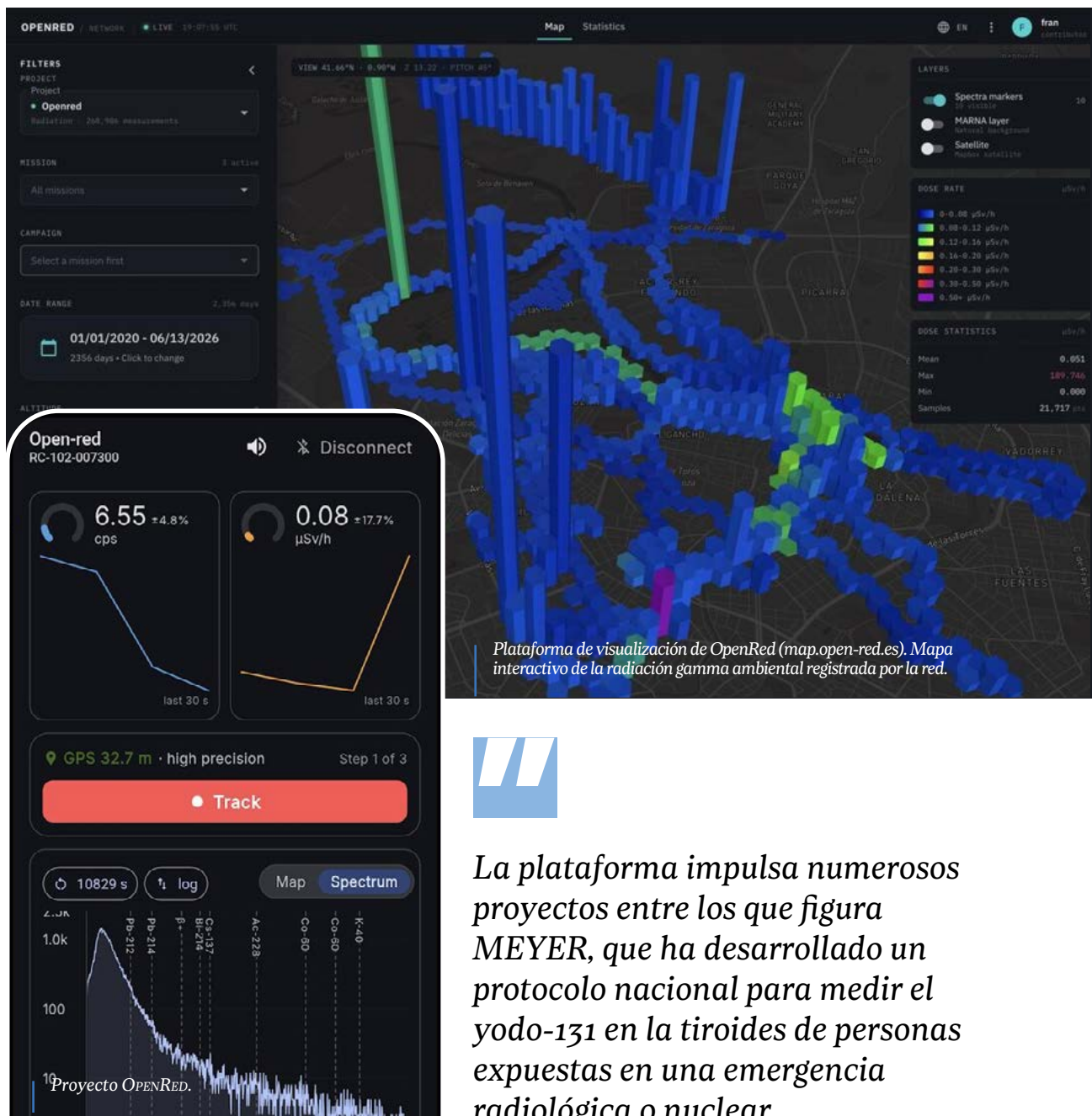
Proyecto MEYER. Protocolo nacional para la medida de yodo en tiroides en emergencias radiológicas.

En el desarrollo de su trabajo, el primer paso consiste en definir con precisión la necesidad que se pretende abordar. Después, se formula una pregunta de investigación concreta, se identifica qué conocimientos e infraestructuras hacen falta, se reúne a quienes pueden aportarlos y se diseñan objetivos y metodología. La preparación de la propuesta debe coordinarse con la búsqueda de una convocatoria adecuada. «Una buena idea no se convierte

automáticamente en un proyecto financiado», resume la Secretaría General de PEPRI.

Entre las vías que siguen los grupos figuran el Programa Anual de Subvenciones del CSN y las convocatorias vinculadas a PIA-NOFORTE, la asociación europea para la investigación en protección radiológica, cofinanciada por Euratom. PEPRI actúa difundiendo estas oportunidades, facilitando el contacto entre posibles socios y ayudando a que una ne-

El proyecto MEYER ha desarrollado un protocolo nacional para medir el yodo-131 en la tiroides de personas expuestas en una emergencia radiológica o nuclear



La plataforma impulsa numerosos proyectos entre los que figura MEYER, que ha desarrollado un protocolo nacional para medir el yodo-131 en la tiroides de personas expuestas en una emergencia radiológica o nuclear

cesidad sectorial madure hasta convertirse en una propuesta competitiva.

La plataforma impulsa numerosos proyectos entre los que figura MEYER, que ha desarrollado un protocolo nacional para medir el yodo-131 en la tiroides de personas expuestas en una emergencia radiológica o nuclear. El área de detección y medida también promovió una campaña

de intercomparación para medir la dosis recibida en el cristalino, especialmente relevante para profesionales que trabajan cerca de fuentes de radiación.

A esta iniciativa se suman ALMAS, centrado en la determinación de emisores alfa en dosimetría interna y vigilancia de área, y la creación de una red de laboratorios de dosi-

metría biológica para reforzar la respuesta ante emergencias.

Los proyectos MENPRO y EDNEP buscan mejorar la dosimetría neutrónica asociada a la protonterapia, una modalidad de radioterapia que utiliza protones para depositar la dosis con gran precisión en el tumor. Otras prioridades exploran la aplicación de la inteligencia artificial y la dosimetría computacional al cálculo de las dosis recibidas por profesionales y pacientes en radiología y cardiología intervencionistas. También se estudia la adaptación de la dosimetría externa a las nuevas magnitudes operacionales y el uso de gammacámaras hospitalarias para evaluar una posible

Proyectos y plataformas de investigación

MEYER

Protocolo Nacional para la Medida de Yodo en Tiroides en Emergencias Radiológicas.

Establece cómo medir yodo-131 en la población expuesta para facilitar su evaluación tras una emergencia.

ALMAS

Estudio de técnicas analíticas para determinar emisores alfa mediante espectrometría de masas y otros métodos

(denominación resumida). Mejora la evaluación de la contaminación radiactiva interna y la vigilancia del lugar de trabajo.

URACAM

Acrónimo de URAnio en CAMpo.

Estrategia de detección *in situ* y remediación de terrenos que permita optimizar el volumen de residuos que se deben gestionar.

MENPRO

Capacidad Metrológica de los Equipos de Dosimetría Neutrónica en Instalaciones de Protonterapia.

Estudia la capacidad y fiabilidad de los equipos que miden la dosis de neutrones en estas instalaciones.

EDNEP

Evaluación de Equipos de Dosimetría de Neutrones para Instalaciones de Protonterapia.

Evalúa detectores y dosímetros para mejorar la protección de profesionales, pacientes y público.

MEENAS

Consorcio de plataformas europeas de investigación en protección radiológica. Reúne a MELODI, EURADOS, EURAMED, NERIS, ALLIANCE y SHARE para coordinar prioridades y una hoja de ruta común.

MELODI

Multidisciplinary European Low Dose Initiative

–Iniciativa Europea Multidisciplinar sobre Bajas Dosis–. Investiga los efectos y riesgos de la exposición a dosis bajas de radiación ionizante.

EURAMED

European Alliance for Medical Radiation Protection Research

–Alianza Europea para la Investigación en Protección Radiológica Médica–. Promueve la investigación para mejorar la protección radiológica en medicina.

EURADOS

European Radiation Dosimetry Group

–Grupo Europeo de Dosimetría de Radiaciones–. Desarrolla y armoniza métodos e instrumentos para medir las dosis de radiación ionizante.

NERIS

European Platform on Preparedness for Nuclear and Radiological Emergency Response and Recovery

–Plataforma Europea de Preparación para la Respuesta y Recuperación ante Emergencias Nucleares y Radiológicas–. Mejora la preparación, las decisiones de protección y la recuperación tras una emergencia.

ALLIANCE

European Radioecology Alliance

–Alianza Europea de Radioecología–. Investiga el comportamiento de las sustancias radiactivas en el medioambiente y sus efectos sobre las personas y los ecosistemas.

SHARE

Social Sciences and Humanities in Ionising Radiation Research

–Ciencias Sociales y Humanidades en la Investigación sobre Radiaciones Ionizantes–. Integra las dimensiones sociales, éticas y humanas en la investigación y la toma de decisiones sobre radiaciones.

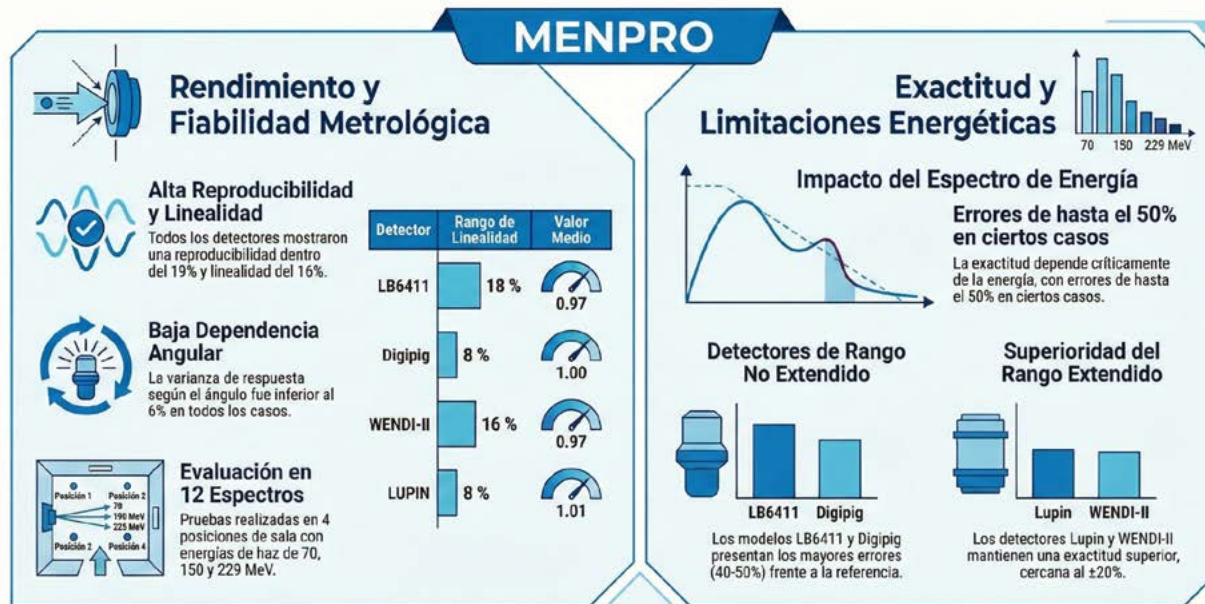


Proyecto SUSMATEMIRON. Estrategias sostenibles para determinar y eliminar contaminantes ambientales mediante materiales avanzados ecológicos integrados en dispositivos 3D reutilizables y reciclables.



Proyecto IOS-FECYT. Interacción de ondas y sociedad: ciencia accesible para Administraciones públicas.

Conclusiones MENPRO: Capacidad Metrológica de Dosímetros de Neutrones



© NotebookLMI

La plataforma actúa como puente entre la investigación española y PIANOFORTE mediante la difusión de sus convocatorias, conectando a posibles socios y ayudando a convertir necesidades sectoriales en propuestas competitivas

contaminación interna del personal que manipula radiofármacos.

OpenRed, otro proyecto vinculado a PEPRI, ha creado una red de ciencia ciudadana para medir la radiación gamma ambiental; URACAM aborda la medida de uranio y la remediación de terrenos; y NORM.4R estudia la gestión y valoración de residuos que contienen materiales radiactivos de origen natural. La plataforma cuenta, además, con un grupo dedicado específicamente a las radiaciones no ionizantes.

Estos proyectos ponen de manifiesto que la protección radiológica abarca ámbitos muy diversos, algunos muy próximos a la vida cotidiana. Incluye las exposiciones médicas, industriales y de investigación, la protección del público y del medioambiente y las derivadas de fuentes naturales, como el radón, que puede acumularse en edificios y lugares de trabajo. Este campo continúa ampliándose a medida que aparecen nuevas técnicas y se identifican escenarios de exposición que hasta ahora habían quedado fuera del foco.

Una puerta a Europa

La coordinación nacional cobra especial importancia cuando una propuesta busca financiación europea. Muchos especialistas de PEPRI participan también en las seis plataformas que integran el consorcio MEENAS: MELODI, sobre los efectos de las radiaciones; EURAMED, en el ámbito médico; EURADOS, en dosimetría; NERIS, en emergencias; ALLIANCE, en radioecología; y SHARE, en ciencias sociales y humanidades.

Estas plataformas elaboran agendas estratégicas que alimentan una hoja de ruta común y participan en PIANOFORTE, que lanza convocatorias abiertas para proyectos de protección radiológica. Pertenecer a PEPRI no garantiza la financiación de una propuesta, pero ayuda a llegar a ella con socios identificados, experiencia colaborativa y resultados previos. También permite que las prioridades españolas se discutan en una comunidad científica que trabaja a escala europea. ■



Katalin Karikó

El largo camino del ARN mensajero

Katalin Karikó (1980). Laboratorio de ARN del Centro de Investigación Biológica de la Academia de Ciencias de Hungría. Foto: Katalin Karikó.

Durante décadas, Katalin Karikó trabajó sobre una molécula que buena parte de la comunidad científica consideraba demasiado frágil, inestable e inflamatoria para convertirse en una herramienta terapéutica. Su empeño por comprender y modificar el ARN mensajero acabaría proporcionando una de las claves científicas que hicieron posibles las vacunas de ARNm frente a la covid-19. El Premio Nobel de Fisiología o Medicina de 2023 reconoció una trayectoria que ilustra, quizá como pocas, cómo una investigación básica, sostenida durante años, puede acabar sustentando una transformación médica de alcance mundial.

■ Texto: Anna Burgstaller

Katalin Karikó nació el 17 de enero de 1955 en Szolnok (Hungría) y creció en Kisújszállás, una pequeña localidad de la Gran Llanura húngara. Su infancia transcurrió lejos de los ambientes académicos, en una casa de adobe sin agua

corriente. Su padre era carnicero y su madre trabajaba como contable.

Su interés por las ciencias naturales apareció pronto y encontró estímulo en sus profesores. Estudió Biología en la Universidad de Szeged, donde se licenció en 1978 y

obtuvo el doctorado en Bioquímica en 1982. Posteriormente se incorporó al Centro de Investigación Biológica de Szeged, perteneciente a la Academia Húngara de Ciencias. Allí comenzó a investigar los mecanismos mediados por ácido

una proteína de interés. La idea era conceptualmente sencilla. Convertirla en medicina resultaría extraordinariamente difícil.

Empezar de nuevo

En 1985, la pérdida de financiación del grupo de investigación en el que trabajaba puso fin a la etapa húngara de Karikó. Decidió emigrar a Estados Unidos junto con su marido, Béla Francia, y su hija Zsuzsanna, entonces de dos años y futura campeona olímpica de remo.

La familia llegó con escasos recursos. Debido a las restricciones cambiarias existentes en la Hungría comunista, trasladaron parte de sus ahorros –algo más de mil dólares– ocultos en el osito de peluche de la niña. La anécdota adquirió carácter casi simbólico en los relatos posteriores sobre una carrera marcada por la precariedad, los reinicios y una singular resistencia frente al fracaso.

Karikó comenzó a trabajar en la Universidad de Temple (Filadelfia) y en 1989 se incorporó a la Universidad de Pensilvania. Allí consagraría más de dos décadas a investigar el ARNm transcrito *in vitro* como posible plataforma terapéutica.

El objetivo no consistía en alterar de manera permanente el material genético de las células, sino en transmitirles una instrucción molecular transitoria. Una vez leído el mensaje y fabricada la proteína correspondiente, el ARNm se degrada mediante los mecanismos celulares habituales. Precisamente, esa naturaleza efímera era una de sus grandes virtudes potenciales. También uno de sus principales problemas.

Una molécula prometedora y problemática

El ARNm sintetizado en el laboratorio presentaba dos obstáculos fundamentales. En primer lugar, era inestable y podía degradarse con rapidez. En segundo término, el sistema inmunitario innato tendía a reconocerlo como una señal de peligro.

Las células disponen de mecanismos muy antiguos capaces de identificar determinadas estructuras moleculares asociadas a microorganismos. Cuando esos sensores reconocían el ARNm producido *in vitro*, se desencadenaba una respuesta inflamatoria. La molécula que debía actuar como mensajera terapéutica podía convertirse así, paradójicamente, en una señal de alarma.

Esta dificultad contribuyó al escepticismo que rodeó durante años la investigación sobre el ARNm. A ello se sumaba un entorno académico fuertemente competitivo. Los proyectos de Karikó tuvieron



¿Qué hace especial a la pseudouridina?

La pseudouridina (Ψ) es un nucleósido modificado presente de forma natural en distintos tipos de ARN celular. Karikó y Weissman demostraron que la incorporación de determinados nucleósidos modificados al ARNm producido *in vitro* reducía la activación de sensores de la inmunidad innata. Los trabajos posteriores mostraron que la pseudouridina podía además favorecer una mayor producción de la proteína codificada por el ARNm. Las vacunas de ARNm frente a la covid-19 desarrolladas por Pfizer-BioNTech y Moderna emplearon N1-metilpseudouridina (m1 Ψ), una modificación relacionada que mejora las propiedades del ARNm para su utilización como plataforma vacunal.

ribonucleico o ARN, un territorio científico que determinaría el resto de su carrera.

Entre las distintas clases de ARN se encuentra el ARN mensajero (ARNm), molécula que transporta temporalmente la información genética necesaria para que los ribosomas de la célula sinteticen

una determinada proteína. Esa condición de mensajero transitorio encerraba una posibilidad extraordinaria: si fuera posible introducir en el organismo un ARNm diseñado en el laboratorio, podrían proporcionarse a las células instrucciones para fabricar durante un tiempo limitado



Katalin Karikó y Drew Weissman, galardonados con el Premio Nobel de Medicina 2023.



dificultades reiteradas para obtener financiación y su posición en la Universidad de Pensilvania sufrió varias degradaciones profesionales.

En 1995 atravesó uno de los momentos más difíciles de su vida: fue diagnosticada de cáncer al tiempo que su marido afrontaba problemas para regresar a Estados Unidos cuando salía del país por motivos profesionales. Karikó continuó, no obstante, trabajando sobre la misma pregunta científica.

La perseverancia desempeñó un papel evidente en su trayectoria, pero lo decisivo fue la capacidad de formular la pregunta adecuada: ¿por qué algunas moléculas de ARN activaban intensamente la inmunidad innata y otras, presentes de manera natural en las células, no lo hacían?

Weissman y una pregunta compartida

A finales de la década de los noventa, Karikó conoció al inmunólogo Drew Weissman en la Universidad de Pensilvania. Weissman investigaba las células dendríticas, componentes esenciales del sistema inmunitario, y buscaba nuevas estrategias para desarrollar vacunas, inicialmente frente al virus de la inmunodeficiencia humana y el síndrome de inmunodeficiencia adquirida (VIH/sida). Karikó acumulaba años

de experiencia en la producción y manipulación del ARNm.

Ambos comenzaron a estudiar cómo respondían las células dendríticas a diferentes tipos de ARN. La comparación reveló una diferencia crucial. Mientras determinados ARN producidos artificialmente desencadenaban una potente respuesta inflamatoria, otras moléculas de ARN presentes de forma natural en las células no provocaban el mismo efecto. Una de las claves estaba en su composición química.

El ARN está constituido por cadenas de nucleótidos, formados a su vez por una base nitrogenada –adenina, guanina, citosina o uracilo–, una molécula de ribosa y un grupo fosfato. Cuando la base se une únicamente a la ribosa se forma un nucleósido, y algunos de estos nucleósidos pueden presentar modificaciones químicas naturales. Karikó y Weissman estudiaron qué ocurría cuando determinados nucleósidos modificados se incorporaban al ARN sintetizado *in vitro*. Comprobaron que algunas de estas modificaciones reducían de forma notable la activación de la inmunidad innata; entre ellas se encontraba la pseudouridina, un nucleósido modificado presente de manera natural en distintos tipos de ARN.

Los resultados, publicados en 2005 en la revista *Immunity*, demostraron que el empleo de nucleósidos modificados permitía evitar la activación de determinados receptores de tipo Toll, entre ellos TLR7 y TLR8, implicados en el reconocimiento de ARN extraño. El descubrimiento cambió la relación entre el ARNm sintético y el sistema inmunitario: ya no era inevitable que aquella molécula fuese recibida por la célula como una señal de alarma.

El alcance del hallazgo fue mucho más allá de una reducción de la inflamación. En trabajos posteriores, Karikó, Weissman y sus colaboradores comprobaron que el ARNm que incorporaba pseudouridina podía producir mayores cantidades de proteína y presentaba mejores propiedades biológicas. La plataforma comenzaba a ser viable.

Del descubrimiento a la tecnología

El artículo de 2005 constituye el gran punto de inflexión de la historia, pero no su desenlace. Entre aquel descubrimiento y las vacunas de 2020 mediaron numerosos avances científicos y tecnológicos. En 2008, el grupo mostró que la incorporación de pseudouridina no solo reducía la inmunogenicidad del ARNm, sino que aumentaba su capacidad de traducir



Katalin Karikó, miembro honoraria de la Academia Húngara de Ciencias (MTA), tras pronunciar su conferencia inaugural en el Gran Salón del Vigadó.

ción y su estabilidad. Posteriormente se investigaron otros mecanismos celulares que explicaban esa mayor producción de proteína.

Otro problema procedía del propio proceso de fabricación. La transcripción *in vitro* podía generar contaminantes, entre ellos ARN de doble cadena, capaces de activar la respuesta inmunitaria. Karikó y sus colaboradores demostraron que su eliminación mediante procedimientos de purificación reducía considerablemente esa activación y mejoraba la producción de proteínas. Cada paso fue aproximando una molécula experimental a una plataforma terapéutica.

Una precisión necesaria

Las vacunas de ARNm frente a la covid-19 fueron el resultado de la

convergencia de numerosas líneas de investigación desarrolladas durante décadas. El trabajo de Karikó y Weissman resolvió uno de sus problemas fundamentales: cómo modificar el ARNm para limitar una respuesta inmunitaria innata indeseada y favorecer una producción eficaz de proteína. Pero era necesario resolver también otra cuestión decisiva: cómo introducir una molécula tan frágil en las células del organismo.

La respuesta llegó, entre otros avances, de las nanopartículas lipídicas. Estas estructuras microscópicas encapsulan el ARNm, lo protegen frente a la degradación y facilitan su entrada en las células. Su desarrollo fue el resultado de décadas de investigación en química de lí-

pidos y sistemas de administración de ácidos nucleicos. Las vacunas de Pfizer-BioNTech y Moderna fueron posibles por la confluencia de ambas historias: un ARNm molecularmente optimizado y un sistema capaz de transportarlo hasta las células.

El descubrimiento de Karikó y Weissman no produjo un reconocimiento inmediato. Ambos impulsaron la protección y explotación de la tecnología y trataron de trasladarla al ámbito terapéutico, pero durante años el interés industrial fue limitado.

En 2013, Karikó dejó la Universidad de Pensilvania para incorporarse a BioNTech, empresa alemana centrada, entre otros ámbitos, en el desarrollo de tratamientos inmunológicos contra el cáncer. Ocupó primero una vicepresidencia y posteriormente la vicepresidencia sénior, con responsabilidades en el desarrollo de proteínas terapéuticas basadas en ARN. La compañía proporcionó el entorno industrial necesario para avanzar en la transformación de aquella plataforma molecular en aplicaciones clínicas.

Cuando, en enero de 2020, científicos chinos hicieron pública la secuencia genética del nuevo coronavirus SARS-CoV-2, el ARNm llevaba décadas de desarrollo a sus espaldas. BioNTech y Moderna disponían ya de plataformas capaces de diseñar rápidamente moléculas de ARNm que codificaran una proteína concreta. En este caso, la información seleccionada correspondía a la proteína de la espícula del coronavirus, frente a la que se pretendía inducir una respuesta inmunitaria.

Las vacunas que finalmente llegaron a la población utilizaron N1-metilpseudouridina, una modificación de la pseudouridina que ofrece ventajas adicionales para la expresión de proteínas, junto con sistemas avanzados de purificación, diseño molecular y encapsulación en nanopartículas lipídicas. La rapidez con la que pudieron desarrollarse no fue, por tanto, fruto de una investigación improvisada durante la pandemia, sino de la acumulación de conocimiento científico durante varias décadas.

La otra mitad del problema: transportar el mensaje

Modificar el ARNm no era suficiente. La molécula debía sobrevivir fuera de la célula y atravesar su membrana. Las nanopartículas lipídicas (LNP) resolvieron buena parte de ese problema. Formadas por distintos tipos de lípidos, encapsulan el ARNm, lo protegen frente a la degradación y facilitan su liberación en el interior celular. Su desarrollo constituye una línea científica distinta y complementaria a la investigación de Karikó y Weissman. Sin ambos avances –ARNm optimizado y sistemas eficaces de administración– las vacunas actuales de ARNm no habrían sido posibles.

El Nobel para una modificación aparentemente mínima

El 2 de octubre de 2023, la Asamblea Nobel del Instituto Karolinska anunció la concesión a Katalin Karikó y Drew Weissman del Premio Nobel de Fisiología o Medicina. El comité distinguió sus descubrimientos sobre las modificaciones de las bases de los nucleósidos que hicieron posible el desarrollo de vacunas eficaces de ARNm contra la covid-19. El reconocimiento llegaba dieciocho años después del artículo fundamental de *Immunity* y casi cuatro décadas después de que Karikó comenzara a estudiar el ARN en Hungría.

Antes habían llegado algunos de los principales galardones científicos internacionales, entre ellos el Premio Lasker-DeBakey de Investigación Médica Clínica, el Premio Princesa de Asturias de Investigación Científica y Técnica, el Premio Wolf de Medicina, el Breakthrough Prize y el Premio Tang de Ciencias Biofarmacéuticas. El Nobel transformó definitivamente la posición pública de una investigadora que durante buena parte de su carrera había trabajado lejos del centro del reconocimiento académico.

Más allá de la covid-19

La pandemia mostró la capacidad de las plataformas de ARNm para

desarrollar vacunas con gran rapidez, pero sus posibilidades exceden ampliamente el ámbito de una única enfermedad infecciosa. La tecnología se investiga actualmente en vacunas frente a distintos patógenos y en estrategias terapéuticas contra el cáncer, enfermedades genéticas y otras patologías. Algunas aplicaciones utilizan el ARNm para enseñar al sistema inmunitario a reconocer determinadas proteínas; otras pretenden lograr que las propias células fabriquen temporalmente una proteína cuya ausencia o alteración provoca enfermedad.

No todas estas aproximaciones alcanzarán la práctica clínica. Persisten desafíos relacionados con la estabilidad, la administración selectiva a determinados tejidos, la duración de la expresión, la respuesta inmunitaria y la fabricación a gran escala, pero el principio científico ha quedado demostrado. Una molécula que durante años fue considerada demasiado inestable para servir como medicamento puede convertirse en una plataforma capaz de dar instrucciones temporales a las células.

Karikó dejó su puesto ejecutivo en BioNTech en 2022 y mantiene su relación con la compañía como asesora externa. Continúa asimismo vinculada a la Universidad de



Rompiendo barreras Mi vida dedicada a la ciencia

Karikó, Katalin

Editorial: Geoplaneta

Fecha de la edición: 2024

Lugar de la edición: Barcelona

Colección: Ciencia

Encuadernación: rústica

Medidas: 23 cm

264 páginas

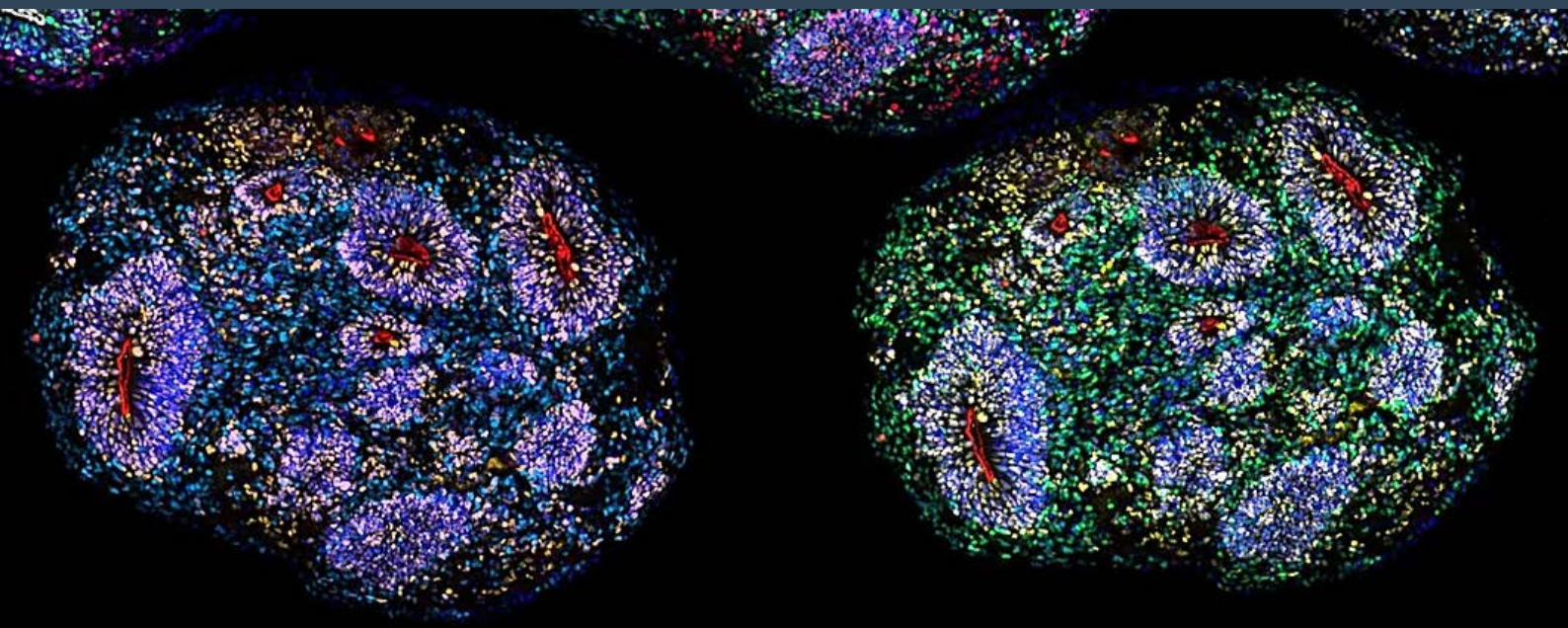
Idiomas: español



Recepción de los premios Nobel estadounidenses de 2023 en la embajada de Estados Unidos en Suecia: Drew Weissman, Mouni Bawendi, Katalin Karikó, el embajador Erik Ramanathan, Claudia Goldin, Pierre Agostini y Alexei Ekimov.

Pensilvania y a la Universidad de Szeged. En 2023 publicó sus memorias, *Breaking Through: My Life in Science*.

Su trayectoria suele presentarse como una historia de perseverancia, pero contiene una enseñanza científica quizá más profunda. Los grandes avances no siempre nacen de una idea súbita ni siguen una trayectoria lineal. A veces surgen de una pregunta mantenida durante años, de la corrección paciente de pequeños obstáculos moleculares y de la confluencia, en el momento adecuado, de conocimientos procedentes de disciplinas diferentes. En el caso de Katalin Karikó, una modificación química casi imperceptible contribuyó a cambiar el destino de una molécula. Y esa molécula acabaría cambiando la medicina. ■



Organoides cerebrales humanos que maduran durante años en el laboratorio

Un equipo dirigido por investigadores de la Universidad de Harvard ha conseguido mantener organoides de corteza cerebral humana en cultivo durante más de cinco años, lo que permite explorar etapas de maduración difícilmente accesibles fuera del organismo. Estos modelos tridimensionales, obtenidos a partir de células madre pluripo-

tentes humanas, no son «cerebros en miniatura», pero reproducen determinados tipos celulares y procesos del desarrollo cerebral. El estudio muestra que sus células mantienen durante años programas de expresión génica asociados a la maduración y que su edad, estimada mediante patrones de metilación del ADN, guarda una estrecha relación con el tiempo

transcurrido en cultivo. Además, células progenitoras procedentes de organoides envejecidos conservaron una suerte de «memoria» de su historia de desarrollo al generar tipos neuronales propios de etapas posteriores. La técnica amplía las posibilidades de estudiar el desarrollo cerebral posnatal y distintas enfermedades neurológicas y neuropsiquiátricas. ■

Un posible agujero negro envuelto en gas en el universo primitivo

El telescopio espacial James Webb ha observado una fuente excepcionalmente compacta, denominada MoM-BH*-1, cuya luz procede de unos 660 millones de años después del Big Bang. El equipo responsable del hallazgo propone que su singular espectro puede explicarse mediante un agujero negro supermasivo rodeado por una envoltura de gas extremadamente denso y turbulento, casi desprovista de polvo. El modelo reproduce características difíciles de

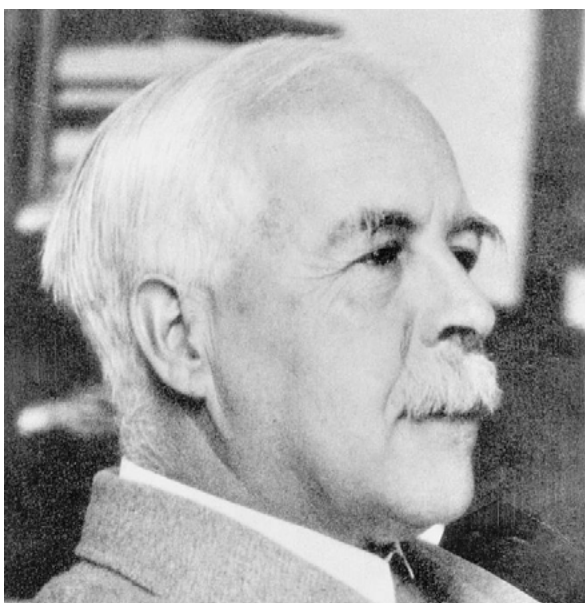


explicar mediante una población estelar convencional, entre ellas una discontinuidad de Balmer muy pronunciada y profundas líneas de absorción de hidrógeno.

La elevada opacidad del gas modificaría la radiación procedente de las inmediaciones del agujero negro y explicaría buena parte de su inusual espectro. Aunque la interpretación sigue dependiendo del modelo propuesto, MoM-BH*-1 podría aportar pistas sobre el rápido crecimiento de los agujeros negros en el universo temprano y sobre la naturaleza de algunos de los enigmáticos *little red dots* –pequeños puntos rojos– descubiertos por el James Webb. ■



EFEMÉRIDES



Cien años de «fotón», el nombre de los cuantos de luz

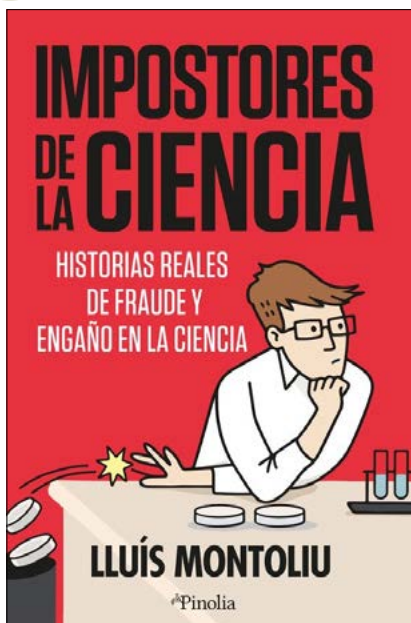
Más de dos décadas antes, Albert Einstein había propuesto en 1905 los «cuantos de luz» para explicar, entre otros fenómenos, el efecto fotoeléctrico, ampliando la idea de cuantización de la energía introducida por Max Planck al estudiar la radiación del cuerpo negro. La hipótesis de Einstein encontró inicialmente una fuerte resistencia, pero recibió apoyos experimentales decisivos durante las décadas siguientes. El efecto Compton, observado en la dispersión de rayos X, proporcionó además nuevas evidencias del comportamiento corpuscular de la radiación. Einstein recibió el Premio Nobel de Física de 1921, concedido expresamente por el descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico.

Un siglo después de la propuesta terminológica de Lewis, el fotón se entiende como el cuanto del campo electromagnético: una partícula elemental sin carga eléctrica y, dentro del modelo estándar de la física de partículas, el bosón mediador de la interacción electromagnética. Su energía depende de la frecuencia de la radiación, de modo que bajo un mismo concepto se engloban desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Esta naturaleza explica su papel esencial tanto en procesos fundamentales de interacción entre materia y radiación como en tecnologías que van desde los láseres, la espectroscopia y las comunicaciones ópticas hasta la imagen médica, la radioterapia y numerosos sistemas de detección. ■

El 18 de diciembre de 1926, *Nature* publicó *The Conservation of Photons*, una carta en la que el químico estadounidense Gilbert N. Lewis introdujo el término «fotón». Lewis, sin embargo, no lo empleó con el significado actual, sino para designar una entidad hipotética asociada a los procesos de emisión y absorción de radiación que, según su propuesta, se conservaría sin ser creada ni destruida. Su interpretación física no prosperó, pero el nombre sí lo hizo y acabó designando el cuanto de radiación electromagnética.



LIBROS



Impostores de la ciencia

La ciencia dispone de mecanismos para contrastar sus resultados, detectar errores y corregir el conocimiento publicado, pero quienes la practican no son inmunes a las presiones del sistema ni a las vulneraciones de la integridad científica. En *Impostores de la ciencia. Historias reales de fraude y engaño en la ciencia*, el investigador Lluís Montoliu examina casos de fabricación y manipulación de datos, plagio y otras prácticas contrarias a la integridad científica. A través de episodios históricos y contemporáneos, la obra explica también cómo funcionan las retractaciones, el fenómeno de las llamadas «fábricas de artículos» y algunos de los mecanismos empleados para descubrir comportamientos irregulares. El recorrido pone asimismo el foco en la transparencia, la revisión crítica, la formación ética y los códigos de buenas prácticas como instrumentos para proteger la integridad y la credibilidad de la investigación. ■

Montoliu, L. (2026)
Impostores de la ciencia.
Historias reales de fraude y engaño en la ciencia
Editorial Pinolia, 240 pp.



EN RED

Una vacuna personalizada de ARN mensajero avanza frente al melanoma



Moderna y MSD han anunciado resultados positivos del análisis intermedio del ensayo de fase III INTerpath-001, que evalúa una terapia individualizada de ARN mensajero frente a la recurrencia del melanoma tras su extirpación quirúrgica. El estudio reunió a 1137 pacientes con extirpación de melanoma cutáneo de alto riesgo. Los investigadores compararon la evolución de quienes recibieron la terapia personalizada de ARN mensajero junto con pembrolizumab, fármaco de inmunoterapia, con la de quienes fueron tratados únicamente con pembrolizumab. La combinación mejoró significativamente la super-

vivencia libre de recurrencia –objetivo primario– y la supervivencia libre de metástasis a distancia –principal objetivo secundario–. La supervivencia global continúa en evaluación. El tratamiento se diseña para cada paciente a partir de las mutaciones de su tumor y codifica hasta 34 neoantígenos destinados a inducir una respuesta de los linfocitos T contra las células tumorales. Este avance marca el primer ensayo de fase III con resultados positivos de una terapia individualizada de neoantígenos basada en ARN mensajero. ■

Más información: <https://www.modernatx.com/ir-insights-phase-3-intesmeran>



Nuevos indicios de un glueball en la partícula X(2370)

La colaboración internacional BESIII ha obtenido nuevos indicios de que la partícula X(2370) podría contener como componente dominante un *glueball* o «bola de gluones», un estado predicho por la cromodinámica cuántica. Los gluones son los bosones mediadores de la interacción fuerte y, al portar carga de color, pueden interactuar entre sí, lo que permite la existencia teórica de estados ligados formados esencialmente por estas partículas. A partir de unos diez mil millones de desintegraciones del mesón J/ψ , BESIII ha observado una fuerte supresión de uno de los canales de desintegración de X(2370), indicio de que se comporta como un singlete de sabor, es decir, de forma esencialmente independiente del tipo de quark, una



propiedad esperada para un *glueball*. El resultado se suma a otras características de la partícula compatibles con el *glueball* pseudoescalar más ligero y refuerza esta hipótesis, aunque todavía no permite una identificación definitiva. El trabajo ha sido difundido como *preprint* y aún no ha pasado por revisión por pares. ■

Más información: <https://arxiv.org/abs/2607.20366>

REDES



@Neurocosas

Canal dirigido por Pablo Barrecheguren, bioquímico, doctor en Biomedicina y divulgador con formación especializada en comunicación científica. Su contenido se centra especialmente en la neurociencia, explicando de forma amena y didáctica temas como el funcionamiento del cerebro, la psicología o el neuromarketing. También aborda cuestiones relacionadas con la biología y recomienda libros de divulgación científica.



Encuentros con la Ciencia

Impulsada desde la Universidad de Málaga, esta iniciativa acerca al público la investigación desarrollada en centros científicos españoles. Su perfil reúne conferencias, encuentros, noticias y actividades sobre ámbitos que van de la genética y la neurociencia a la astronomía. Sus contenidos permiten seguir tanto la actualidad investigadora como distintas iniciativas de divulgación y encuentro entre especialistas y ciudadanía.



@Ensedeciencia

Esta cuenta de divulgación de origen mexicano reúne noticias, curiosidades, imágenes y vídeos sobre ciencia y tecnología. Astronomía, naturaleza, salud o medioambiente forman parte de sus contenidos, presentados generalmente mediante explicaciones breves y directas. Su actividad adapta noticias y conceptos científicos a los formatos propios de las redes sociales.



@infosnackia

Perfil de divulgación científica que explica fenómenos del espacio y de la Tierra a través de vídeos generados con inteligencia artificial. Con un formato ágil, visual y pensado como pequeños «snacks» de conocimiento, combina entretenimiento e información para despertar la curiosidad del público general.



@sciencewithana

La ingeniera química Ana Laura Pacheco divulga ciencia mediante vídeos breves, experimentos y contenidos sobre química, astronomía y fenómenos cotidianos. Sus publicaciones parten con frecuencia de preguntas o situaciones sencillas para introducir conceptos científicos y explicar los mecanismos que hay detrás de ellos. El proyecto *Science with Ana* adapta estos contenidos al formato audiovisual y breve característico de TikTok.

El CSN y los farmacéuticos refuerzan su colaboración en radiofarmacia



El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y el Consejo General de Colegios Oficiales de Farmacéuticos (CGCOF) han firmado un convenio marco de colaboración para impulsar actuaciones conjuntas en radiofarmacia, protección radiológica y divulgación sanitaria.

El acuerdo fue suscrito por los presidentes de ambas instituciones, Juan Carlos Lentijo y Jesús Aguilar. Contempla acciones formativas dirigidas a profesionales de la farmacia, así como iniciativas de educación sanitaria para mejorar el conocimiento de la población sobre el uso adecuado de los radiofármacos y las medidas de protección radiológica asociadas. También prevé actuaciones destinadas a mejorar el funcionamiento de las unidades de radiofarmacia y el intercambio de conocimiento entre ambas entidades.

La colaboración podrá concretarse en proyectos específicos, abiertos a la participación de administraciones sanitarias, sociedades científicas, centros de investigación y otras entidades nacionales e internacionales. Para coordinar su desarrollo se constituirá una comisión de seguimiento integrada por representantes del CSN y del CGCOF. ■

Seguridad e innovación, claves de la gestión futura de los residuos radiactivos



El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y Enresa celebraron en la Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP) el curso *Innovación, futuro y seguridad en la gestión de los residuos radiactivos y el desmantelamiento de centrales nucleares*, que reunió a especialistas del ámbito regulador, científico e industrial. El encuentro abordó la evolución del marco regulador, la gestión del combustible gastado, las nuevas tecnologías aplicadas a la caracterización y el desmantelamiento y los retos asociados al futuro Almacenamiento Geológico Profundo (AGP).

El presidente del CSN, Juan Carlos Lentijo, subrayó que el 7.º Plan General de Residuos Radiactivos sitúa la gestión del combustible gastado entre las prioridades estratégicas del país y exige planificación estable, rigor técnico y una regulación sólida. También destacó el papel de la investigación y la innovación para reforzar la seguridad nuclear y la protección radiológica. El programa incluyó la participación de representantes de la autoridad reguladora francesa y una visita técnica a Equipos Nucleares, S.A. (ENSA). ■

Ejercicio de control de accesos del PENTA en Ascó

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) participó junto a los Mossos d'Esquadra en un ejercicio de control de accesos del Plan de Emergencia Nuclear Exterior de Tarragona (PENTA), en el entorno de la central nuclear Ascó.

La actuación permitió revisar la coordinación entre los organismos implicados y comprobar el funcionamiento de los controles radiológicos previstos para situaciones de emergencia. El CSN asumió sus funciones dentro del Grupo Radiológico, supervisó la asignación dosimétrica al personal de intervención y desarrolló formación específica para los agentes participantes. El ejercicio revisó también las rutas entre los Centros de Coordinación Ope-



rativa Municipal y los puntos de control de accesos contemplados en el PENTA. Para el seguimiento de las dosis recibidas por los intervinientes, el organismo emplea DosiApp, una aplicación desarrollada por el propio CSN y reconocida como buena práctica por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). ■

El CSN refuerza en Viena su papel en el debate internacional sobre seguridad nuclear

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) concluyó su participación en la Conferencia Internacional del OIEA sobre seguridad de instalaciones nucleares, celebrada en Viena y presidida por Juan Carlos Lentijo. El encuentro reunió a reguladores, operadores y expertos de todo el mundo para analizar los retos presentes y futuros de la seguridad nuclear.

La delegación española participó activamente en los debates sobre liderazgo y cultura de seguridad, resiliencia ambiental y evolución de los riesgos asociados al emplazamiento y diseño de instalaciones. Entre otros asuntos, se abordaron el impacto del cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos, la digitalización, la inteligencia artificial y el



aprendizaje automático aplicados al sector nuclear.

En la clausura, Lentijo destacó la necesidad de aprovechar la experiencia acumulada para impul-

sar la innovación, garantizar que el progreso tecnológico avance siempre acompañado de la seguridad y reforzar la cooperación internacional. ■

ACUERDOS DEL PLENO DEL CSN

Renovación de Almaraz

El Pleno del CSN informó favorablemente, con condiciones, sobre la renovación de explotación de las dos unidades de la central nuclear Almaraz hasta 2030. El dictamen se basa en la evaluación técnica y en la supervisión continuada de la instalación, e incorpora requisitos sobre seguridad, gestión del combustible gastado y dotación de personal. El informe se remitirá al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, competente para resolver la solicitud.



Acceso a
todas las actas



Protección radiológica en Galicia

El Pleno del CSN informó favorablemente sobre el Plan Especial de Protección Civil ante el Riesgo Radiológico de Galicia (PERRGAL), que establece el marco de actuación ante posibles emergencias radiológicas. También aprobó un convenio con el Gobierno de Navarra para reforzar la coordinación, el intercambio de información y la preparación frente a este tipo de situaciones. Además, informó favorablemente varias autorizaciones relativas a instalaciones radiactivas en Valencia y Madrid.

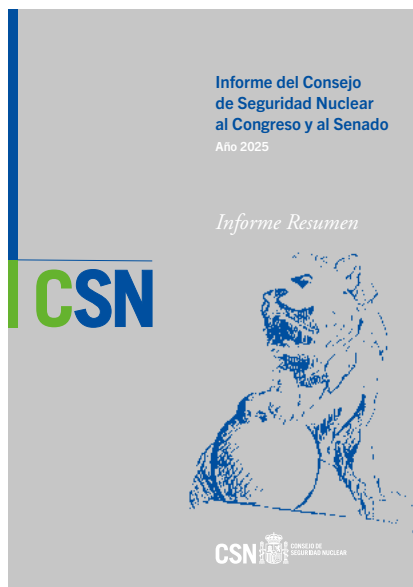
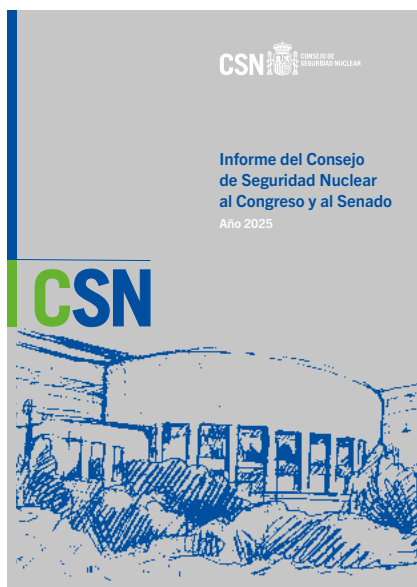
El Centro de Información del CSN incorpora audioguías en español e inglés



El Centro de Información del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) incorporará audioguías en español e inglés para que grupos y visitantes particulares puedan recorrer de forma autónoma sus instalaciones. El espacio ofrece contenidos divulgativos sobre radiaciones ionizantes, sus aplicaciones y las medidas de protección de las personas y el medio ambiente. La visita se articula en torno a 29 módulos interactivos dedicados a la radiación natural y artificial, los posibles riesgos y el papel del CSN como organismo regulador. Entre sus recursos destaca una cámara de niebla que permite observar las trazas de la radiación ambiental. ■



ÚLTIMAS PUBLICACIONES



Catálogo de publicaciones



CONSULTA EL CATÁLOGO DE PUBLICACIONES DEL CSN.
Disponible en:





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) [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 > Forest and Landscape

Landscapes have never been static. Climate and human activity have continuously transformed the land, altering forests, crops, watercourses, and inhabited areas. Managing the land means anticipating change and preserving its capacity to withstand it

REPORTS

14 > Radioactive Waste in Custody

Current radioactive waste management is based on characterisation, conditioning, containment and long-term monitoring. Custody requires maintaining a continuous chain of control, information and responsibility over decades

24 > The Invisible Chain

Twenty million shipments each year support nuclear medicine, industry and the nuclear fuel cycle. The main challenge is not an accident, but a refusal

INTERVIEW

30 > Silvia Calzón Fernández

CSN Commissioner, former Secretary of State for Health, epidemiologist and specialist in preventive medicine and public health

TECHNICAL ARTICLES

36 > International Workshop on Decision-Making in the Development of Deep Geological Disposal Projects

A forum for reflection and dialogue on one of the most complex challenges, with implications extending over very long timescales

SCIENCE AND EDUCATION

44 > Learning Science by Doing Science: The Need to Interpret, Compare and Decide

Teaching science as a method of analysis is a central task for any education system

RADIOGRAPHY

50 > Intercomparisons: Better Measurement for More Effective Monitoring

CSN R&D

52 > Optimising Core Design Using Artificial Intelligence

The CLPD-IA project has established a solid methodological foundation for optimising the design of light-water reactor cores by combining neutron-thermohydraulic simulations with advanced AI techniques

ENTITIES

54 > PEPRI

Since 2014, PEPRI has served as a meeting point for Spain's R&D&I community in radiation protection. Supported by the SEPR and the CSN, it fosters partnerships and promotes new lines of work

NAMES IN SCIENCE

60 > Katalin Karikó: mRNA's Long Road

How sustained basic research can, over time, underpin a medical transformation with global reach



¡Conecta con nosotros!



https://twitter.com/CSN_es



[https://www.youtube.com/c/
ConsejoSeguridadNuclear](https://www.youtube.com/c/ConsejoSeguridadNuclear)



[https://www.linkedin.com/company/
consejo-de-seguridad-nuclear/](https://www.linkedin.com/company/consejo-de-seguridad-nuclear/)



<http://www.csn.es>

TRANSPARENCIA > COMUNICACIÓN > DIVULGACIÓN