

CSN

alfa

Revista de seguridad
nuclear y protección
radiológica

Consejo de
Seguridad Nuclear

Número 62
Junio 2025



Biotecnología al servicio de la agricultura

Año Internacional de la
Ciencia y la Tecnología
Cuánticas: un siglo de
investigación y progreso

Radiactividad ambiental:
ciencia, tecnología y
prevención avalan un sólido
sistema de protección

Ana M.^a Crespo de las Casas,
primera mujer en presidir la
Real Academia de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales



¡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

La biotecnología aplicada a la agricultura abre este nuevo número de *Alfa* y revela nuevas técnicas genéticas, como la edición con CRISPR-Cas9 o el fenotipado de precisión, que están transformando los cultivos para hacerlos más resistentes, sostenibles y productivos. Investigadores españoles relatan cómo trabajan con tecnologías de secuenciación, modelado computacional y microorganismos beneficiosos para diseñar la agricultura del futuro: más resiliente al cambio climático, con menor dependencia de productos químicos y mejor adaptada a la seguridad alimentaria global.

Naciones Unidas ha declarado 2025 como Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuántica. Computadores, sensores y comunicaciones cuánticas prometen transformar sectores clave como la medicina, la energía o la seguridad, pero también ayudar a buscar soluciones para retos globales a los que se enfrenta la humanidad. Este ejemplar concede especial importancia a la presentación del primer ordenador con tecnología 100 % europea por parte del Barcelona Supercomputing Center. Artur García, investigador que lidera el área cuántica del BSC, explica detalladamente el alcance de este hito tecnológico. A sus declaraciones se suman las valiosas aportaciones de Ignacio Cirac, director de la División Teórica del Instituto alemán

Max Planck de Óptica Cuántica. Apoyado en una sólida y destacada trayectoria, analiza la situación actual y los retos de futuro en este apasionante campo que promete revolucionar el mundo conocido.

En el ámbito de la seguridad y protección radiológica, *Alfa* profundiza en el control de la radiactividad ambiental, tarea constante y silenciosa que protege a la ciudadanía y al entorno. España, que ha logrado consolidar uno de los sistemas de vigilancia más sólidos de Europa, estudia la incorporación de inteligencia artificial y nuevas tecnologías de detección para mejorar aún más la precisión y capacidad de respuesta ante incidentes radiológicos de este tipo.

Esta edición significa también la figura de Ana María Crespo de las Casas, primera mujer en presidir la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. A través de una extensa entrevista, pone el acento en la necesidad de incrementar el esfuerzo privado en I+D, al tiempo que insta al sector público a aportar mayor estabilidad presupuestaria en este ámbito.

La sección técnica analiza en profundidad los sistemas de habitabilidad de las salas de control en las centrales nucleares, su evolución normativa, las metodologías de prueba de infiltraciones y el papel clave de la ventilación segura durante condiciones accidentales.

Completa este apartado el espacio destinado a la nueva IS-47 del CSN, cuyo reto es universalizar la protección contra el radón en el entorno laboral.

Ciencia y Arquitectura se alían en esta ocasión, en un ejercicio de virtuosismo técnico y de diseño. Un viaje que lleva desde las cúpulas romanas hasta los algoritmos de diseño contemporáneo. Geometría, materiales, simbología y percepción confluyen para convertir el acto de habitar en una manifestación de conocimiento. A través de maravillas como la Alhambra y el Partenón, o el observatorio ALMA en Atacama y la Estación Espacial Internacional, se explora cómo las edificaciones expresan la ciencia de su tiempo y afectan profundamente a quienes las habitan.

La ciencia con nombre propio rinde homenaje en este número a Hideki Yukawa, físico teórico japonés que revolucionó la física nuclear con su teoría del mesón y se convirtió en el primer Nobel de Física de su país. Un fascinante itinerario intelectual que va desde la precoz fascinación por la geometría y la filosofía china hasta su defensa del desarme nuclear tras Hiroshima. Yukawa no separó nunca ciencia y humanismo, y su legado continúa hoy en el Instituto de Física Teórica que lleva su nombre en Kioto, símbolo de una ciencia comprometida con la paz y el progreso ético.

alfa

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Editada por el CSN

Número 62
Junio 2025



Comité Editorial

Juan Carlos Lentijo
Pilar Lucio Carrasco
Francisco Castejón Magaña
Silvia Calzón Fernández
Teresa Vázquez Mateos
Javier Zarzuela Jiménez
Ignacio Martín Granados
J. Pedro Marfil Medina
Manuel Luis Lozano Leyva

Comité de Redacción

J. Pedro Marfil Medina
Natalia Muñoz Martínez

Vanessa Lorenzo López
Adriana Scialdone García
Arturo Fernández García
Verónica Crespo Val
Manuel Luis Lozano Leyva
Ana I. Martínez Fernández

Edición y distribución

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

Coordinación editorial

Editorial MIC · 987272727
www.editorialmic.com

Fotografías

CSN, Editorial MIC, BSC, CECA,
CNA, Envato, Freepick, istoc-
kphoto

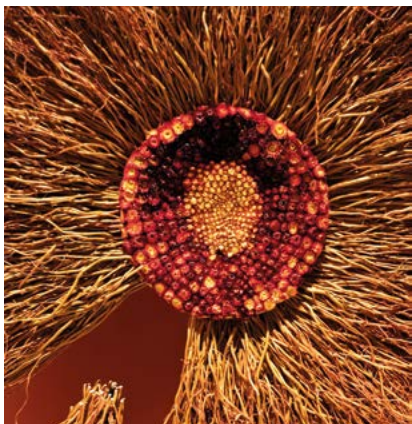
Impresión

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 **Biotecnología al servicio de la agricultura**

Herramientas que permiten acelerar los procesos de selección y desarrollar variedades más adaptadas a los desafíos actuales, como el cambio climático.

REPORTAJES

14 **Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuántica**

Cien años después del establecimiento de las bases de la mecánica cuántica, la ciencia que revolucionó la comprensión de la realidad da paso a una nueva generación de tecnologías.

22 **Radiactividad ambiental: presencia invisible, realidad controlada**

España cuenta con uno de los sistemas de vigilancia radiológica ambiental más sólidos de Europa, avalado por el Organismo Internacional de Energía Atómica.



ENTREVISTA

28 **Ana María Crespo de las Casas**

Tras una destacada trayectoria, ha hecho historia al convertirse en la primera mujer que preside la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales desde su fundación en 1847.

ARTÍCULOS TÉCNICOS

32 **Pruebas de infiltraciones de la envolvente de sala de control en centrales nucleares**

40 **La nueva IS-47 del CSN: el reto de universalizar la protección contra el radón en el ámbito laboral**



CIENCIA Y ARQUITECTURA

- 46 **El arte de habitar el mundo**
Viaje por los espacios que nos definen

RADIOGRAFÍA

- 52 **Nuevo portal web de protección radiológica del CIEMAT**

CSN I+D

- 54 **Exposición a radiación ionizante en anfibios: evaluación de marcos internacionales de protección radiológica**

ENTIDADES

- 56 **Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón**
Javalambre: Observatorio Astrofísico para cartografiados de gran escala del universo

CIENCIA CON NOMBRE PROPIO

- 60 **Hideki Yukawa, arquitecto invisible de la fuerza nuclear**
El primer Nobel de Física de Japón transformó la comprensión del núcleo atómico al predecir la existencia de los mesones, y se convirtió en símbolo de la ciencia comprometida con la paz.

- 65 **Reacción en cadena**
68 **Panorama**
70 **Últimas publicaciones**





Biotecnología al servicio de la agricultura

La mejora genética ha sido la base del desarrollo de la agricultura desde que el ser humano dejó de ser recolector para convertirse en productor de sus propios alimentos. La domesticación de especies silvestres permitió el desarrollo de variedades con mayores rendimientos, frutos de mejor calidad o mejor sabor, mucho antes del descubrimiento de los genes por parte de Mendel. Con el tiempo, la comprensión de los mecanismos genéticos y los avances en biotecnología han abierto nuevas posibilidades para la mejora de los cultivos. Estas herramientas permiten acelerar los procesos de selección y desarrollar variedades más adaptadas a los desafíos actuales, como el cambio climático. Se abre paso la agricultura del futuro.

■ Texto: **Noemí Trabanco** | Fotos: **Envato**

Al observar una mazorca de maíz silvestre, conocida como teocintle, se aprecia que es bastante diferente a las mazorcas que hoy se consumen y se pueden encontrar en los super-

mercados. Estas diferencias son el resultado de miles de años de domesticación por parte del ser humano: durante más de diez mil años, ha seleccionado las plantas que daban frutos más grandes y

de mejor calidad. Cuando antepasados del Neolítico pasaron de ser meros recolectores a cultivar sus propios alimentos, comenzó la mejora genética de las plantas. Sin conocimientos científicos,



pero mediante la observación y la selección, lograron transformar especies silvestres en cultivos que se adaptaban mejor a sus necesidades. El proceso continuó, permitiendo también la adaptación de cultivos foráneos, como la patata o el tomate en Europa. La gran revolución ocurrió en el siglo XIX, cuando Gregor Mendel descubrió los principios de la herencia genética y se sentaron las bases para la mejora genética moderna.

Gracias al desarrollo científico y las innovaciones en herramientas biotecnológicas, los investigadores están abriendo nuevas vías para adaptar los cultivos a los retos del presente y del futuro. El aumento de la población mundial, los efectos del cambio climático y la exigencia de una agricultura más sostenible requieren el desarrollo de variedades vegetales más eficientes, resilientes y adaptadas a estas nuevas necesidades para mantener

la seguridad alimentaria. Estas herramientas tecnológicas ayudan a entender mejor cómo las plantas responden a condiciones adversas como temperaturas más altas o sequías. Entender la base molecular que explica cómo se comportan las plantas es clave para los programas de mejora genética dirigida. Como explica María Reguera, investigadora del Ramón y Cajal y profesora titular en la Universidad Autónoma de Madrid, «una de las herramientas más potentes que tenemos es la secuenciación genómica y transcriptómica. Gracias a esta tecnología, podemos leer el ADN de las plantas y saber qué genes se activan cuando se enfrentan, por ejemplo, a estrés». Reguera lidera el grupo de Estrés abiótico en plantas y su impacto en calidad nutricional de semillas, dedicado a estudiar cómo las variaciones ambientales afectan las características nutricionales de semillas de cultivos emergentes en Europa, como la quinoa.

Otras herramientas biotecnológicas, como el fenotipado de alta precisión, permiten caracterizar el comportamiento de las plantas frente a determinados cambios ambientales, midiendo de forma automatizada y precisa múltiples características (fenotipos) de la planta en tiempo real y a gran escala. Para ello, los centros de investigación disponen de instalaciones altamente especializadas que están equipadas con cámaras multi o hiperespectrales y cámaras térmicas, sensores de imagen, sistemas automatizados o drones y plataformas móviles para la evaluación en campo. Asimismo, los avances en modelización y simulación computacional representan un importante apoyo para predecir el rendimiento de los cultivos en distintos escenarios climáticos. «Con estos modelos podemos, entre otras cosas, anticipar qué variedades de trigo serían más productivas en regiones donde la



MARÍA REGUERA

Gracias a la secuenciación genómica y la transcriptómica podemos leer el ADN de las plantas y saber qué genes se activan cuando enfrentan estrés



temperatura media ha aumentado en los últimos años, o dónde sería más eficiente cultivar especies más resistentes a la sequía», declara la investigadora.

Un ejemplo de estas instalaciones es el Centro Tecnológico de Investigación Multicultivo que la multinacional Corteva Agriscience tiene en La Rinconada, Sevilla. Es el mayor centro a nivel global de investigación para el desarrollo de nuevas variedades de girasol, uno de los cultivos para los que la compañía desarrolla programas de mejora junto con los de maíz, trigo, soja y colza. «El cultivo en condiciones controladas en invernadero permite el desarrollo de cuatro generaciones anuales, de manera que los caracteres de interés tanto nutricionales –como puede ser el girasol alto oleico– como de resistencias a plagas y enfermedades son seleccionados mediante marcadores moleculares», explica Alfredo Mateos, científico e investigador principal de mejora genéti-

El Centro Tecnológico de Investigación Multicultivo centra sus programas de mejora en la incorporación de resistencias a plagas y enfermedades, la mejora del valor nutricional, la adaptabilidad a nuevas condiciones ambientales o la mejora de determinadas características agronómicas

ca del maíz en la compañía. «Esto permite poner en el mercado en el menor tiempo posible nuevas variedades con caracteres de interés para el agricultor y el consumidor final», añade.

Este Centro Tecnológico centra sus programas de mejora en la incorporación de resistencias a plagas y enfermedades, la mejora del valor nutricional, la adaptabilidad a nuevas condiciones ambientales o la mejora de determinadas característi-

cas agronómicas. «Modificando, por ejemplo, la arquitectura de la planta se puede reducir el encame o caída ante condiciones climáticas adversas, adaptar de su ciclo de maduración a las diferentes zonas de cultivo o incrementar la eficiencia en el uso de agua y nutrientes», puntualiza Mateos.

Otro de los desarrollos biotecnológicos que ha abierto la puerta a una mejora genética más eficaz y dirigida es la técnica CRISPR-Cas9,



Centro Tecnológico de Investigación
Multicultivo de La Rinconada



mecanismo basado en un sistema natural de defensa bacteriana que permite cortar y modificar el ADN en una localización específica. Reguera expone que, gracias a esta tecnología, son posibles cambios muy precisos en el genoma de una planta, que mejoran, entre otros aspectos, su tolerancia a la sequía o su capacidad para resistir plagas sin necesidad de utilizar tantos fitosanitarios. «Es como ajustar los engranajes de un reloj para que funcione mejor en condiciones difíciles», aclara. Aunque muchos productos editados con CRISPR no se consideran transgénicos si no contienen ADN de otra especie, la clasificación legal es heterogénea según el país. En este sentido, Mateos asegura estar convencido de que, «en el futuro, supondrán un gran avance en todos los sentidos, una vez que se aprueben finalmente en Europa».

Por su parte, José Antonio Abelenda, investigador en la Misión Biológica de Galicia (MBG-CSIC)

y experto en el estudio de la floración, incide en que no se puede ignorar que todavía es necesario un conocimiento más amplio sobre qué gen o genes deben modificarse y qué consecuencias indirectas puede tener esta modificación para muchos caracteres de interés. «Desconocemos aspectos muy básicos de la fisiología y biología de las plantas. Las consecuencias colaterales de editar un gen en concreto son muchas veces desconocidas. Por ahora, los casos de éxito (como eliminar las gliadinas que causan la intolerancia al gluten en el trigo) han sido en genes o rutas excepcionalmente bien descritas y conocidas por largo tiempo. Sin embargo, es una herramienta impresionante a nuestra disposición», explica.

Controlar la floración

La producción de flores es una etapa crítica para la agricultura, ya que influye directamente en la producción de frutos y semillas. El

rendimiento y gestión de los cultivos y la calidad final del fruto están en gran medida determinados por el momento y las condiciones ambientales en las que se produce la floración. Las especies vegetales tienen distintos requerimientos específicos para que se induzca desde los propios genes a determinadas condiciones ambientales de luz, temperatura o fotoperíodo (relación día/noche). Si se producen situaciones de estrés ambiental, se puede adelantar, retrasar o inhibir la floración. Las plantas tienen distintas sensibilidades incluso en periodos muy cortos –pero constantes– de alteraciones en la temperatura o el clima.

La mayoría de los cultivos son más sensibles a incrementos de temperatura durante la noche. Un ejemplo extremo de esta sensibilidad de las plantas a la temperatura nocturna es la floración de algunos cactus, como la «reina de la noche» (*Selenicereus grandiflorus*) que, una o dos noches al año,



“

Las plantas poseen mecanismos exquisitos para la medición del tiempo, basándose en la cuantificación de cambios en la luz y la temperatura

abre sus flores para atraer a los polinizadores con su aroma, pero durante el día las cierra. «Las plantas poseen mecanismos exquisitos para la medición del tiempo, basándose en la cuantificación de cambios en la luz y la temperatura», revela Abelenda. Por ello, las modificaciones en el clima que están teniendo lugar en la actualidad también afectan de forma distinta a las especies de interés agrícola. «En muchos casos, como ciertas brasicáceas o frutales, periodos intensos de temperatura elevada provocan que las plantas florezcan antes. Sin embargo, cuando ciertas variedades de brasicáceas de primavera o verano sufren altas temperaturas retrasan o incluso inhiben la floración», añade.

Que la floración tenga lugar a des-tiempo provoca enormes pérdidas en la productividad. «Las plantas producen los frutos y semillas que nos comemos con lo producido por el tejido vegetativo, como las hojas. Si la planta no ha tenido tiempo suficiente y florece antes de tiempo, la calidad y cantidad de lo producido será menor», explica el investigador. El control de la floración es, por tanto, un factor clave para la adaptación de los cultivos a condiciones climáticas cambiantes. Sin embargo, los mecanismos genéticos implicados en el proceso son complejos e involucran múltiples genes e intrincados mecanismos de regulación. El desarrollo de variedades adaptadas es complicado en el corto pla-

zo. Según José Antonio Abelenda, «el futuro no está planteado para la mejora y obtención del cultivo perfecto, sino para toda una pléyade de variantes disponibles del cultivo que permitan flexibilizar las opciones de conseguir el máximo rendimiento al mínimo coste».

Microorganismos aliados

La biotecnología microbiana en plantas utiliza microorganismos beneficiosos, como bacterias y hongos, para potenciar el crecimiento vegetal, mejorar la salud de los cultivos y aumentar su productividad de forma sostenible. Estos microorganismos pueden, por ejemplo, fijar nitrógeno atmosférico, producir fitohormonas que estimulan el



JOSÉ ANTONIO ABELEÑA

El futuro no está planteado para la obtención del cultivo perfecto sino para toda una pléyade de variantes del cultivo que permitan flexibilizar las opciones de conseguir el máximo rendimiento al mínimo coste

desarrollo de las plantas o actuar como agentes de biocontrol frente a patógenos. Además, pueden contribuir a incrementar la tolerancia de los cultivos frente a condiciones adversas. «El uso de microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPR) –bacterias y hongos que estimulan el desarrollo de las plantas– está ayudando a que las plantas sean más resilientes al estrés ambiental», revela María Reguera. La aplicación de estos microorganismos se traduce en el uso de biofertilizantes, biopesticidas y consorcios microbianos adaptados a diferentes entornos agrícolas. Este tipo de soluciones no solo mejora la eficiencia productiva, sino que también representa una alternativa más respetuosa con el

medioambiente al reducir el uso de productos químicos y minimizar el impacto de la agricultura sobre la calidad del suelo.

El uso de virus como herramientas para inmunizar a los seres humanos frente a algunas enfermedades graves constituye uno de los pilares de las vacunas. Estos organismos podrían servir, de forma análoga, para la «inmunización vegetal» frente a enfermedades infecciosas. La empresa española Abiopep, una *spin-off* del grupo de Patología Vegetal del CEBAS-CSIC con sede en Murcia, ha desarrollado un producto fitosanitario innovador contra el virus del mosaico del pepino (PepMV) en tomate. El producto está basado en aislados atenuados de otras cepas del virus que infecta

las plantas de tomate sin causarles daño, pero impidiendo la infección por cepas más agresivas de PepMV. Es este caso, el virus fue identificado casi por casualidad y su capacidad infectiva, pero no patogénica, permitió el desarrollo de esta solución biotecnológica. En la misma línea, el investigador Fabio Pasin, del Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas (IBMCP, centro mixto del CSIC y la Universidad Politécnica de Valencia), trabaja en biotecnología de virus vegetales explorando el uso de virus atenuados como vectores para introducir genes beneficiosos en cultivos. «La idea aquí va más allá –expone Pasin–: ¿podemos aprovechar todo el conocimiento que tenemos sobre la



biología molecular de los virus de plantas para diseñar un virus que no exista en la naturaleza, pero que otorgue a las plantas un fenotipo interesante, difícil o incluso imposible de encontrar de forma natural?». Mediante esta estrategia se podría, por ejemplo, introducir un virus inocuo y que produzca una proteína que confiera resistencia frente a un patógeno o una proteína que regule la floración. Esto se ha probado en cítricos, a escala de laboratorio, y ha permitido reducir los tiempos para seleccionar determinados materiales de interés. La normativa actual permite el uso de virus existentes, pero no el uso de virus recombinantes, algo que sí sucede en el desarrollo de vacunas para humanos y animales o en determinadas terapias génicas



FABIO PASIN

No existen precedentes y es un tema que, ante el desconocimiento, puede asustar, pero nuestra idea es que, del mismo modo que existen vacunas basadas en virus recombinantes, exista algo parecido para plantas

Acabar con el HBL

La empresa biotecnológica estadounidense Silvec Biologics anunció a finales del pasado año que el producto basado en virus de ARN recombinante para el control del reverdecimiento de los cítricos o Huanglongbing (HLB) ha pasado a la fase de revisión científica completa dentro del proceso de registro de pesticidas, conforme a la Ley de Mejora de Regulación de Pesticidas de la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). El HBL, enfermedad que afecta a los cítricos en todo el mundo, está causado por una bacteria que es a su vez propagada a través del insecto psílido asiático de los cítricos. Los frutos de plantas infectadas solo pueden comercializarse para la elaboración de zumos, ya que presentan mala coloración, sabor amargo y forma irregular. El tratamiento de la enfermedad se basó durante años en el uso de plaguicidas contra el vector de transmisión y de fertilizantes para aumentar la productividad, pero el uso de plaguicidas ha derivado en el desarrollo de resistencia en el insecto. En Estados Unidos, la enfermedad se extiende por diversos estados productores y en Florida ha supuesto una reducción del 80 % de la producción.

para el tratamiento de patologías humanas. «No existen precedentes y es un tema que, ante el desconocimiento, puede asustar, pero nuestra idea es que, del mismo modo que existen vacunas basadas en virus recombinantes, exista algo parecido para plantas», añade el investigador. Otra de las claves es el uso de virus muy específicos de una determinada especie o con un rango de huéspedes muy limitado, o la modificación del virus para evitar que su vector de transmisión pueda transferirlo a otras especies vegetales. Pasin incide en que se trata, al mismo tiempo, de una cuestión económica. «Los productos de uso agrícola no pueden alcanzar los precios de un tratamiento farmacéutico, por lo que muchas grandes empresas no lo

ven rentable, en especial, al tener también en cuenta la necesidad de un cambio en la legislación vigente», concluye.

La agricultura del mañana

Sobre el futuro de la agricultura, los científicos y expertos en innovación tienen claro que el avance de los programas de mejora y el desarrollo de nuevas variedades y cultivos adaptados a las nuevas condiciones debe ir de la mano de la investigación de los mecanismos regulatorios del desarrollo vegetal y de su interacción con el medio. Para ello, es imprescindible contar con especies modelo, con genomas más sencillos, que permiten la realización de experimentos en condiciones controladas. Gracias a estas investigaciones, «podemos descubrir genes y rutas metabólicas clave que después sirven como base para desarrollar nuevas variedades. Sin ese conocimiento detallado sobre cómo las plantas gestionan el agua, cómo activan sus defensas frente a un patógeno o cómo optimizan el uso de nutrientes, no sería posible avanzar en técnicas como la edición genética o la selección asistida por marcadores», resalta María Reguera. No obstante, los investigadores también destacan la importancia de realizar estudios comparativos en cultivos asociados con las especies modelo. «Hay proce-

sos que son totalmente imposibles de estudiar en organismos modelo. Yo, que he dedicado gran parte de mi carrera a estudiar la tuberización en patata, no podría estudiar este proceso en un organismo que no fuese el propio cultivo. El futuro, desde mi punto de vista, es la recreación de la planta cultivada en versiones más manejables en el laboratorio».

Además de la innovación biotecnológica, la incorporación de prácticas agronómicas más sostenibles y la innovación en las técnicas de manejo de los cultivos son elementos clave. En este sentido, el Centro Tecnológico de Corteva Agriscience combina esas estrategias para mejorar la resiliencia de los cultivos y asegurar la seguridad alimentaria en un mundo cambiante. Otra pieza clave es contar con la biodiversidad vegetal como fuente de variabilidad genética. «Es una herramienta fundamental para la identificación de genes de interés que puedan conferir ventajas adaptativas. Permite que nuevas poblaciones o variedades se adapten a cambios ambientales y sobrevivan a condiciones adversas o cambiantes», indica Alfredo Mateos.

La colaboración internacional y el desarrollo de proyectos de innovación donde se fomente la participación no solo de instituciones de investigación y empresas biotecnológicas, sino también de otros actores del sector agrícola son una excelente forma de buscar soluciones a los problemas a los que se enfrenta la agricultura. En Europa, la Comisión Europea, desde su Comisionado para la Agricultura y sus mecanismos de financiación a la innovación, como el Programa Marco Horizonte Europa, está tratando de fomentar estas alianzas, más con la situación geopolítica actual. El pasado 8 de mayo tuvo lugar una conferencia sobre cómo modelar el futuro de la agricultura y el sector agroalimentario, donde buena parte de las discusiones se centraron en la necesidad de aumentar la resiliencia a los riesgos climáticos y las crisis económicas y políticas mediante la colaboración entre todos los actores implicados. Un gran reto por delante. ■

Además de la innovación biotecnológica, la incorporación de prácticas agronómicas más sostenibles y la innovación en las técnicas de manejo de los cultivos son elementos clave





Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuántica

Un siglo de investigación y progreso

■ Texto: Isabel Robles

Cien años después del establecimiento de las bases de la mecánica cuántica, la ciencia que revolucionó la comprensión de la realidad da paso a una nueva generación de tecnologías. Computadores, sensores y comunicaciones cuánticas prometen transformar sectores clave como la medicina, la energía o la seguridad, pero también ayudar a buscar soluciones para retos globales a los que se enfrenta la humanidad, como el cambio climático.

Naciones Unidas ha declarado 2025 como Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas, con el fin de reconocer su importancia y conmemorar los cien años de desarrollo de una ciencia que se ha demostrado imprescindible. Sin ir más lejos, la física cuántica «ha tenido un gran impacto en el conocimiento que tenemos de todo lo que nos rodea», explica

Ignacio Cirac, director de la División Teórica del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica: «la física cuántica describe el mundo desde lo más microscópico hasta lo macroscópico». Además, también ha influido en otros ámbitos científicos, como las matemáticas –ya que «se trata de una teoría en la que, para poder hacer predicciones, hacen falta cálculos complejos y, por ende, el

desarrollo de nuevas teorías»– o la ingeniería electrónica, basada en la posibilidad de diseñar y construir semiconductores.

Sin embargo, el conocimiento del mundo cuántico es relativamente reciente: su formulación teórica comenzó hace apenas un siglo. Fue entonces cuando un puñado de físicos, incapaces de dar solución con las leyes tradicionales a varios



problemas que aparecían en sus experimentos, empezaron a considerar otras formas de describir la naturaleza. El lenguaje que rompía con la física clásica sentó las bases de una revolución intelectual y tecnológica sin precedentes.

Cien años desde la creación de la mecánica matricial

En 1900, Max Planck propuso una nueva teoría para entender la radiación electromagnética que emiten los cuerpos negros. Hasta entonces, la física clásica no era capaz de explicar la distribución de la energía observada en el espectro continuo de este tipo de radiación. La ley de Rayleigh-Jeans, válida para longitudes de onda largas, predecía que la intensidad de la radiación aumentaba sin límite a medida que se acortaba la longitud de onda, lo que no era compatible con la observación experimental: se trataba de la «catástrofe ultravioleta». Sin embargo, Planck consideró que la energía no fluye de forma continua, sino en unidades discretas que denominó «cuantos». Acababa de establecer las bases de la mecánica cuántica.

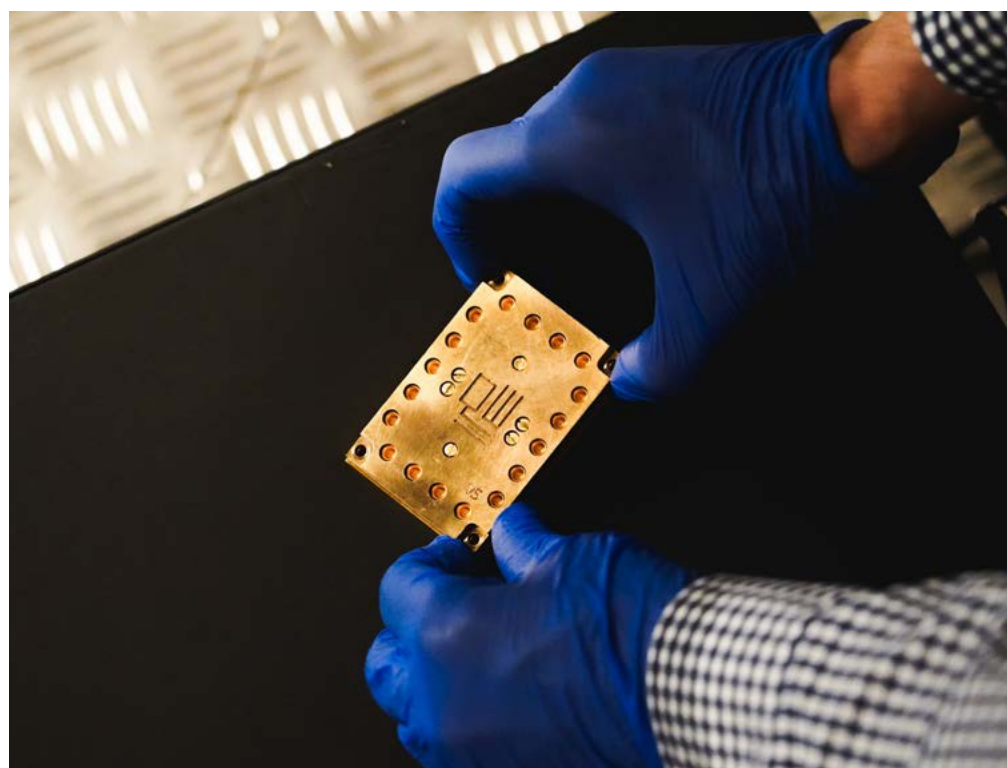
En 1905, Albert Einstein, partiendo de la idea de Planck, demostró que la luz no solo tenía propiedades de onda, sino también de partícula, teoría que, en 1924, el físico Louis-Victor de Broglie amplió a la materia, en especial refiriéndose a los electrones.

Todas estas teorías fragmentarias no acababan de describir el comportamiento del mundo cuántico. Fue entonces (1925), cuando Werner Heisenberg concibió una formulación matemática basada en matrices –que desarrollaría junto con Born y Jordan– y, más tarde, el principio de indeterminación. Al mismo tiempo, Erwin Schrödinger, en una estancia en Suiza, daba con la ecuación que describía la evolución temporal de una partícula subatómica de naturaleza ondulatoria y no relativista.

A partir de esta primera revolución, el conocimiento del mundo cuántico no ha hecho más que ampliarse. La comprensión y aplicación de las propiedades de la mecánica cuántica permitieron sentar las bases de tecnologías que hoy son fundamentales para la computación, la medicina o las comunicaciones, gracias a la creación de láseres, micropro-

cesadores y el resto de las aplicaciones electrónicas. La actualidad se encuentra inmersa en la segunda revolución cuántica. «Hasta hace treinta años, algunas leyes de la física cuántica que son más especiales o contraintuitivas no se podían explorar, casi no se podían ni observar. Sin embargo, el desarrollo tecnológico nos ha permitido tener acceso a esas nuevas leyes que nos permiten, por ejemplo, manejar información de una manera distinta a la que hemos hecho hasta ahora», explica Ignacio Cirac. «Normalmente, la información se traduce en ceros y unos, de manera que los ordenadores puedan procesarla y arrojar resultados. Además, también se puede transmitir, corregir o comprimir. No obstante, al utilizar estas nuevas leyes para tratar de una manera distinta la información se abren posibilidades que permiten hacer cosas más deprisa o cálculos que de otro modo serían imposibles».

Esta segunda revolución está muy presente en las tecnologías emergentes, donde las leyes del mundo cuántico se pueden aplicar a las comunicaciones, la computación o la adquisición de información.



”

En febrero de 2025, el Barcelona Supercomputing Center presentó el primer computador cuántico de España, desarrollado con tecnología completamente europea

Instalaciones del Barcelona Supercomputing Center donde se alberga el primer ordenador cuántico de España

Tecnologías del mundo cuántico

La medicina, la química, la energía o la seguridad alimentaria son solo algunos de los campos que se benefician de la tecnología cuántica. Los sensores cuánticos, por ejemplo, permiten detectar señales tan débiles que no existen para los convencionales, lo que abre nuevas posibilidades en el campo de la medicina. Sin embargo, uno de los ámbitos más destacados es el de la computación cuántica.

La diferencia entre los ordenadores convencionales y los cuánticos no radica en la información que procesan, sino cómo lo hacen. «Los ordenadores cuánticos no utilizan ceros y unos, ni bits, sino que utilizan bits cuánticos –cúbits–, que cuentan con unas propiedades relacionadas con las leyes cuánticas. Han de ser capaces de tener su-



Equipo de tecnologías cuánticas del Barcelona Supercomputing Center

perposiciones, ser cero y uno a la vez», indica Cirac, que en los años noventa ideó la forma de construir un ordenador cuántico. Para ello, es necesario contar con materiales que sean compatibles con las leyes

de la física cuántica y plantear un sistema donde funcionen, limitando al máximo las perturbaciones. Una forma de lograrlo es mediante la temperatura. «Los ordenadores cuánticos tienen que encontrar-



se en unos estados muy precisos y no perturbados prácticamente por nada. Por eso hay que bajar la temperatura y aislarlos bien de todo lo que los rodea, para que nada nos contamine, aunque esto también se puede hacer mediante otras tecnologías».

En febrero de 2025, el Barcelona Supercomputing Center presentó el primer computador cuántico de España que ha sido desarrollado con tecnología completamente europea. Integrado en el supercomputador MareNostrum 5, este sistema híbrido permite aprovechar las características de ambos tipos de computación. «El principal reto es introducir una tecnología de computación nueva en el entorno de supercomputación que ha sido la tradición del centro los últimos veinte años», explica Artur Gar-

cía, investigador que lidera el área cuántica en el BSC. «Los superordenadores resuelven problemas complejos, algunos de los cuales están relacionados con el estudio de sistemas físicos, donde muchos componentes microscópicos interaccionan con fuerza. La gran cantidad de interacciones hace difícil resolver el problema con los métodos actuales, pero, al cambiar la tecnología de computación y usar la cuántica, algunos problemas complejos se vuelven sencillos. Un ordenador cuántico actual debe funcionar conjuntamente y de manera sincronizada con otras máquinas convencionales de supercomputación», añade.

Este computador cuenta con cinco cúbits fabricados con circuitos que emulan el comportamiento de un átomo y aislados de cualquier

perturbación, lo que se consigue «bajando la temperatura a unos pocos milikelvins, y eliminando otras fuentes de ruido como campos magnéticos». También programar algoritmos para esta tecnología supone un reto: «en algunos momentos del proceso de diseño de un algoritmo cuántico, es preferible tener un conocimiento detallado de las leyes de la física cuántica, algo que en general no es habitual para un programador», explica Artur García. Además, «estas operaciones de física cuántica crean una superposición, que es lo que da la potencia al computador. Para obtener un resultado, al final hay que mirar, lo que provoca que solo aparezca una de las superposiciones, pero de manera aleatoria. Ahí es donde radica la dificultad de los algoritmos cuánticos: deben crear todas estas superposiciones y, de la



Instalaciones del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica.
Debajo, su director Ignacio Cirac



Entre lo cuántico y lo convencional

Una de las líneas de investigación del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica es la búsqueda de nuevas aplicaciones de la computación cuántica. Ignacio Cirac, su director, explica que «precisamente por la dificultad que supone tener bajo control estas superposiciones de las partículas cuánticas, buscamos nuevos problemas y algoritmos para resolverlos mediante el uso de ordenadores cuánticos». Sin embargo, también ocurre lo contrario: «buscamos problemas donde podamos demostrar que los ordenadores cuánticos no tienen ventaja», de modo que se pueda avanzar hacia otros campos de investigación. «Gracias a lo que hemos aprendido de física cuántica han surgido nuevas ideas de cómo resolver algunos problemas con supercomputadores. Hemos desarrollado un ordenador cuántico con la intención de utilizarlo para crear software para ordenadores convencionales». Esta interacción entre física cuántica y computación clásica permite avanzar hacia un futuro donde ambas tecnologías se complementen para resolver problemas cada vez más complejos.



El Instituto Max Planck de óptica cuántica está centrado en la investigación básica para construir ordenadores, sistemas de comunicación y sistemas de adquisición cuánticos

misma forma, deshacerlas para que el resultado no sea aleatorio», añade Ignacio Cirac.

En la actualidad, el BSC explora la aplicación de técnicas avanzadas de computación, incluyendo supercomputación y computación cuántica, en problemas de ciencia e ingeniería. «El computador cuántico es un paso más en el desarrollo de la computación de altas prestaciones. Estamos explorando las capacidades de los ordenadores cuánticos para resolver problemas complejos en campos como la física nuclear o la química. También nos interesa entender sus capacidades en tareas como el procesamiento de imágenes, o el estudio de materiales a bajas temperaturas», indica Artur García. Del mismo modo, existen muchas áreas donde la computación cuántica puede tener un gran impacto en el futuro, como las finanzas o la ciencia de materiales, ya que, por ejemplo, «gracias a su versatilidad para representar y manipular estados cuánticos, estos ordenadores son la herramienta perfecta para entender el mundo microscópico que gobierna el diseño de nuevos materiales».

La computación cuántica es un campo de gran actividad y en constante desarrollo que permite proporcionar recursos de computación a investigadores de otros ámbitos. «Aunque todavía necesita mejorar mucho sus prestaciones, estos avances no pueden quedar limitados por la falta de financia-

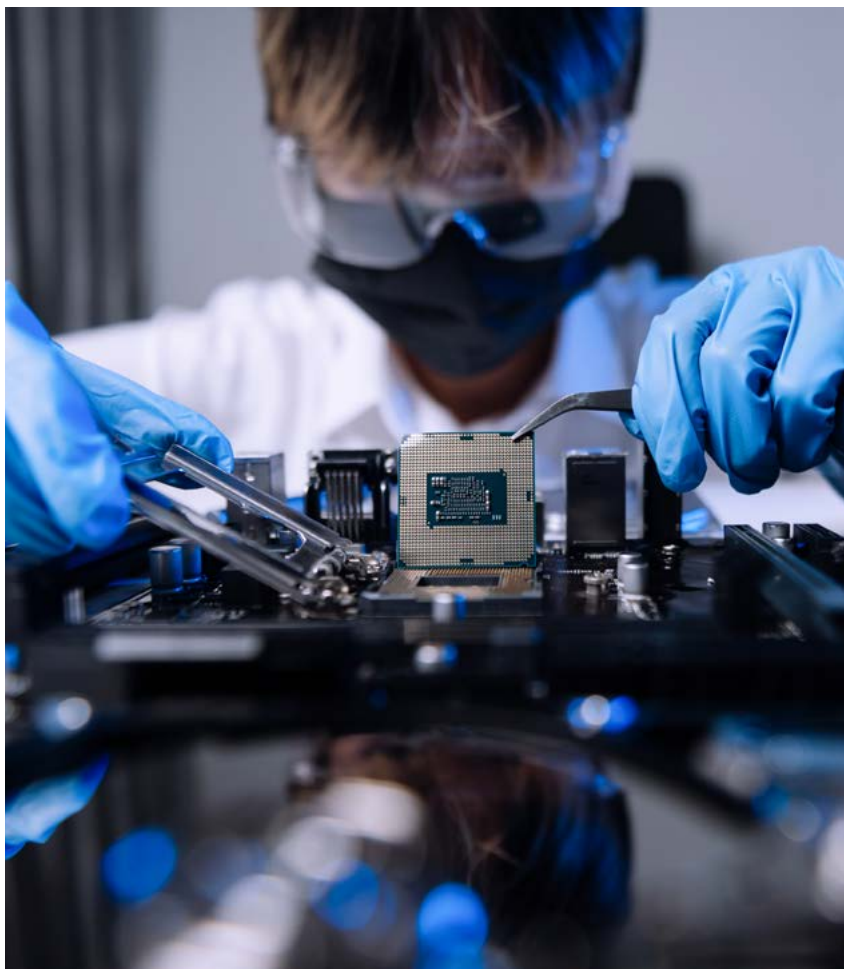
ción. Al ser una tecnología muy nueva, existen diferencias entre el posicionamiento de Europa con respecto a otras regiones. Para corregirlo, el programa EuroHPC va a suponer un gran empuje al ecosistema europeo, que puede alcanzar el nivel tecnológico de EE. UU. o China en los próximos años», asegura Artur García.

Otro ejemplo europeo de investigación y desarrollo de tecnologías cuánticas lo constituye el Instituto Max Planck de óptica cuántica, centrado en la investigación básica para construir ordenadores, sistemas de comunicación y sistemas de adquisición cuánticos.

En el ámbito de las comunicaciones, uno de los principales campos en los que se está trabajando es el de la seguridad. Aprovechando que una de las leyes de la física cuántica consiste en que no es posible observar un sistema cuántico sin alterarlo, en las comunicaciones cuánticas, si un tercero intenta espiar, la comunicación se ve alterada, lo que convierte esta tecnología en una de las formas más prometedoras de garantizar ciberseguridad avanzada.

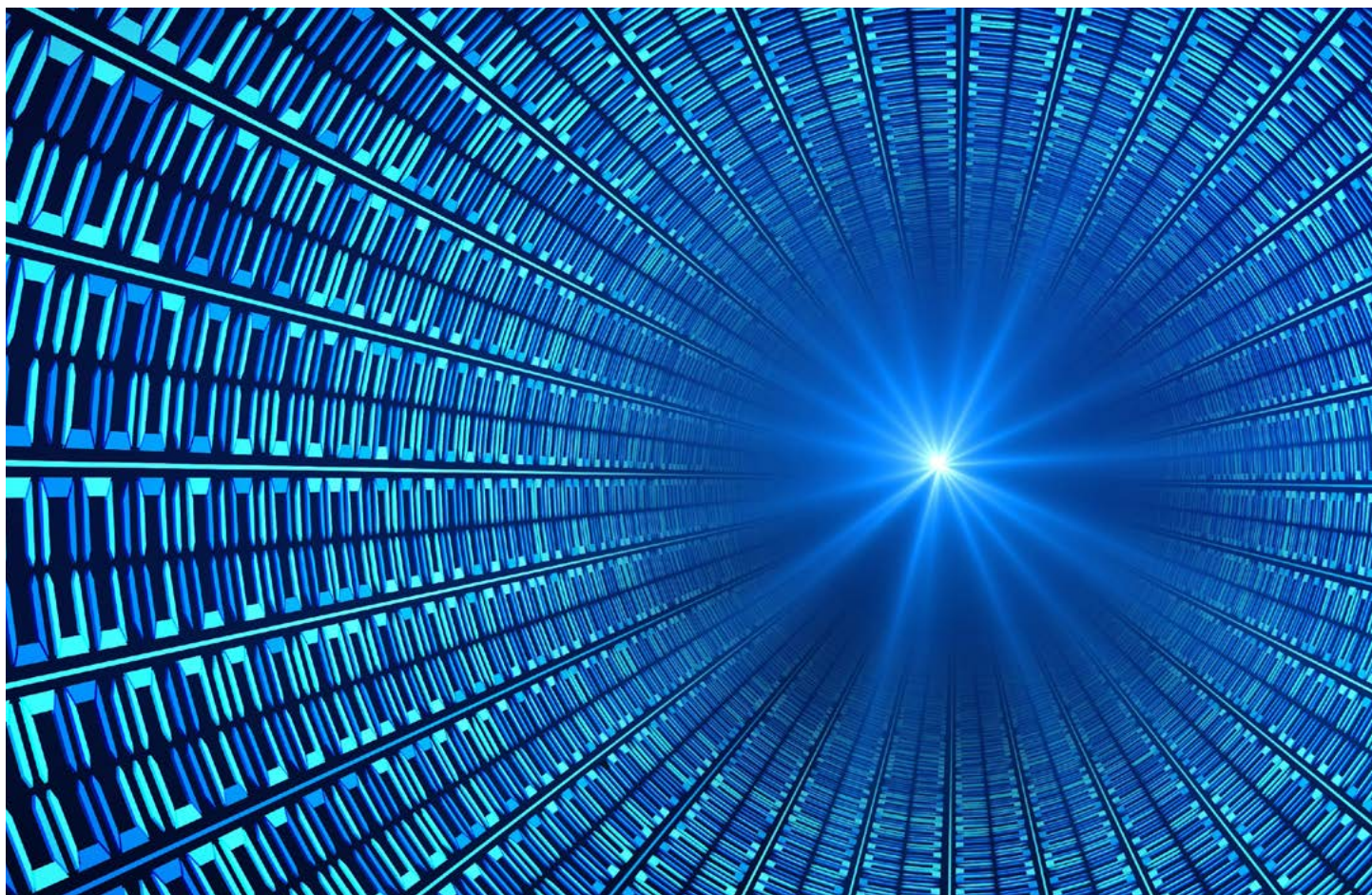
Sin embargo, la llegada de ordenadores cuánticos lo suficientemente potentes supondrá un riesgo para la criptografía clásica que hoy protege las comunicaciones. «Ya se está trabajando para implementar una seguridad basada en algoritmos postcuánticos, porque todos los datos se están almacenando y, dentro de diez o quince años, si alguien tiene un ordenador cuántico, podrá descifrarlos», explica Ignacio Cirac.

No obstante, construir redes cuánticas que garanticen esa seguridad no es una tarea sencilla: «hoy podemos utilizar redes comunicativas cuánticas en distancias que no superen los cincuenta o cien kilómetros. En este tipo de comunicación se utilizan fotones que viajan por fibras ópticas convencionales –oscuras– y transportan cúbits, pero siempre existe una tasa de absorción que hace que a los cien kilómetros estos fotones se hayan reabsorbido. En la comunicación convencional, esto se puede resolver con repetidores o amplificadores, pero en la comunicación cuántica estos repetidores tienen



El entrelazamiento cuántico

Uno de los conceptos más fascinantes de la física cuántica es el entrelazamiento cuántico, propiedad por la que dos partículas pueden quedar correlacionadas de forma que el estado de una afecte instantáneamente al estado de la otra, incluso aunque estén separadas por distancias enormes. Aquí surge una pregunta inevitable: ¿es posible usar el entrelazamiento para transmitir información más rápido que la luz? Según la comprensión actual, el entrelazamiento no viola la relatividad especial de Einstein, que prohíbe que la información supere la velocidad de la luz, por lo que no sería posible este sistema para comunicarse.



Computación cuántica e inteligencia artificial

Uno de los grandes temas de la investigación actual es el de la computación cuántica aplicada a la inteligencia artificial. Aunque no existen pruebas concluyentes, hay esperanza en ambas direcciones: por un lado, que los ordenadores cuánticos puedan acelerar ciertos procesos de aprendizaje automático; por otro, que la inteligencia artificial ayude a diseñar mejores algoritmos y circuitos cuánticos. De cara al futuro, los investigadores apuntan tres campos donde la computación cuántica tiene mayor potencial: en medicina –para detectar enfermedades–, en simulación en física y química y en aprendizaje automático. En este último, se espera que los ordenadores cuánticos logren acelerar ciertos subprocesos del entrenamiento de modelos de IA, especialmente en escenarios de alta complejidad.

que cumplir las leyes de la física cuántica y, aunque hay prototipos, todavía no son funcionales». También se investiga la posibilidad de establecer comunicación cuántica mediante satélites y enlaces por espacio libre, pero aún queda mucho por desarrollar.

España, que comienza a posicionarse en el mapa de estas tecnologías con iniciativas como el ordenador cuántico del BSC o la próxima instalación de un ordenador cuántico en Bilbao de la mano de IBM, presenta un tejido sólido en el ámbito del *software* cuántico, con em-

presas emergentes, grupos de investigación bien posicionados y un número creciente de aplicaciones experimentales. Sin embargo, en el terreno del *hardware*, la brecha es más evidente. Como reconocen algunos expertos, la investigación experimental en tecnologías cuánticas aún no alcanza el nivel de países como Alemania, donde existe una tradición más fuerte en desarrollo de dispositivos propios. Por suerte, en los últimos años, se ha intensificado la inversión pública y privada para reducir esa distancia y, aunque es un desafío complejo, se van produciendo avances.

En busca del desarrollo sostenible

«La tecnología cuántica tiene un enorme potencial para mejorar el planeta y conseguir una sociedad más justa», afirma el Foro Económico Mundial (WEF) en su informe *Quantum for Society: Meeting the Ambition of the SDGs*. Centrado en los diecisiete objetivos de desarrollo sostenible establecidos en la



La inspiración de la física cuántica

En ocasiones, la investigación en computación cuántica hace que se descubran formas de resolver problemas que pueden aplicarse a la supercomputación y viceversa. Un ejemplo lo constituye «el problema de Netflix»: el sistema de la plataforma te recomienda qué ver a continuación, basándose en cálculos matemáticos complejos que identifican patrones entre miles de usuarios. Investigaciones recientes han mostrado que ciertos algoritmos cuánticos podrían resolver este tipo de problemas y han inspirado el desarrollo de nuevos algoritmos que funcionan sin necesidad de ordenadores cuánticos.



La computación cuántica también tiene un papel esencial en el camino hacia una energía que proceda fundamentalmente de fuentes renovables

cursos en riesgo debido al cambio climático –como el agua–, la reducción de los gases de efecto invernadero o la producción de energía limpia pueden beneficiarse de las tecnologías cuánticas. Además, «la incorporación de sensores cuánticos de gravedad y de campos magnéticos a los satélites puede ofrecer una nueva forma de ver lo invisible, al medir cambios que en la actualidad son imperceptibles y recopilar información crucial para entender y monitorizar el cambio climático, la evolución de la hidrosfera y la criosfera, y las aguas subterráneas, así como para la alerta temprana de fenómenos hidrológicos extremos y riesgos geológicos». También «el diseño de células solares, la modelización del clima y la lucha contra los PFAS» son aplicaciones de la ciencia cuántica que están relacionadas con los ODS, y aparecen citadas en el mismo informe.

No obstante, es necesario idear sistemas y tecnologías cuánticas respetuosos con el medioambiente. Para ello, en 2022 se lanzó la *Quantum Energy Initiative*, que pretende garantizar que se tenga en cuenta el impacto ambiental de los ordenadores cuánticos que se construyan en los próximos años desde el momento de su concepción. La eficiencia energética es importante, ya que actualmente los centros de datos consumen entre el 1 % y

el 1,5 % de la energía mundial y ponen en riesgo el acceso al agua de las futuras generaciones. Gracias a los computadores cuánticos y a su rapidez a la hora de resolver problemas complejos, el consumo de energía y de agua puede reducirse a pesar de la infraestructura que necesitan para funcionar. Del mismo modo, «los computadores cuánticos podrán ser capaces de resolver problemas complejos relacionados con la optimización de la gestión del calor en los centros de datos», lo que mejoraría la eficiencia energética de la computación convencional, según fuentes del WEF.

La computación cuántica también tiene un papel esencial en el camino hacia una energía que proceda fundamentalmente de fuentes renovables. «La computación convencional no está diseñada para manejar una ampliación exponencial de los parámetros de entrada en las redes de energía. En este contexto, la computación cuántica podría explorar la gestión dinámica de recursos para permitir que la demanda del sistema se adapte de forma flexible a la generación renovable variable», afirma el WEF.

Por ello, aunque todavía es pronto para imaginar lo que ocurrirá antes de 2030, las tecnologías cuánticas vaticinan grandes avances en la solución a problemas de sostenibilidad complejos. ■

Agenda 2030, el informe pretende informar sobre el uso que se puede dar a tres de las tecnologías cuánticas en las que se está trabajando en la actualidad: la computación, la detección y la comunicación cuánticas.

«El actual proceso Haber-Bosch de fijación artificial del nitrógeno que se utiliza para producir amoníaco ya tiene más de un siglo. Sin embargo, encontrar una alternativa ha sido imposible debido a que simular los catalizadores clave llevaría más de ochocientos mil años en un ordenador convencional», algo que, a medida la computación cuántica se desarrolle, dejará de suponer un obstáculo gracias a la ventaja cuántica, que «permitirá que los problemas se procesen mucho más rápido», según el informe del WEF.

Este es solo uno de los ejemplos en los que se puede aplicar el potencial de la computación cuántica. También otros objetivos relacionados con la conservación de los re-



Radiactividad ambiental: presencia invisible, realidad controlada

La radiactividad está ahí, aunque no se vea: desde partículas en el aire hasta residuos en el suelo. El control constante es clave para proteger a la población y al medioambiente. España cuenta con uno de los sistemas de vigilancia radiológica ambiental más sólidos de Europa, avalado por el Organismo Internacional de Energía Atómica. Un esfuerzo sostenido que combina tecnología, ciencia y prevención frente a un fenómeno que desata miedos en el imaginario colectivo.

■ Texto: **Jerónimo López**

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) relaciona el concepto de radiactividad ambiental con la presencia de materiales radiactivos en el medioambiente, tanto de origen natural como artificial. La Organización Mundial de la Salud (OMS) añade un matiz acorde con

su competencia: dicha presencia puede generar riesgos para la salud humana, aunque, por lo general, el hombre ha convivido con la radiactividad ambiental sin mayor problema. Además, conviene distinguir entre la radiactividad de origen natural y la de origen artificial. Según el Colegio Oficial

de Físicos, la natural está presente desde el origen de la Tierra y emana del núcleo del planeta y de elementos como el uranio, el torio y el potasio, presentes en rocas y minerales. La artificial, por el contrario, es consecuencia de la actividad humana, como el uso médico de radiaciones, los ensayos con



Radiación bajo control

El vigesimocuarto informe anual de vigilancia radiológica del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), el último desde que comenzaron estas publicaciones en 1999, recopila y analiza los datos obtenidos por redes de vigilancia en todo el territorio nacional. El control se realiza mediante dos sistemas: los Programas de Vigilancia Radiológica Ambiental (PVRA) en el entorno de instalaciones nucleares, gestionados por los titulares bajo supervisión del CSN, y la Red de Vigilancia Radiológica Ambiental no asociada a instalaciones (REVIRA), que depende directamente del organismo y mide la radiactividad en el aire, el agua, el suelo y los alimentos.

Conclusiones principales

- *Niveles de radiactividad estables:* en España se mantuvieron dentro de los márgenes considerados normales, sin detectar incrementos significativos que requirieran acciones correctivas.
- *Control eficaz:* el sistema de vigilancia radiológica ambiental, compuesto por redes en el entorno de instalaciones nucleares y una red nacional (REVIRA), funcionó de manera efectiva, permitiendo una supervisión continua y precisa de la radiactividad en aire, agua, suelo y alimentos.
- *Transparencia:* el CSN ha puesto a disposición del público los datos de vigilancia radiológica a través de la aplicación web Keeper, facilitando el acceso a la información desde 2006 hasta 2025.
- *Colaboración institucional:* colaboración activa del CSN con otras instituciones, como el CIEMAT y universidades –en particular, la Universidad de Barcelona– para mejorar la calidad y fiabilidad de los datos mediante campañas de intercomparación y desarrollo de nuevas metodologías de análisis.
- *Mejora continua:* compromiso del CSN con la mejora continua de los programas de vigilancia, incluyendo la actualización de procedimientos y la incorporación de tecnologías avanzadas para la detección y análisis de radiactividad ambiental.

armas nucleares o el procesamiento de determinados minerales que liberan radionúclidos al entorno.

En condiciones normales, los niveles de radiactividad ambiental son muy bajos y no representan un riesgo. Solo en casos excepcionales –como accidentes o en regiones con radiactividad natural muy elevada– pueden alcanzarse umbrales que impliquen efectos sobre la salud.

En condiciones normales, los niveles de radiactividad ambiental son muy bajos y no representan un riesgo. Solo en casos excepcionales –como accidentes o en regiones con radiactividad natural muy elevada– pueden alcanzarse umbrales que impliquen efectos sobre la salud. Así, la monitorización y regulación de la radiactividad ambiental es clave para la protec-

ción de las personas y del entorno. Cuando se superan determinados niveles, en incidentes extremos muy ocasionales, puede alterar el funcionamiento de órganos y tejidos. Entre sus efectos agudos, figuran el enrojecimiento de la piel, la caída del cabello, quemaduras o el síndrome de irradiación aguda. A mayor exposición, mayores consecuencias. Así, la OMS indica que la dosis mínima para provocar este síndrome ronda 1 Sv (1000 mSv). En dosis más bajas, el riesgo disminuye, ya que el organismo dispone de mayores probabilidades para reparar el daño celular. En cualquier caso, la afectación y el desarrollo de patologías como el cáncer o las cataratas puede materializarse incluso décadas después.

Estudios realizados en poblaciones expuestas a la radiación –como los supervivientes de los bombardeos atómicos o los pacientes sometidos a radioterapia– han demostrado que el riesgo de cáncer aumenta de forma significativa a partir de dosis superiores a 100 mSv, aunque se detectan efectos incluso en niveles más bajos, entre 50 y 100 mSv.

Compañera de viaje

A pesar de los estragos que puede producir esta fuerza de la naturaleza cuando se descontrola, la humanidad vive en un entorno radiactivo y se ha desarrollado como especie en presencia de un campo de radiaciones naturales. Como detalla el catedrático de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universidad de Sevilla, Manuel García León, «en determinadas zonas, por pu-



Ante todo, calma

Aunque la radiactividad ambiental puede presentar riesgos para la salud a partir de ciertas dosis –50 mSv–, algunas personas se muestran reticentes ante objetos, dispositivos o actividades que emiten radiación. Para evitar temores infundados, el Foro de la Industria Nuclear Española recuerda que las dosis suelen estar muy por debajo del nivel de riesgo. Un vuelo de seis horas aporta solo 0,035 mSv, y los tripulantes pueden recibir entre 0,2 y 5 mSv al año. Las radiografías varían según la zona: desde 0,004 mSv (dental) hasta 0,7 mSv (abdomen). Vivir cerca de una central nuclear supone unos 0,01 mSv anuales, y sus trabajadores rara vez superan los 20 mSv permitidos. En minas, la dosis media va de 1,4 mSv (convencionales) a 4,4 mSv (uranio). Las tecnologías de uso común, como los móviles o el wifi, emiten radiación no ionizante, sin riesgo comprobado. Según los informes anuales del CSN, el valor de la dosis media en el sector nuclear es inferior a 1 mSv. En total, la exposición natural ronda los 2,4-3 mSv anuales en España, muy por debajo del umbral de 50 mSv considerado seguro.

ras cuestiones geológicas, existen niveles de radiactividad natural altos o muy altos. Esas zonas deben identificarse, sus niveles deben controlarse y, si procede, establecer las medidas de protección necesarias».

Si bien este fenómeno es un verdadero compañero de viaje –fruto de la radiactividad natural y del flujo de radiación cósmica–, el ser humano ha contribuido a aumentar su presencia a través de actividades industriales, económicas y militares. «Con mucho, las detonaciones nucleares de los años sesenta fueron la causa más importante del incremento de la radiactividad en el medioambiente. Su contribución ha sido varios órdenes de magnitud superior a la de los accidentes de impacto global como el de Chernóbil (1986) y, en mucha menor medida, el de Fukushima (2011)», afirma. Además, existe un impacto potencial asociado a las actividades de todo el ciclo del combustible nuclear, aunque según confirma García León, «se está demostrando que hoy día es casi irrelevante. Aun así, el impacto



existe y debe controlarse de forma constante».

La evolución del control de la radiactividad ambiental tuvo en el accidente de Chernóbil un punto de inflexión, a partir del cual los protocolos se perfeccionaron, se homologaron a los existentes en otros países y comenzaron a coordinarse entre sí. Desde el punto de vista científico, «cada vez tiene más presencia como un problema académico, con una mejora continua de técnicas y procedimientos. De hecho, son muchas las disciplinas que aprovechan la medición de la radiactividad ambiental para sus fines científicos, como la geología, la glaciología o la oceanografía», explica.

A pie de calle, la sociedad está cada vez más sensibilizada con el mantenimiento y control del medioambiente en el que vive, y la radiactividad se ha integrado como un elemento más en el control de contaminantes. Para García León, «hablamos de un fenó-

Retos pendientes

España cuenta con uno de los sistemas de vigilancia radiológica ambiental más avanzados de Europa, pero persisten importantes desafíos que exigen atención continua. Uno de los más relevantes es el control del gas radón, fuente natural de radiación y segunda causa de cáncer de pulmón tras el tabaco. Tras la presentación del Plan Nacional contra el Radón, aprobado por el Consejo de Ministros en 2024, se han sucedido los pasos para garantizar la seguridad de la población expuesta a esta sustancia. Así, en abril de 2025, el CSN aprobó la Instrucción IS-47 que determina el listado de términos municipales de actuación prioritaria contra el radón y establece las directrices para las mediciones de este gas en el interior de los centros de trabajo.

Otro frente abierto es la gestión de suelos contaminados por actividades pasadas con materiales radiactivos. En septiembre de 2023, el Tribunal de Justicia de la Unión Europea dictaminó que España incumplió sus obligaciones en relación con la Directiva 2013/59/Euratom. Esta directiva establece normas de seguridad para proteger contra los peligros de la radiación ionizante. El problema fue doble: España no adoptó a tiempo todas las medidas necesarias para aplicar la directiva por completo, y tampoco informó a la Comisión Europea sobre las disposiciones que había tomado para garantizar su total transposición.

El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) trabaja en su creación e incluirá al menos media docena de emplazamientos afectados. Las comunidades autónomas tienen la obligación de elaborar un repertorio de suelos contaminados existentes en su ámbito territorial, y establecer una relación priorizada. Esta información deben remitirla al MITECO para dar forma al inventario estatal.

La gestión de residuos radiactivos también presenta dificultades. El Organismo Internacional de Ener-

gía Atómica (OIEA) valora positivamente el compromiso regulador español, pero ha advertido sobre la necesidad de reforzar la aplicación de la estrategia nacional para garantizar que los residuos se manejen de forma segura y sostenible a largo plazo.

En paralelo, la modernización tecnológica de los sistemas de vigilancia supone un reto constante. La incorporación de nuevas herramientas —como sensores inteligentes, algoritmos de inteligencia artificial o espectrometría de masas miniaturizada— es clave para mejorar la detección precoz, la precisión de los análisis y la capacidad de respuesta ante incidentes radiológicos. Automatizar procesos y asegurar la transmisión de datos en tiempo real, especialmente en situaciones de emergencia, es una prioridad.

Por último, existe aún un importante desconocimiento social sobre qué es la radiactividad, cómo afecta y cuáles son los riesgos reales. Persisten mitos, temores infundados y una percepción pública que suele asociar toda forma de radiación a catástrofes. Promover una cultura científica accesible y rigurosa es tan necesario como mantener los sistemas de medición: solo así se construye una sociedad realmente protegida y bien informada.



meno rodeado de cierto halo de misterio para la mayoría de la población y, sobre todo, sigue estando asociado a la forma tan terrible en que irrumpió la energía nuclear en nuestra historia: el bombardeo de Hiroshima y Nagasaki. Esa imagen persiste en el imaginario colectivo y es difícil desvincularla de los beneficios reales que obtenemos del uso ordenado de radionúclidos y radiaciones en nuestra vida cotidiana. Un ejemplo claro es su uso médico».

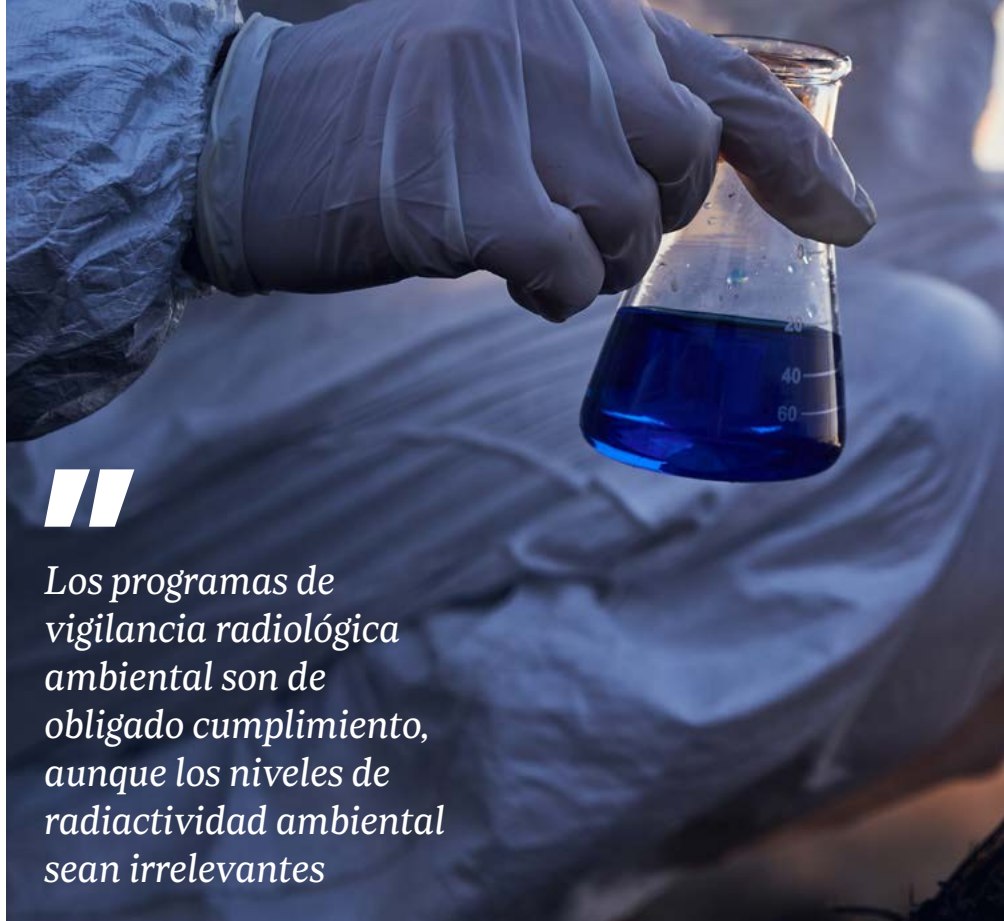
Medir lo que no se puede ver

La evaluación continua de la radiactividad ambiental es fundamental para garantizar la protección radiológica. El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) subraya que la vigilancia permite detectar la presencia y evolución de elementos radiactivos, identificar las causas de posibles incrementos en los niveles de radiación, estimar el riesgo radiológico potencial para la ciudadanía, establecer medidas preventivas o correctoras si fuera necesario y verificar que las instalaciones autorizadas cumplen con los requisitos establecidos.

El control insuficiente «es inaceptable en una sociedad moderna. Los programas de vigilancia radiológica ambiental son de obligado cumplimiento, a pesar de que los niveles de radiactividad ambiental sean irrelevantes. La ausencia de un programa de vigilancia impediría, por ejemplo, detectar a tiempo accidentes de carácter global o local, o vertidos incontrolados de sustancias radiactivas al medioambiente», sostiene el catedrático sevillano.

El CSN es la entidad encargada de garantizar la protección radiológica mediante la supervisión y el control de la radiactividad ambiental, ya sea de origen natural o procedente del funcionamiento de instalaciones nucleares y radiactivas. Además, gestiona la Red de Vigilancia Radiológica de Ámbito Nacional (REVIRA), constituida por estaciones automáticas y de muestreo.

Como órgano regulador, ha establecido procedimientos normalizados para la toma de muestras y la determinación de la radiactividad en distintas matrices ambientales, como la recogida en capa superficial de suelos, el muestreo específico de aeroso-



Los programas de vigilancia radiológica ambiental son de obligado cumplimiento, aunque los niveles de radiactividad ambiental sean irrelevantes

les y radioyodos, la toma de muestras de sedimentos y el protocolo para el muestreo, recepción y conservación de aguas, entre otros. De hecho, hay diecinueve procedimientos de muestreo y análisis publicados por el Consejo en su página web. Cabe reseñar que muchos de ellos se han transformado en normas UNE e ISO, que garantizan tanto la calidad y representatividad de las muestras como la fiabilidad de los resultados analíticos.

Para Manuel García León, «la mejora de la precisión de los datos, combinada con la rapidez de los métodos, son los desafíos que necesitan una respuesta más inmediata. En especial, porque la experiencia ha demostrado que son claves en situaciones accidentales».

Dado que el control de la radiactividad ambiental forma parte de un compromiso global, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) asiste a los Estados miembros en la evaluación del impacto ambiental, la rehabilitación de lugares contaminados y la capacitación y el asesoramiento sobre programas de vigilancia. Así, el Laboratorio de Radioquímica del Medio Terrestre del OIEA proporciona apoyo técnico y científico en esta área.

En este sentido, España ha hecho los deberes. Recientemente, la misión de seguimiento del Sistema Integrado de la Revisión Reglamentaria (IRRS, por sus siglas en inglés) de este organismo ha reconocido el uso adecuado de la regulación, así como el empleo de los recursos que garantizan el control de las instalaciones y su supervisión. Tras un programa de revisión de ocho días, coordinado por el CSN, el jefe de equipo, Scott Morris, señaló que España demuestra su compromiso con la mejora continua del marco regulador nacional. «El equipo del IRRS ha revisado la implementación de las acciones establecidas en 2018 y felicita al CSN y a todas las instituciones españolas por el desempeño demostrado durante estos años», afirmó.

Por su parte, la Comisión Europea chequea periódicamente, a través de misiones verificadoras, los sistemas de vigilancia radiológica ambiental de los estados miembros, en virtud de los artículos 35 y 36 del Tratado Euratom, que permiten el monitoreo de instalaciones nucleares o médicas, así como la vigilancia en caso de emergencia por radiación.

Entre 2004 y 2024, España ha recibido diez misiones que, en todas ellas, han destacado la buena labor realizada. Las dos últimas tuvieron lugar en 2021, con sendas misiones dirigidas a



Veremos nuevos materiales de detección de radiación que trabajarán en modo más automatizado con un uso ya generalizado de electrónica digital

la Central Nuclear de Santa María de Garoña y a las costas de Galicia y Cantabria. En el primer caso, entre otras conclusiones, la misión confirmó que Garoña cuenta con las instalaciones adecuadas para monitorizar los niveles de radiactividad en el aire, agua y suelo en caso de una emergencia radiológica. Además, la Comisión pudo comprobar la disponibilidad de una parte importante de estas instalaciones y agradeció la excelente cooperación del personal implicado. De igual modo, en la segunda misión, verificó el correcto funcionamiento y la eficacia de las instalaciones que supervisan los niveles de radiactividad del litoral gallego y cántabro.

Tecnología presente y futura

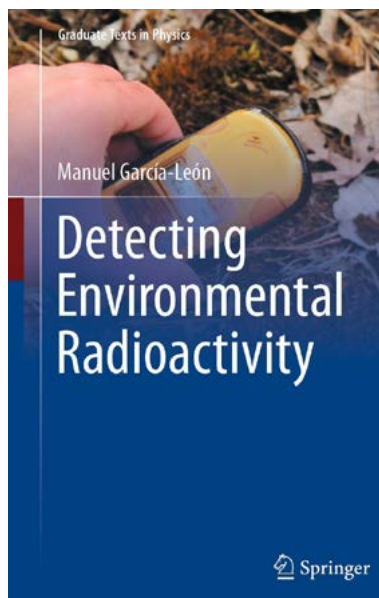
¿Hacia dónde se dirige la tecnología en este campo? García León predice que «veremos nuevos materiales de detección de radiación que trabajarán en modo más automatizado con un uso ya generalizado de electrónica digital. Se reducirán los sistemas de blindaje pasivo de detectores, sustituyendo su función de reducción de fondo por análisis de pulsos eléctricos mediante inteligencia artificial (IA); se mejorarán las capacidades de medida *in situ*, con algoritmos de calibración más sofisticados y precisos, y se avanzará en la robotización de sistemas para su trabajo

en ambientes difíciles, lo que también obligará a la mejora en la transmisión segura de datos, con uso creciente del internet de las cosas (IoT)».

La miniaturización de los espectrómetros de masas también está ganando terreno, especialmente en el desarrollo de la espectrometría de masas con acelerador de baja energía (Low Energy Accelerator Mass Spectrometry), ámbito en el que García León trabaja desde finales de los noventa. El propósito pasa por hacer de la técnica un instrumento más accesible para los grupos de investigación, favoreciendo su uso generalizado.

La IA no podía quedar al margen. Cuestiones como la calibración de detectores, la reducción del fondo, el análisis de la función respuesta, el tratamiento de datos y la consecuente toma de decisiones son ya objeto de estudio mediante inteligencia artificial. «Esperamos que los procedimientos se automaticen y se dote de mayor fiabilidad al análisis de datos que se producen continuamente en las redes de vigilancia radiológica. De hecho, la incorporación de IA a los programas existentes de protección radiológica ambiental debe impulsarse», concluye García León. Un futuro que ya empieza a revelarse. ■

Referencia en la medición y análisis de la radiactividad ambiental



Escrita por el catedrático Manuel García-León (Springer, 2022), *Detecting Environmental Radioactivity* es una obra de referencia en la medición y análisis de la radiactividad ambiental. Con un enfoque riguroso y didáctico, presenta los principios fundamentales y las técnicas avanzadas para detectar y cuantificar radionúclidos en el entorno natural y antropogénico. Aborda desde los conceptos básicos de la radiactividad y sus leyes de decaimiento hasta las metodologías más sofisticadas empleadas en la actualidad. Además, detalla técnicas de conteo de baja actividad, espectrometría y espectrometría de masas, incluyendo la espectrometría de masas con aceleradores (AMS), destacando su aplicación en la detección de niveles extremadamente bajos de radionúclidos. El texto profundiza en el uso de diversos detectores, como los de centelleo, semiconductores y de ionización gaseosa, explicando su funcionamiento y aplicaciones específicas. También incluyen capítulos dedicados a la radiodosimetría, la interacción de la radiación con la materia y los métodos de análisis radiométrico y químico de muestras ambientales. Dirigido a estudiantes de posgrado y profesionales en física, química, ingeniería y ciencias ambientales, está consolidado como herramienta esencial para quienes trabajan en el monitoreo y gestión de la radiactividad en el medioambiente.

Ana María Crespo de las Casas
Presidenta de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

«La empresa privada tiene que hacer mayor esfuerzo en I+D y el sector público aportar mayor estabilidad económica a través de los presupuestos»

Tras una destacada trayectoria, Ana María Crespo de las Casas ha hecho historia al convertirse en la primera mujer que preside la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales desde su fundación en 1847. Bióloga de formación, disecciona con lucidez los desafíos pendientes de la ciencia española: financiación más sólida, retención del talento joven y, por supuesto, construcción de puentes para el avance de la mujer en las carreras científicas. Frente al ruido, Crespo invoca la cultura, el método y la palabra clara como herramientas para reconciliar a la sociedad del siglo XXI con el conocimiento.

■ Texto: **Luis Tejedor** · Fotos: **Virginia Carrasco**

Usted es la primera mujer que preside la Real Academia de Ciencias desde su fundación, hace ya 178 años. ¿Por qué ha sido precisa una espera tan larga?

Hay razones que se comprenden muy bien, relativas al retraso de las mujeres en el acceso a las ciencias. Por razones que todos conocemos, no estaban integradas en el sistema de ciencia y tecnología. Una vez producida esa integración, paulatinamente, se van incorporando fácilmente a los espacios de la carrera científica. Cuando esta carrera entra en fases de competición más fuertes, se producen sesgos, objeto de análisis muy concienzudos, y se llega a la conclusión de que hay orientaciones notables *a priori*.

En las etapas finales de la carrera científica, las mujeres son muy pocas, en proporción a los hombres. Lógicamente, eso tiene que mejorar.

Lleva menos de un año al frente de esta institución. ¿Cómo fue su aterrizaje en la presidencia?

Atractivo y estimulante. Para mí, era importante acertar con las decisiones que tomaba, ya que cada uno lo hace de una manera. Recibí, además, toda la ayuda posible de mis compañeros. Me sentí muy arropada, pero, personalmente, me siento muy implicada en esta tarea y tengo el deseo de hacer las cosas bien. Cuando fui elegida para el cargo, venía de trabajar en el equipo del anterior presidente como secretaria general. Se llevó a cabo una buena estructuración

de la Real Academia y se organizaron muy bien sus procedimientos. Está muy bien organizada. A sus estatutos hay que darles pocas vueltas, se trata de cumplirlos.

¿En qué proyectos de la Real Academia tiene depositadas sus mayores expectativas?

Hay cuestiones especialmente importantes. Por señalar algunas, citaría la culminación de la digitalización del vocabulario científico con acceso *online*: el VCTRAC digital. Un diccionario científico como este no se termina nunca, ya que cuenta con gran cantidad de nuevos términos. Había que darle impulso, porque el proyecto estaba relativamente frenado y es lo que estamos emprendiendo.

En segundo lugar, hay aspectos que yo llamaría de extensión cultural. La cultura científica y su divulgación han sido parte importantísima de la Academia desde que existe, mucho más en los tiempos recientes. Tenemos que abrir todavía más nuestras fronteras y ponernos en la vanguardia del momento que vive la ciencia internacional. Trabajamos en pro de la extensión cultural de la ciencia y frente a la gran cantidad de noticias falsas y malas interpretaciones sobre cuestiones científicas.

Otra actuación muy significativa es la expresión de nuestra opinión sobre lo que ocurre en la ciencia y sus repercusiones, tanto en la vida social y política como en la vida cotidiana de las personas. Tenemos abiertas varias líneas de trabajo para convencer a la sociedad de que la ciencia aporta mucho a su bienestar.

Finalmente, la Academia debe recoger la propia composición de los científicos. Es preciso favorecer el acceso de mujeres y jóvenes, a través de un rejuvenecimiento de la plantilla. Esta institución es un lugar de gente muy experta, pero no quiere decir que la participación de académicos jóvenes no sea importante. Contamos con una estructura equilibrada donde se percibe la calidad de los científicos que acceden a nuestra institución, perfectamente integrados en sus centros y actividades.

A propósito de mujeres académicas, ¿la paridad corre riesgo de convertirse en un fin en sí mismo?

En absoluto. Más que la paridad, nuestro fin es la selección de los mejores en las áreas que podemos abordar. Esta institución es la mayor de las Reales Academias en sus dimensiones, y en la cantidad de numerarios. Aun así, la ciencia es muy diversa e intentamos cubrir la mayoría de campos, pero hay alguno que no cubriremos. Puede haber situaciones en las que todavía no haya mujeres disponibles compitiendo por la excelencia. Para nosotros, lo importante no es que entren mujeres en la Real Academia, es que la ciencia esté mejor representada en sus aspectos y perspectivas. No se puede prescindir



“En la Real Academia, el objetivo de la paridad está subordinado a la excelencia”

del 50 % de la comunidad científica. Es obvio que hombres y mujeres aportamos perspectivas diferentes sobre la ciencia y la vida. En la Academia, el objetivo de la paridad está subordinado a la excelencia.

¿Aún es necesario fomentar el interés de las niñas y las jóvenes por las carreras de ciencias?

Es un tema preocupante para mí. Me interesan mucho más las niñas que las mujeres jóvenes. El trabajo hay que hacerlo cuando la mente todavía no tiene prejuicios culturales. Cuando me invitan a dar charlas o a verme con grupos, si puedo elegir, prefiero verme con los más jóvenes. Todavía no se ha conseguido que las chicas vean que pueden estar al mismo nivel en todos los campos de

la práctica científica. Como dicen los expertos, tener referencias es muy importante. Por eso, es un punto que requiere mi atención.

¿Qué dirigió su interés hacia la ciencia?

Fue el respeto de mi entorno por la ciencia. En mi casa, no viví diferencias entre el interés por una disciplina científica concreta, sino respeto por estos saberes. Para mi familia, era mucho más importante un sabio que un rico y es algo que permea mucho en la mente de las personas desde su infancia.

¿Cómo eran las facultades en 1970, cuando usted se graduó?

Fue un tiempo maravilloso, porque era el de mi juventud, pero duro.



Foto: Europa Press

España estaba en una dictadura y se percibía mucho. Para qué decir la cantidad de tiempo que invertíamos en avanzar hacia los logros de la democracia. Era una España muy distinta a la que llegó con la democracia. En la Guerra Civil, hubo una fortísima depuración de profesores y científicos de referencia, así que, cuando se trató de recuperar todo eso, fue costoso, algo que percibíamos los estudiantes. En comparación con la actual, era una universidad muy participativa en la vida de la sociedad, crítica y abierta al diálogo entre los propios estudiantes. El desarrollo cultural interno y el intercambio de conocimientos entre ellos era muy común y ahora no lo es tanto.

A principios de los noventa, pasó dos años en el International Mycological Institute de Egham. ¿Cómo influyó esta experiencia en su carrera?

Había especialidades ya desarrolladas en España y el ambiente era parecido, pero me llamó la atención

su diversidad. Los equipos de investigación eran enormemente plurales en su composición y eso no era corriente en España. Creo que un científico debe formarse en distintos lugares y vivir ambientes diferentes con diversas maneras de resolver las cosas, aunque uno aplique los mismos protocolos. Como en otras etapas de mi carrera, me interesaba ver lo que hacían los demás. Creo que eso es bueno para los equipos científicos.

¿Considera que la investigación científica española está alineada con los países del entorno o toca mejorar?

Sí, aunque hay que seguir y darle más fuerte. Hay que cuidar mucho de los jóvenes, y de su reclutamiento, con esfuerzos más intensos. Además, la sociedad tiene que prestar atención a la financiación que tiene nuestra ciencia. Está sufragada por el sector público de forma mayoritaria y el sector privado participa muy poco. Eso no pasa en otros países europeos, ahí no estamos bien alineados. En los de mayor solvencia científica, el sector privado aporta mucho al

presupuesto de I+D, más que aquí. La empresa privada tiene que hacer mayor esfuerzo y el sector público aportar mayor estabilidad económica a través de los presupuestos.

¿La política científica sigue siendo una prioridad menor en España?

No podría decir que esté olvidada, pero sí es menos importante que otras materias. En las campañas electorales, por ejemplo, se habla poco de las cosas reales. Una no sabe muy bien si los compromisos que se adquieren gustan o no, porque son muy vagos. La I+D no es una política olvidada, pero tampoco nos tiene satisfechos en cuanto a financiación. Hay un problema de gobernanza en las universidades que tiene que ver con lo que estoy diciendo. Más del 60 % de la I+D española se hace en las universidades y hay muchas cosas que resolver en su estabilidad presupuestaria. Una universidad debe saber con lo que va a contar y un investigador debería tener una mayor visión de futuro para mejorar el reclutamiento del personal. Es importante ofrecer a los

La inversión en defensa siempre ha sido un estimulante del desarrollo tecnológico

La energía nuclear es muy competente, pero el problema de su seguridad no se le escapa a nadie y condiciona su aceptación social

jóvenes investigadores un panorama salarial mejor.

¿Qué se necesita para retener al talento joven?

Como decía, los salarios son importantes. Hay que retener el talento cuando está en un nivel de formación y producción importante. El mejor talento se crea con condiciones científicas adecuadas, cuando el investigador puede ver perspectivas de futuro. Es necesario que los salarios mejoren y sean competitivos. Entiendo que no somos el país más rico del mundo, pero hay otros atractivos complementarios que pueden ofrecerse. La movilidad, también,

tiene que fomentarse con programas de acceso flexible. Pongo como ejemplo el ICREA, en Cataluña. Ha funcionado estupendamente y está obteniendo un retorno muy destacado. La gobernanza de las universidades también me parece una cuestión capital para posibilitar una buena selección, con centros que dispongan de una estructura que favorezca la buena investigación.

¿El actual escenario internacional supone mayor estímulo para la inversión en ciencia?

Sin duda. La inversión en defensa siempre ha sido un estimulante del desarrollo tecnológico. Si ahora se produce un incremento de estas inversiones, para la I+D es un dato a tener en cuenta. Es importante la ausencia de barreras de comunicación científica entre países. La crisis del COVID, por ejemplo, pudo resolverse gracias a la inexistencia de estos límites. Es un momento muy importante y me gustaría creer que, en este tipo de crisis, se pueden dar saltos interesantes.

Se aprecia un mayor interés por la investigación científica, pero también un número creciente de bulos. ¿Por qué estas falsedades, a veces evidentes, encuentran tanto eco?

Me sorprende tanto como a usted. ¡Cómo estos disparates pueden encontrar tanto interés! Hay que atacarlo con cultura y método científico. Que se critique y se sepa que hay cosas tan complejas que no pueden ser ciertas cuando hay una alternativa científica más sencilla. Hay que enseñar a la población que la precisión es imprescindible cuando se da información científica. Estamos en la lucha contra las *fake news*. Las academias europeas tienen estudios muy buenos sobre esta cuestión. Los consorcios estimulan a las academias a meterse en esta batalla para luchar en distintos planos. El nivel cultural de la población es determinante y, a veces, no se divulga bien. Hay que hablar a la gente con claridad y eso es un esfuerzo de todos.

En el contexto del cambio climático y la transición ecológica,

¿cuál debería ser el papel de la energía nuclear en España?

Es una de las fuentes de energía más importantes, pero no debe ser la única. No veo un futuro basado en un solo tipo de energía, sino un razonable reparto de las distintas fuentes. La energía nuclear es muy competente, pero el problema de su seguridad no se le escapa a nadie y condiciona su aceptación social. Lo que se haga debe explicarse con claridad. En los foros políticos, debería hablarse con mayor transparencia y que cada uno dijera lo que piensa. No podemos tirarnos los trastos a la cabeza sin saber que la papeleta que ponemos en la urna va para esto o para aquello. Más, cuando sabemos que tenemos que enfrentarnos al cambio climático que puede llevarnos por delante.

¿Qué estrategias podrían mejorar la transparencia a la que alude?

Tiene que haber una parametrización previa, saber a dónde queremos llegar y cómo lo vamos a medir. Las cosas deben argumentarse. Hasta ahora, hay movimientos internacionales muy potentes que se sirven de las *fake news* para movilizar la opinión general. Es necesario desmontar estas cosas, cuando son desmontables, y tener muy clara la seguridad de la población. Por ejemplo, ¿qué hacemos con los residuos? Un ciudadano debería acceder a la información, a través de los medios, y entender cómo son las cosas.

Como naturalista, ¿todavía tiene esperanza en el futuro de este planeta?

Es una cuestión complicada. Con las tendencias que llevamos, mal vamos. El consumo infinito y el aumento de la población no van muy bien con el cuidado del planeta. Debemos tomar más conciencia de la ecología desde pequeños, no se puede desperdiciar ni sobreconsumir. Ese tipo de cosas son más necesarias que un gran cambio tecnológico para que el planeta mantenga sus condiciones para albergar vida. Así, el primer paso es concienciar a la población y, luego, que cada uno saque sus propias conclusiones. ■

PRUEBAS DE INFILTRACIONES DE LA ENVOLVENTE DE SALA DE CONTROL EN CENTRALES NUCLEARES

Ana Artigao Arteaga e Ignacio Molina de la Peña / Área de Ingeniería de Sistemas

En caso de accidente, la sala de control de una central nuclear, y los que en ella realizan sus funciones, debe permanecer operativa y aislada de las consecuencias de los eventos que se produzcan en el exterior, de forma que los turnos de operación puedan realizar su labor de operar los sistemas necesarios durante una emergencia. Para garantizar esta función, las centrales españolas realizan periódicamente pruebas de vigilancia que verifican la integridad de la Envolvente de Sala de Control (CRE). Este artículo repasa el origen e implantación de estas pruebas, la normativa que regula los programas periódicos de pruebas y sus métodos de realización.

En las centrales nucleares, existe un área específica – sala de control– desde la que el personal de Operación monitoriza, supervisa y adopta acciones para el control seguro de la instalación. Así, la envolvente engloba tanto la sala de control como todo un conjunto de áreas adyacentes que deberán mantener en todo momento unas condiciones de habitabilidad adecuadas, tanto en condiciones normales como en situaciones accidentales.

Los denominados sistemas de habitabilidad de sala de control están diseñados para cumplir distintas funciones, como: a) evacuar la carga térmica para mantener unas condiciones de confort y de funcionamiento de equipos adecuadas, b) apoyar al sistema de PCI para la posible extracción de humos o c) permitir la estancia y operación en un accidente, durante un período prolongado, evitando o minimizando la exposición del personal a radiación o elementos tóxicos.

La habitabilidad de la sala de control

Las salas de control de las centrales nucleares españolas se diseñaron tomando como referencia la normativa del país de origen. Para las centrales de origen americano se adoptó como referencia el criterio 19 del apéndice A de la 10.CFR.50. Posteriormente, estos requisitos se trasladaron a la normativa española, a través de la instrucción de seguridad IS-27 del CSN sobre criterios generales de diseño de centrales nucleares

El criterio de diseño 19.1 de la IS-27 identifica y analiza distintas situaciones accidentales, sucesos internos y externos, que pudieran afectar al funcionamiento de la envolvente.

Este criterio de diseño establece:

«Se dispondrá de una sala de control desde la cual se podrán tomar las acciones adecuadas para operar la central de una manera segura en las condiciones normales de operación y mantenerla en una situación de seguri-

dad en las condiciones de accidente, incluyendo los accidentes de pérdida de refrigerante. Dicha sala de control dispondrá de una protección contra la radiación adecuada que permita el acceso y la permanencia en ella, en las condiciones de accidente, sin que el personal reciba una dosis superior a 5 rem al cuerpo entero, o su equivalencia a cualquier parte del mismo, durante el transcurso del accidente».

La IS-37 del CSN, sobre análisis de accidentes base de diseño en centrales nucleares, establece el mismo criterio de diseño (11A.1.4) al indicar:

«[...] se deberá disponer de las adecuadas medidas para garantizar que el personal de sala de control no reciba una dosis superior a 50 mSv durante todo el accidente».

Los sistemas de ventilación de la envolvente disponen de un sistema de impulsión y otro de extracción, que se diseñan para conseguir en su interior una presión ligeramente superior a la exterior. Esta presuri-



Sala de control de Vandellós II

zación minimiza la entrada de aire desde zonas potencialmente contaminadas en caso de accidente.

El diseño asume también otra hipótesis: que la envolvente no es estanca y, por ello, una cierta cantidad de aire exterior, denominada infiltración, penetrará a la envolvente de la sala de control. La tasa máxima de infiltración debe cuantificarse en dos casos: por un lado, en accidentes con emisión de radiactividad y, por otro, en accidentes con emisión de productos tóxicos en el entorno de la central nuclear.

En el primer caso, para accidentes con emisión de radiactividad, la tasa máxima de infiltración estará siempre por debajo del valor asumido en los análisis radiológicos de habitabilidad, cumpliendo con los límites de dosis establecidos, es decir, con los criterios de diseño de las IS-27 e IS-37 vistos anteriormente.

En el segundo caso, para accidentes con emisión de productos químicos tóxicos en el entorno de la central nuclear, el diseño de la envolvente debe asegurar que la tasa máxima

de infiltración de componentes nocivos estará por debajo de ciertos límites establecidos en la RG 1.78 (Evaluating the Habitability of a Nuclear Power Plant Control Room During a Postulated Hazardous Chemical Release).

Por tanto, el personal de Operación, en cualquier situación accidental, no recibirá dosis de radiación superiores a los límites indicados ni estará expuesto a componentes nocivos por encima de valores no aceptables.

Las centrales nucleares han desarrollado un programa de comprobaciones, pruebas e inspecciones de frecuencia determinada, que permite demostrar la fiabilidad de la envolvente, que no se deteriore y deje de cumplir con su diseño.

Para demostrar su fiabilidad en caso de accidente, las pruebas de la envolvente son estrictamente evaluadas por los organismos reguladores, como el CSN o la NRC (organismo regulador en EE. UU.).

En 2003, la NRC emitió la carta genérica, Generic Letter GL 2003-01,

donde expresaba su preocupación por diversos temas relacionados con la envolvente. En ella, enfatizaba la importancia de realizar pruebas de vigilancia fiables, para verificar que las centrales nucleares estaban manteniendo de forma adecuada la habitabilidad de la sala de control, asegurando que se mantienen las bases de licencia y de diseño aplicables. La NRC comprobó que la mayoría de las plantas diseñadas para mantener una sobrepresión en la envolvente habían implantado vigilancias de cara a verificar que los sistemas de ventilación podían mantener dicha presión positiva en la envolvente respecto a las áreas adyacentes y que, por tanto, la realidad de la planta se correspondía con el diseño.

Los resultados indicaban que, si bien la totalidad de las plantas incluían en su programa de pruebas ensayos de medida de la sobrepresión, solo un 30 % incluía pruebas periódicas para la medida de infiltraciones (para las que utilizaban la norma ASTM E741 [Standard Test Method for Determining Air Chan-

ge in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution]]).

Al analizar de forma conjunta los resultados de las pruebas de sobrepresión y los de infiltraciones, la NRC concluyó que llevar a cabo únicamente la prueba de sobrepresión no era suficiente para evaluar el estado de la envolvente. Así, centrales nucleares con resultados aceptables en las pruebas de sobrepresión obtuvieron resultados no aceptables en las pruebas de medida de infiltraciones, sobrepasando los límites aceptables para el personal de sala de control e incumpliendo, por tanto, los criterios de diseño.

La discrepancia en los resultados entre unas pruebas y otras llevaron a estudiar las hipótesis subyacentes en el método de medida de la sobrepresión, considerado hasta ese momento suficiente para demostrar que la envolvente era adecuada para hacer frente a cualquier situación accidental.

Por una parte, el método de la medida de sobrepresión solo mide la diferencia de presión entre la envolvente y las áreas adyacentes, pero no permite cuantificar la infiltración. Por otra parte, los estudios llevados a cabo identificaron que la vigilancia de la sobrepresión infiere que, si la presión es más alta en la envolvente, la contaminación no puede migrar desde áreas adyacentes a una presión inferior. Sin embargo, esta hipótesis se basa en considerar que la sobrepresión se consigue únicamente a través de unos determinados sistemas de ventilación estancos. Si existen áreas adyacentes que no pertenecen a la envolvente y se encuentran a mayor presión (por ejemplo, otras salas) podría haber un flujo de aire no controlado a la envolvente que introduciría contaminación.

Adicionalmente, como resultado de esta investigación, la NRC detectó un conjunto de deficiencias que cubrían un amplio espectro de situaciones; por una parte, se identificaron defectos asociados a aspectos de diseño y construcción de la envolvente, que no se correspondían con los criterios de diseño; por otra, la degradación gradual

de componentes de la ventilación, como sellados, conductos y compuertas, había pasado inadvertida en algunos casos (aspecto asociado en gran medida a programas inadecuados de mantenimiento preventivo y correctivo). Finalmente, modificaciones de diseño de la envolvente realizadas sin un control de la configuración ni pruebas de aceptación adecuadas habían degradado envolventes cuyo diseño original era correcto.

Como resultado de estos estudios, la NRC emitió dos guías reguladoras (*regulatory guides*): RG 1.196 (*Control Room Habitability at Light-Water Nuclear Power Reactors*) y RG 1.197 (*Demonstrating Control Room Envelope Integrity at Nuclear Power Reactors*), que establecen un programa de vigilancia de la envolvente y endosan el ASTM 741 como método adecuado para las pruebas de infiltraciones.

Implantación de los programas de vigilancia

En España, todas las centrales nucleares, en sus informes anuales de cumplimiento de normativa, analizaron la aplicabilidad de la GL 2003-01. En dichos informes, enviados al CSN, abordaron aspectos requeridos por la GL: a) confirmación de que la envolvente cumplía los Criterios Generales de Diseño (CGD) relativos a la habitabilidad y que estaba diseñada, construida, configurada, operada y mantenida de acuerdo con las bases de diseño y de licencia de la instalación; b) confirmación de que la tasa máxima de infiltración hacia la envolvente no era superior al valor asumido en los análisis radiológicos de habitabilidad de la sala de control; c) evaluación de las consecuencias derivadas de una emisión de productos químicos tóxicos en el entorno de la central y sus efectos sobre la habitabilidad de la sala de control; d) evaluación de las consecuencias derivadas de la presencia de humos en el exterior de la central y su efecto sobre la habitabilidad de la sala de control; e) indicación de si había establecidas medidas compensatorias relacionadas con la habitabilidad de la sala de control, describiendo

dichas medidas, y las acciones correctivas que era necesario realizar para poder retirarlas.

Igualmente, cada central desarrolló el programa de pruebas de las envolventes desde el punto de vista específico de medida de infiltraciones, basado en lo establecido en las RG 1.196 y RG 1.197, y lo incluyó en sus especificaciones técnicas de funcionamiento, que son el conjunto de requisitos mínimos que garantizan la operación segura de una central nuclear.

Las pruebas de infiltraciones se llevaron a cabo por primera vez en España entre 2006 y 2007. Tras este punto de partida, las centrales han seguido realizando pruebas de infiltraciones de forma continua, con una periodicidad de seis años, hasta hoy.

Sistemas de habitabilidad de sala de control

Todos los sistemas de ventilación de las centrales españolas de diseño americano comparten un esquema básico similar (figura 1).

El sistema se compone de dos trenes redundantes e independientes del 100 % de capacidad cada uno, con la posibilidad de recirculación y filtrado de aire interior o reposición desde el exterior. Normalmente, dispone de dos tomas de aire exterior, situadas en distintas zonas, a fin de cumplir con el criterio de fallo único. Estas tomas de aire suelen contar cada una con un monitor de radiación para alinear automáticamente el sistema en modo emergencia y seleccionar la toma que tenga un menor nivel de radiación. Cada tren, por su parte, está compuesto por una unidad de acondicionamiento de aire (en funcionamiento durante operación normal) encargada de evacuar la carga térmica de los equipos presentes y proporcionar un adecuado confort.

Cada tren dispone de una unidad de filtrado de emergencia compuesta normalmente por un calentador/deshumidificador, prefiltro, filtro de alta eficiencia (preHepa), un filtro de carbón activo, filtro de muy alta eficiencia (HEPA) y un ventilador centrífugo, todos ellos en serie.

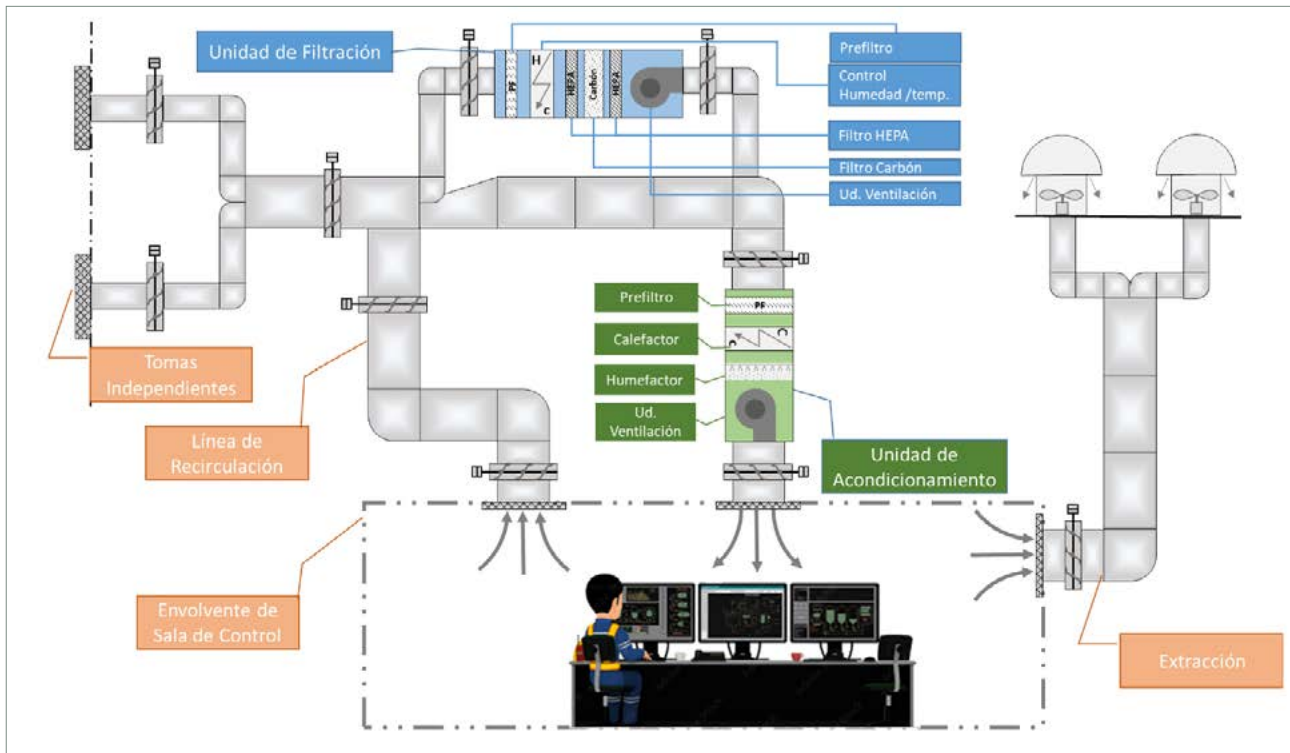


Figura 1. Esquema típico de un sistema de ventilación de sala de control (por simplicidad se ha dibujado un solo tren)

Por último, se suele contar con un subsistema independiente de extracción de aire para facilitar la renovación de aire o la evacuación de humos.

Como filosofía general, los sistemas de ventilación de sala de control suelen contar con los siguientes modos de funcionamiento:

- Normal: es el modo habitual de operación (figura 2). El sistema garantiza la habitabilidad de sala de control mediante unas condiciones de confort adecuadas. La mayor parte del aire (alrededor del 90 %) procede de la propia recirculación de las salas. El 10 % restante procede del exterior para su renovación, manteniendo, en todo caso, una ligera sobrepresión respecto al exterior. En general, es suficiente con el funcionamiento de uno de los dos trenes. Para apoyar esta renovación, habrá, al menos, un extractor en servicio.
- Modo filtración (radiológico): permite mantener la sala de control en sobrepresión, filtrando la totalidad del aire exterior potencialmente contaminado, así como

parte del aire recirculado de la sala de control (figura 3).

Cuando se recibe una señal de emergencia –normalmente, alta radiación en los monitores de las tomas, señal de LOCA (Loss of Coolant Accident - accidente por pérdida de refrigerante) o señal de LOOP (Loss of Off site Power - pérdida de energía externa)–, el sistema pone en

funcionamiento las unidades de filtración de emergencia, se alinea de forma conveniente y se paran los extractores. Así, el aire proveniente del exterior (potencialmente contaminado) y el recirculado de la sala de control pasan por la unidad de filtración para que los filtros HEPA retengan las partículas radiactivas y el filtro de carbono los yodos. Asimismo, se pone en servicio

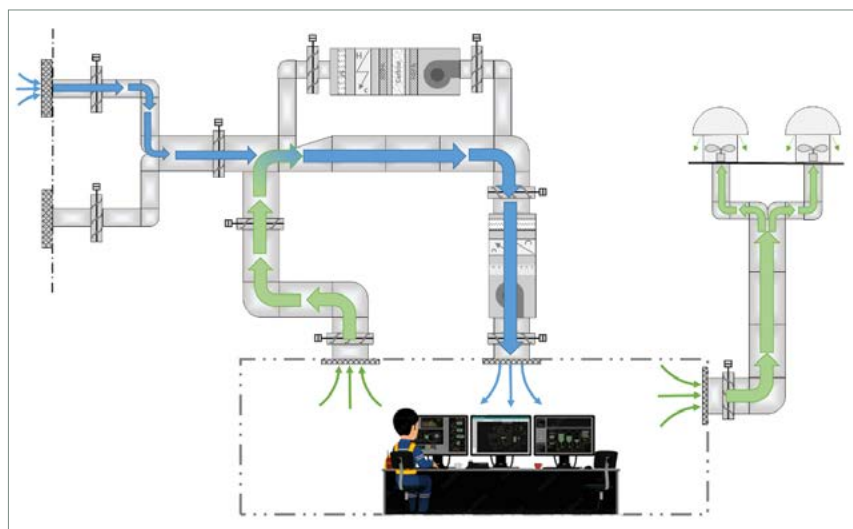


Figura 2. Funcionamiento en modo normal

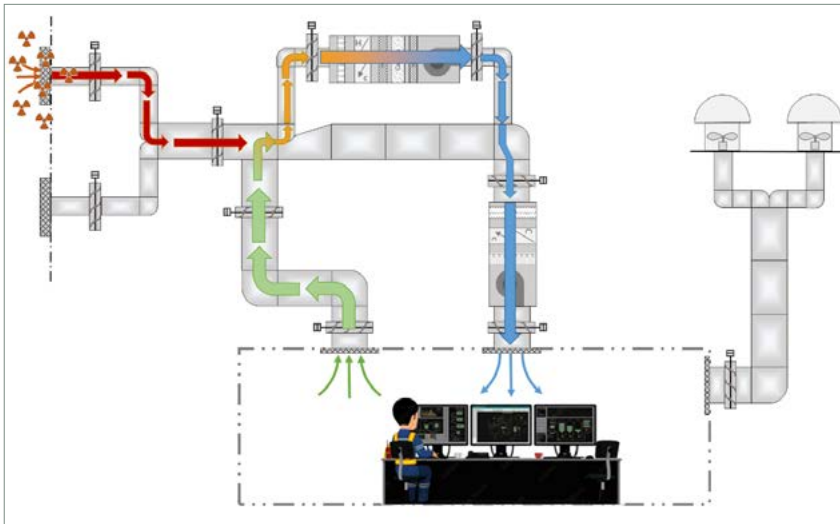


Figura 3. Funcionamiento en modo filtración (radiológico)

el calentador eléctrico de la unidad con el objetivo de evitar la llegada de humedad al filtro de carbón (que se colmataría). De esta forma, sala de control quedará en sobrepresión y aislada del exterior.

Es importante recordar que este modo de operación no impide totalmente la presencia de radiación en la sala de control, si no que se limitan los valores de dosis recibidos por el turno de operación por debajo de los límites admisibles.

Las hipótesis de los análisis de seguridad aplicables, en cuanto a término fuente radiológico, dispersión atmosférica, eficiencia del filtrado, caudales de aire, infiltraciones, etc., son evaluados por las áreas competentes del CSN, en especial el Área de Evaluación de Impacto Radiológico.

- Modo recirculación (tóxicos): en esta situación, las unidades de filtrado no son efectivas, por lo que la estrategia consistirá en aislar el sistema del exterior manteniendo la recirculación del aire de la sala de control (figura 4).

Este alineamiento se produce de forma automática cuando se detectan gases tóxicos en alguna de las tomas exteriores. Posteriormente, se produce el aislamiento de la toma exterior, la entrada en funcionamiento de la unidad de filtración y la parada de los extrac-

tores. El sistema no fuerza la sobrepresión con respecto al exterior, al no haber inyección de aire procedente de fuera, si bien es esperable una cierta sobrepresión debido a que ya existía durante el modo normal de operación.

Hay que destacar que la RG 1.78 permite excluir este riesgo del diseño de los sistemas de ventilación si los titulares demuestran que no existen riesgos significativos por liberación de gases tóxicos en un radio de 8 km (5 millas) alrededor del emplazamiento. Así, en España, solo las centrales de Ascó y Vandellós II cuentan en su diseño con este modo de funcionamiento.

Procedimiento de prueba de la envolvente de sala de control

En los modos de operación anteriores, el correcto aislamiento de la sala de control del exterior (impidiendo la entrada de flujos de aire no tratados del exterior), es crucial para los objetivos de estos alineamientos, para lo que se debe mantener y garantizar la correcta estanqueidad de la envolvente.

Para el funcionamiento en modo radiológico, estos programas requieren la determinación, con las frecuencias especificadas en la RG 1.197, de las infiltraciones que atraviesan los límites de la envolvente, de acuerdo con los límites aceptables de la prueba. Esta guía reguladora endosa el programa de pruebas propuesto en el Apéndice I de la guía NEI 99-03 (*Control Room Habitability Assessment Guidance*) que, por último, resulta en la aplicación de los métodos descritos en el documento ASTM-E741-00. Para el funcionamiento en modo tóxicos, la RG 1.78 considera también aceptables las pruebas descritas en el ASTM.

El ASTM-E741-00 describe varios métodos de uso de dilución de un gas trazador, normalmente hexafluoruro de azufre, para determinar las infiltraciones a una zona concreta desde el exterior. Se proponen tres métodos distintos: 1) decaimiento de la concentración, 2) inyección constante y 3) concen-

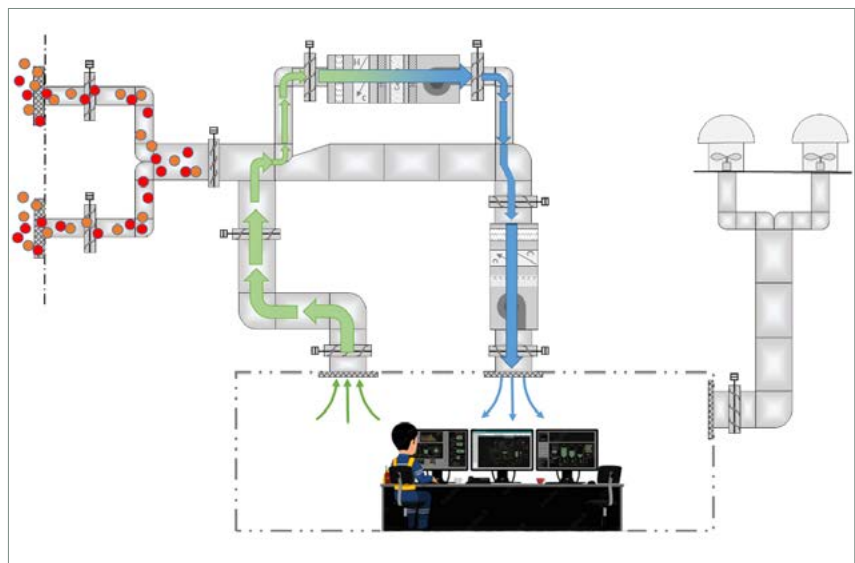


Figura 4. Funcionamiento en modo recirculación (tóxicos)

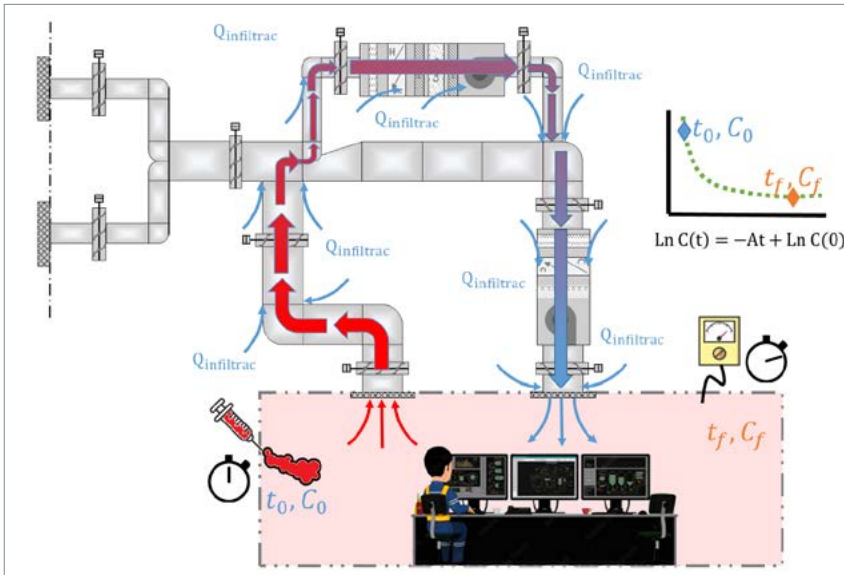


Figura 5. Diseño esquemático del método de decaimiento de la concentración

tracción constante. Cada uno de estos métodos es más adecuado para un modo de operación concreto de la ventilación de sala de control.

MÉTODO DE DECAIMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN

Mediante este método se introduce un pequeño volumen de gas trazador en la envolvente y, tras conseguir una concentración uniforme, se mide la variación en el tiempo de la concentración de gas trazador. En general, este método asume que la tasa de infiltraciones del volumen de prueba es constante, por lo que los logaritmos de las concentraciones tendrán un comportamiento lineal: $\ln C(t) = -At + \ln C(0)$. Así, calcula la tasa media de cambio de aire como la diferencia entre los logaritmos de las concentraciones inicial y final de gas trazador, dividida por el período de tiempo (figura 5).

Al no haber inyección externa de aire/gas durante la prueba, este método se utiliza en las pruebas de infiltraciones con los sistemas de ventilación funcionando en modo recirculación (tóxicos).

El procedimiento contempla una fase inicial en la que se inyecta gas trazador en el interior de la envolvente, con la ventilación funcionando. Transcurrido un tiempo recirculando el aire, se logrará una concentración de gas trazador uniforme en

todo el volumen de la envolvente ($V_{\text{envolvente}}$). Antes de iniciar la toma de datos, es importante garantizar la uniformidad de gas trazador.

Finalizada la inyección de gas, se procede a la toma de datos de concentración a intervalos de tiempo. Aquí, el ASTM contempla dos opciones: a) tomar una medida inicial y una media final suficientemente espaciadas en el tiempo, de forma que la tasa de renovación de aire se calcularía como $A(\text{scfm}) = [\ln C(t_2) - \ln C(t_1)] / (t_2 - t_1)$; o b) tomar un mayor número de datos a distintos intervalos y reali-

zar un análisis de regresión de los logaritmos de la concentración. El ASTM recomienda esto último para comprobar la hipótesis de que la tasa de cambio de aire fue constante durante la prueba.

El criterio de aceptación de esta prueba (valor máximo de infiltraciones, en CFM –cubic feet per minute–) está definido en la RG 1.95 (Protection of Nuclear Power Plant Control Room Operators Against an Accidental Chlorine Release). Dado que la preocupación es mantener concentraciones no tóxicas para el personal, se calcula a partir de la tasa de renovación completa de aire de la envolvente en estos casos, el criterio máximo es $0.06 \times V_{\text{envolvente}}$. En estos casos, el volumen de la envolvente afecta sensiblemente al criterio de aceptación.

MÉTODO DE INYECCIÓN CONSTANTE

Mediante este método se mide el caudal medio de cambio de aire inyectando gas trazador en la zona a unos caudales y concentraciones conocidos y constantes (figura 6).

Posteriormente, se realiza una toma de datos a distintos intervalos. La evolución de la concentración de gas trazador dentro de la zona vendrá marcada por el caudal medio de cambio de aire para el período de medición, esto es, el producto del caudal de gas trazador por la media

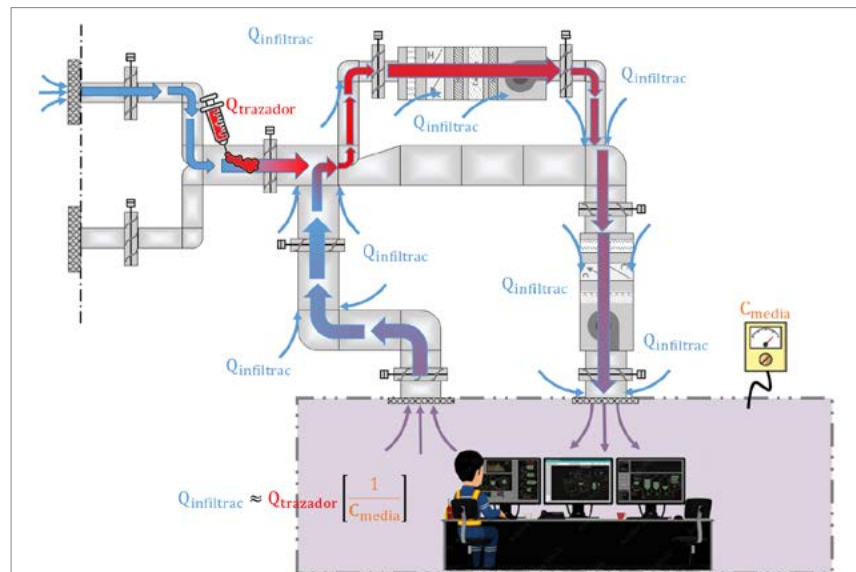


Figura 6. Diseño esquemático del método de inyección constante



Simulador de sala de control de la central nuclear Almaraz

de los inversos de la concentración medida menos una corrección para las concentraciones inicial y final:

$$Q_{\text{infiltrac}} = Q_{\text{trazador}} \left[\frac{1}{C_{\text{media}}} \right] - \frac{V_{\text{envolvente}}}{t_2 - t_1} \ln \left[\frac{C_{f/in}}{C_{inic}} \right].$$

Una ventaja de este método es que no es necesario conocer el volumen de la zona si las concentraciones inicial y final utilizadas en el cálculo son aproximadamente iguales.

Es más adecuado para la medida de las infiltraciones, con el sistema en modo radiológico, ya que una parte del caudal de aire filtrado proviene del exterior. En esta situación, no tendría sentido utilizar el método anterior, ya que el caudal de aire exterior diluiría constantemente la concentración de gas trazador y enmascararía el efecto de las infiltraciones.

Este método, al igual que el anterior, tiene una fase inicial en la que se determina una concentración objetivo de gas trazador. Normalmente, se realiza una primera inyección rápida de gas trazador, con el objetivo de alcanzar la concentración desea-

da en un tiempo corto (esta prueba suele durar varias horas).

Tras realizar medidas que garanticen que el gas trazador se ha repartido uniformemente, se continúa la inyección de gas trazador a un caudal constante y conocido (Q_{trazador}) y se realizan múltiples medidas de concentración espaciadas en el tiempo. Durante este tiempo de prueba, la concentración de gas trazador puede variar o no, dependiendo del valor de Q_{trazador} , aunque lo ideal es que el caudal sea tal que la concentración no varíe apreciablemente.

Una vez recogido un número suficiente de datos, se calcula la media de las concentraciones (C_{media}) que junto con el caudal de trazador se utilizará para estimar las infiltraciones de aire limpio durante la prueba. Al igual que en el método anterior, el ASTM permite, opcionalmente, realizar una regresión con el fin de probar la hipótesis de que el caudal de infiltraciones se haya mantenido constante.

El criterio de aceptación viene determinado por las hipótesis utilizadas para la evaluación radiológica del cumplimiento de los límites de 5 rem. En los cálculos empleados en el licenciamiento, las infiltraciones tienen un valor de partida, por lo que la prueba debe demostrar que el titular arroja unos valores iguales o menores.

MÉTODO CONCENTRACIÓN CONSTANTE

No se ha utilizado en las centrales nucleares españolas, por lo que no se describe en el presente artículo.

CONSIDERACIONES GENERALES A LA APLICACIÓN DE LOS DISTINTOS MÉTODOS

Si bien son capaces de proporcionar un valor de la tasa de infiltraciones de la sala de control, los métodos anteriores pueden dar resultados con un valor de incertidumbre alto (10-20 %) debido a la complejidad del procedimiento y los volúmenes a muestrear. Unas incertidumbres



altas penalizarán a aquellas salas de control que tengan un criterio de aceptación de la prueba, en CFM, muy bajo, normalmente debido a su reducido tamaño. De esta forma, el ASTM-E741 introduce multitud de criterios con el objetivo de reducir la incertidumbre y garantizar que la medida de infiltraciones sea representativa entre ellos:

- La precisión requerida a los instrumentos de medida.
- Que las concentraciones objetivo se encuentren dentro del rango donde dichos instrumentos tienen una precisión mayor.
- La importancia de garantizar la homogeneidad del gas trazador dentro de la envolvente, una vez que este se ha inyectado. Si el gas trazador no se distribuye de forma homogénea entre las salas, las medidas realizadas pueden no ser fiables.
- Los tiempos de duración de las pruebas, que se asumen en función de las renovaciones de aire

por hora de la envolvente y que, en general, se basan en unos tiempos suficientemente largos, de forma que se garantice una incertidumbre máxima del 10 % con un nivel de confianza del 95 %.

- Es crítico conocer con precisión el volumen de la envolvente ($V_{\text{envolvente}}$). Esto no es sencillo, debido a su geometría compleja, falsos techos, elementos internos, etc. El ASTM indica que el valor de la concentración no debería oscilar del 20 % en caso de incertidumbres del valor de $V_{\text{envolvente}}$ del 15 %, permitiendo hasta un 40 % si $V_{\text{envolvente}}$ se conoce con una precisión del 5 %.
- También es de destacar la importancia de los alineamientos de la ventilación de salas adyacentes a la sala de control, pero que no forman parte de la envolvente. Esto es debido a que pueden alterar la «jerarquía de presiones» y, consecuentemente, las infiltraciones. Los titulares deben realizar un análisis del peor escenario.

Por último, sin relación directa con las incertidumbres de medida, hay que recordar la importancia que tanto las distintas *regulatory guides* como el propio ASTM conceden al control de la configuración. De esta forma, los titulares deben hacer y documentar un *walkdown* previo a la prueba, con el fin de localizar cualquier elemento, abertura, etc. que pudiera afectar a la prueba.

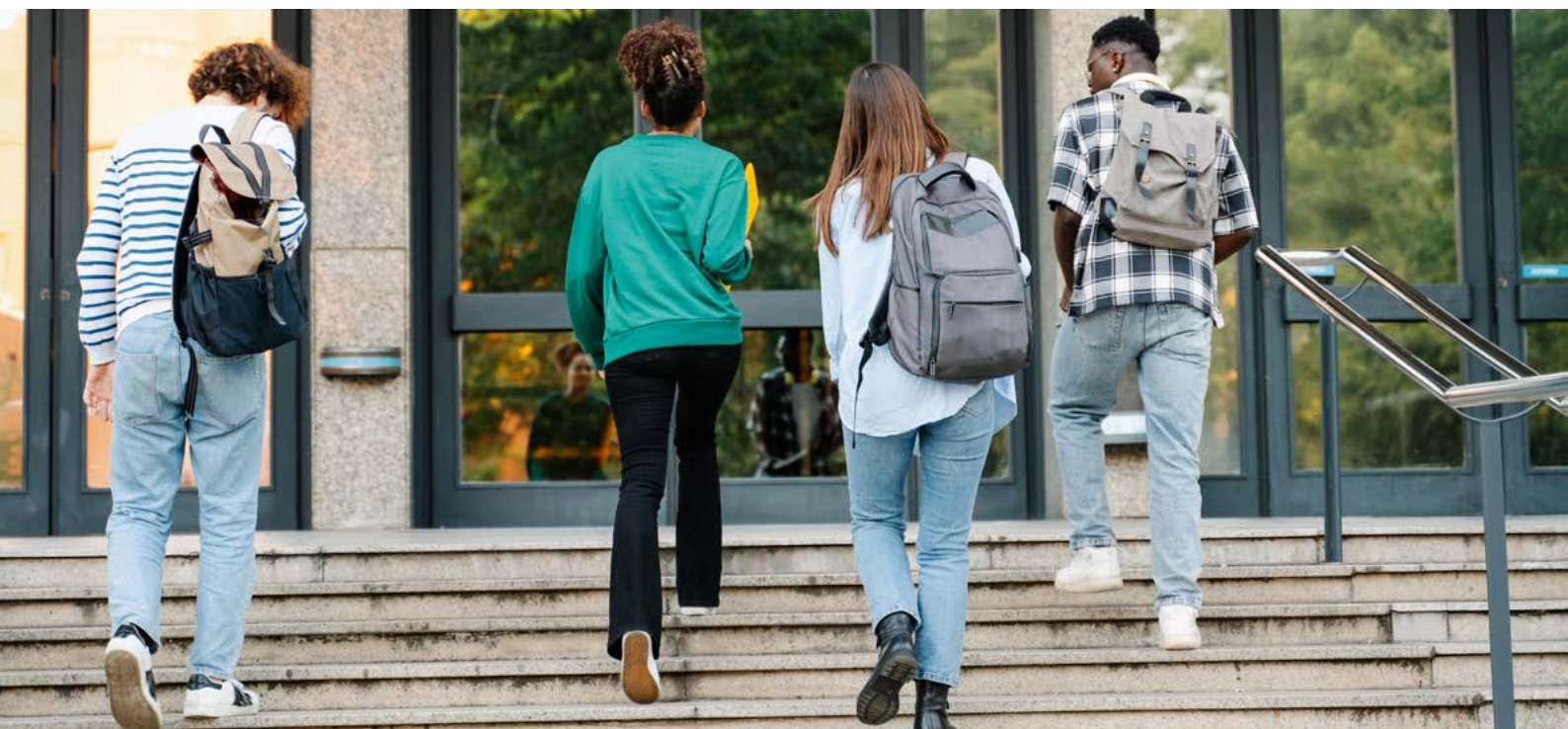
Conclusiones

A lo largo de este artículo hemos revisado la importancia de los sistemas de ventilación y filtración de la envolvente de sala de control y, en especial, el impacto que las infiltraciones pueden tener de cara a que estos sistemas cumplan con sus funciones de seguridad. La evaluación y control del estado de la estanqueidad de dicha envolvente se encuentra estrictamente regulado y remite a la aplicación de métodos específicos de prueba que ayudan a los titulares a garantizar la seguridad de la instalación. ■

LA NUEVA IS-47 DEL CSN: EL RETO DE UNIVERSALIZAR LA PROTECCIÓN CONTRA EL RADÓN EN EL ÁMBITO LABORAL

Autores: Marta García-Talavera, Beatriz Robles, Manuel Martínez, Diego Fernández, Celia Sánchez, Ricardo López-Ulloa, Inmaculada Simón / Subdirección de Vigilancia Radiológica Ambiental (CSN)

En 2022, mediante Real Decreto 1029/2022 de 20 de diciembre, se aprobó el Reglamento de protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes (RPSI), que transpuso al ordenamiento jurídico español la mayor parte de los requisitos de la Directiva 2013/59/Euratom. Entre estos destacan –por su gran alcance y los beneficios en términos de reducción de dosis individuales y colectiva– los relativos a la protección contra el radón. En el ámbito laboral, el artículo 75.1 del RPSI, en su apartado c, requiere a los titulares de las actividades laborales que se desarrollen en plantas bajas y plantas bajo rasante de los «municipios de actuación prioritaria» estimar el promedio anual de concentración de radón en todas las zonas a las que puedan acceder las personas trabajadoras por razón de su trabajo, con la finalidad de evaluar el riesgo asociado a la exposición al gas y, en caso necesario, mitigarlo o controlarlo.



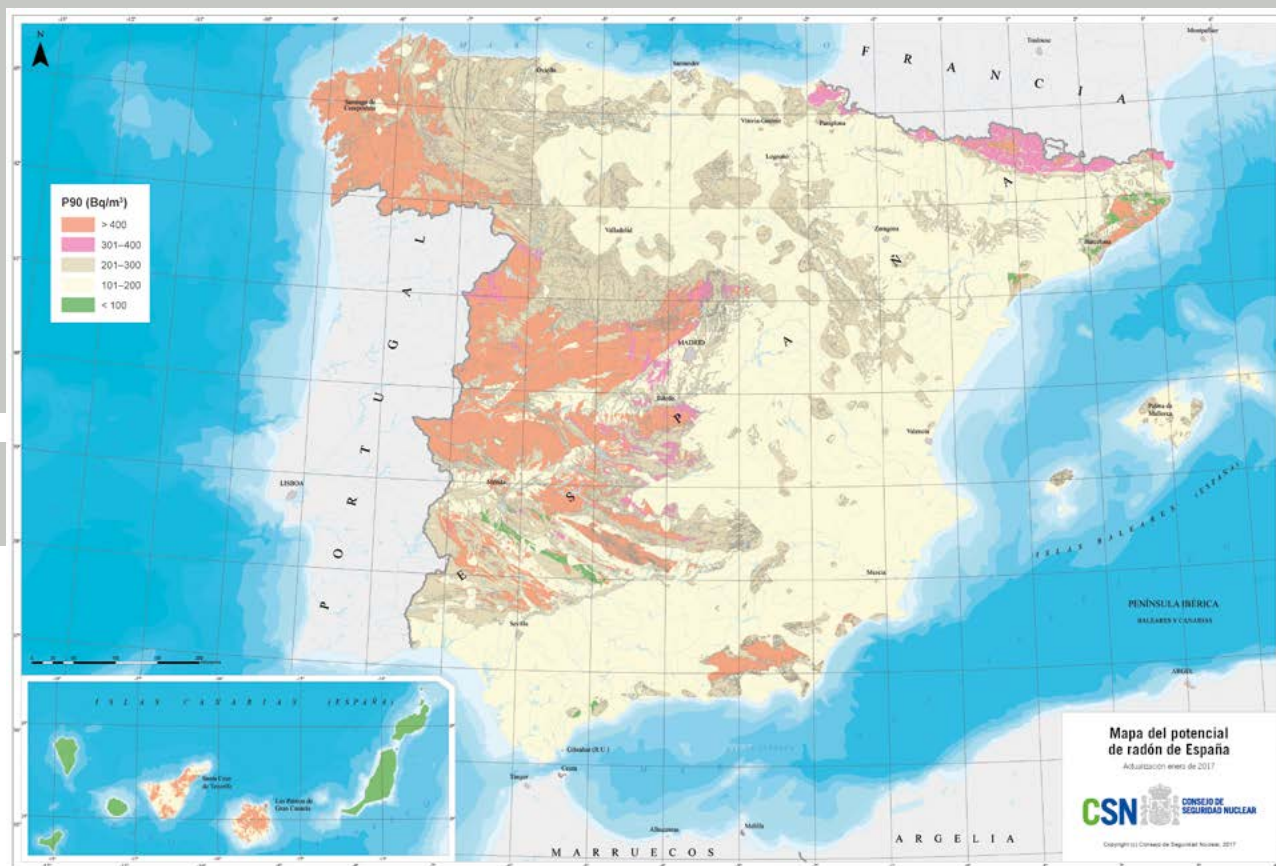
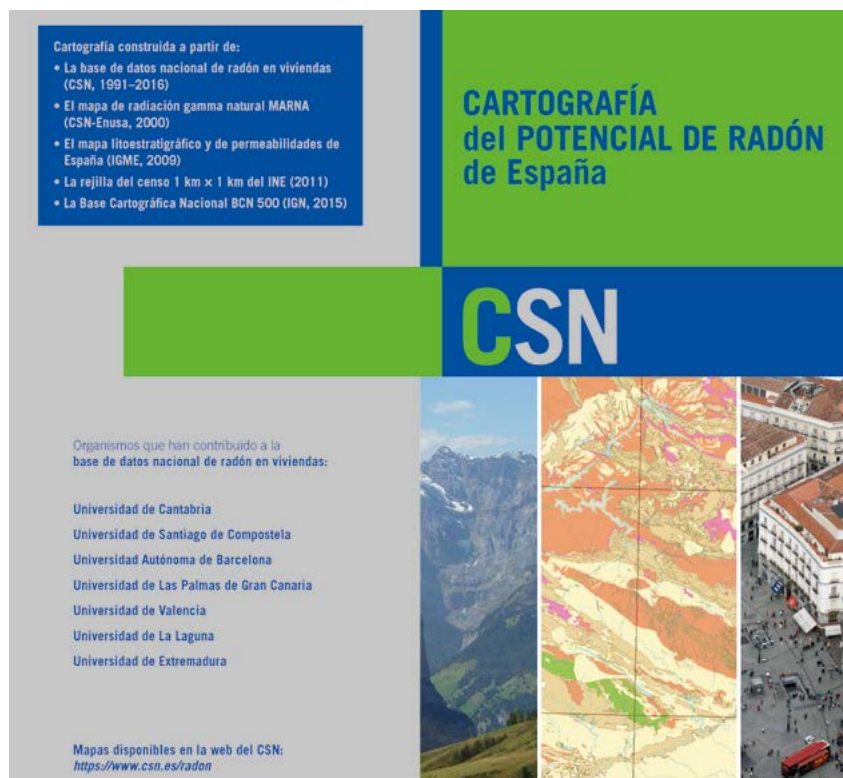


Figura 1. Mapa del potencial de radón de España publicado por el CSN en 2017. Debajo, portada del informe técnico del CSN (INT-04.41) que presenta la metodología utilizada para este desarrollo

Mientras que en las obras o cavidades subterráneas y en los lugares de trabajo en los que procesa agua de ese origen (contemplados actualmente en los apartados a y b del art. 75.1 del RPSI) la Instrucción IS-33 del CSN obligaba, ya desde 2012, a hacer mediciones de radón, el apartado c tiene por objetivo ampliar la protección de las personas trabajadoras a todas las zonas geográficas del país con mayor potencial de radón. Según el artículo 79 del RPSI, la responsabilidad de definir de forma concreta y a nivel municipal esas zonas, corresponde al Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), que en 2017 había publicado el mapa de potencial de radón de España. Este mapa clasifica las unidades geológicas del territorio nacional en función del percentil 90 (P_{90}) de la distribución de niveles de radón en los edificios. Por ejemplo, para un P_{90} de 300 Bq/m^3 (referido al promedio anual de con-



centración de radón en planta baja) se estima que:

- El 90 % de los edificios en esa área tienen concentraciones de radón inferiores a 300 Bq/m³.
- El 10 % de los edificios presentan concentraciones superiores a 300 Bq/m³.

Con la aprobación de la IS-47, de 9 de abril de 2025, el CSN cumple con el mandato del artículo 79 de RPSI de definir «el listado de términos municipales de actuación prioritaria contra el radón». Adicionalmente, la IS-47 desarrolla diversos artículos del RPSI y del Reglamento de instalaciones nucleares y radiactivas y otras actividades relacionadas con la exposición a las radiaciones ionizantes (Real Decreto 1217/2024) sobre cómo y en qué plazos acometer y actualizar los estudios de medición de radón en centros laborales en esos municipios. Los principales aspectos de la IS, así como las actuaciones puestas en marcha para impulsar su cumplimiento, se resumen en este artículo.

Definición de los términos municipales de actuación prioritaria

La Organización Mundial de la Salud (OMS) publicó en 2009 el Ma-

nual de la OMS contra el radón en interiores. Desde una perspectiva de salud pública, insta a los Gobiernos a implementar planes nacionales de actuación con el objetivo de reducir el número de cánceres en la población debidos al radón, que es la segunda causa más importante de cáncer de pulmón, y la primera en no fumadores. Estos planes deben incluir campañas de información, soluciones constructivas anti-radón en las normas de edificación y regulación de la exposición ocupacional. En esta publicación, la OMS destaca que, a pesar del coste económico que conlleva implantar estrategias nacionales, especialmente en el corto plazo, la inversión se justifica plenamente si se consideran los beneficios a medio y largo plazo. La reducción de la incidencia del cáncer de pulmón en la población y, por ende, la disminución de los costes de salud asociados, superan la inversión realizada en la prevención y el control. La OMS recomienda, además, priorizar las intervenciones en las zonas con mayor riesgo de exposición, ya que la implementación de medidas de protección resulta especialmente relevante y coste-efectiva.

Ese mismo enfoque de priorización de esfuerzos en las zonas geográficas más expuestas se adopta



Figura 3. Guía de rehabilitación frente al radón, publicada por el Ministerio de Vivienda para facilitar la aplicación del DB-HS 6 del CTE

en la directiva 2013/59/Euratom (p.ej., artículo 103.3) y cobra especial sentido en países como España, con una geología muy diversa. Aquí hay un marcado contraste geográfico en los niveles de radón en el aire interior de los edificios, asociado a las distintas formaciones geológicas. En términos de mortalidad por cánceres de pulmón debidos a la exposición a radón residencial, ese contraste se refleja en fracciones atribuibles poblacionales que varían por comunidades autónomas, desde aproximadamente un 2 % en el País Vasco, hasta el 7 % en Galicia y Extremadura (Ministerio de Sanidad, 2021).

El listado de términos municipales de actuación prioritaria contra el radón que ha definido el CSN mediante la IS-47 es el de «Zona II» del Apéndice B del Documento Básico DB-HS6, «Protección frente al radón», del Código Técnico de la Edificación (CTE), aprobado en 2019. En el ámbito del CTE, esa es la categoría en la que se requieren mayores medidas de protección contra el radón en la edificación. La clasificación se basó precisamente en el mapa de potencial de radón de España del CSN. En concreto, los términos municipales de «Zona II», representados en el mapa de la figura 1, son aquellos en los que más de un 5 % del tejido urbano se encuentra en unidades geológicas con $P_{90} > 300 \text{ Bq/m}^3$.

Los motivos de hacer coincidir el listado de municipios de actuación

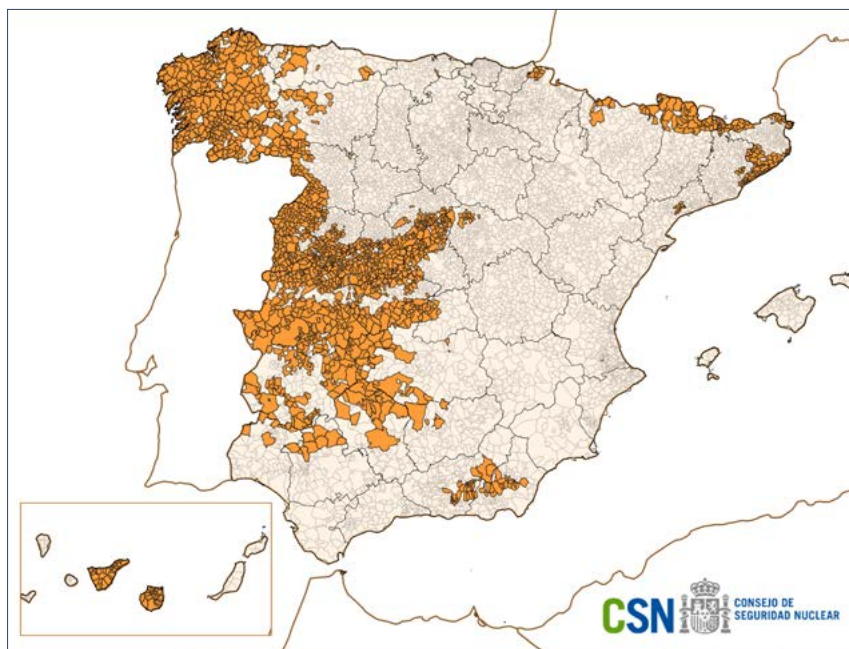


Figura 2. Términos municipales de actuación prioritaria contra el radón

prioritaria con el de «Zona II» del CTE responden a criterios de riesgo y de practicidad:

1) Estudios recientes (Martín-Gisbert, 2023) estiman que, en estos municipios, uno de cada cinco trabajadores puede estar expuesto a concentraciones de radón que, en promedio anual, superan el nivel de referencia de 300 Bq/m³, siendo este el nivel de referencia que establece el RPSI.

2) Transcurridos cinco años desde la aprobación del DB-HS6, en estos municipios, el sector de la construcción está ya familiarizado con la aplicación de soluciones constructivas contra el radón, que desarrolla en detalle la *Guía Rehabilitación frente al radón para proyectistas*, publicada por el Ministerio de Vivienda.

La aprobación de la IS-47 alinea las disposiciones españolas con la de otros Estados miembro de la Unión Europea. Como ejemplos, Portugal estableció en 2022 la medición obligatoria de radón en todos los lugares de trabajo del país (Resolución del Consejo de Ministros N.º 150-A/2022, de 29 de diciembre) y Francia lo hizo en 2021 para plantas bajas y bajo rasante de centros de trabajo en zonas geográficas identificadas como de «alto potencial de radón» (artículo R4451-1 del Código de Trabajo).

Si bien la IS-47 del CSN ha captado la atención pública y mediática por la exigencia del artículo 75.1.c de medir la concentración de radón en los lugares de trabajo de esos municipios, es crucial comprender el propósito de las mediciones: identificar situaciones de riesgo y, en su caso, aplicar soluciones de tipo constructivo para reducir los niveles de radón. En la mayoría de los lugares de trabajo afectados, esas intervenciones evitarán la necesidad de aplicar el régimen de control de trabajadores expuestos que desarrollan los artículos 19.2 y 19.3 del RPSI.

Por otro lado, es importante recordar que la presencia de radón en concentraciones superiores al nivel de referencia puede darse en lugares de trabajo de cual-

quier punto de España, aunque con frecuencia muy distinta en unas regiones y en otras. El objetivo a largo plazo debe ser ampliar progresivamente la obligación de medir radón a todo el territorio nacional, garantizando así una protección uniforme y efectiva para todas las personas trabajadoras.

¿Dónde y cómo se debe medir el radón en el aire interior?

El artículo 75.1 del RPSI establece que los titulares de determinadas actividades laborales «deberán estimar el promedio anual de concentración de radón en aire en todas las zonas del lugar de trabajo en las que los trabajadores deban permanecer o a las que puedan acceder por razón de su trabajo». En este sentido, la IS-47 aporta una mayor claridad y precisión en su aplicación a los lugares de trabajo mencionados en el artículo 75.c, proporcionando definiciones básicas que facilitan una mejor comprensión y cumplimiento de esta normativa:

- Titular de la actividad laboral: persona natural o jurídica que emplea y mantiene el vínculo contractual laboral con las personas trabajadoras.
- Lugar de trabajo: cualquier espacio en el que las personas trabajadoras deban permanecer o al que deban acceder en razón de su trabajo, incluidos los distintos lugares a los que deban desplazarse en el ejercicio de este.
- Centro de trabajo: la unidad productiva con organización específica que sea dada de alta como tal ante la autoridad laboral.

La IS-47 concreta que la obligación del empleador es estimar los promedios anuales de concentración de radón en las distintas zonas del centro de trabajo propio, no en otros lugares o centros a los que sus trabajadores deban desplazarse por razón de su trabajo (por ejemplo, una empresa de instalaciones eléctricas deberá medir en sus oficinas o almacenes, pero no en otros centros de trabajo o viviendas a los que se desplacen sus empleados a prestar servicios). En cuanto a los estudios de medición, pueden considerarse tres fases (fi-



Figura 4. Etapas del estudio de medición, resaltando la importancia de la participación de las personas trabajadoras en estos.

gura 4): la de planificación, la de medición y la de elaboración del informe de resultados. Además, la IS-47 detalla los mecanismos específicos para la información y consulta a las personas trabajadoras, que incluyen:

- Comunicación previa: antes de que se inicien las mediciones de radón en el centro, los trabajadores deben ser informados sobre el objetivo del estudio y las precauciones a adoptar durante el mismo.
- Consulta: en la fase de planificación, debe preguntárseles sobre las zonas en las que pasan más tiempo y, una vez obtenidos los resultados del estudio, en su caso, sobre las medidas de mitigación a adoptar si los niveles de radón superan el nivel de referencia.
- Acceso a los resultados: una vez finalizado el estudio, los emplea-

Tabla 1. Número de detectores a distribuir en función de las características del centro de trabajo. Las zonas de tránsito o de ocupación esporádica (aquellas en las que la permanencia de ningún trabajador o trabajadora supere 50 horas anuales) quedan exentas de medición

CARACTERÍSTICAS DEL CENTRO DE TRABAJO	NÚMERO DE DETECTORES
Edificios compartimentados tradicionales	Un detector por despacho o habitación
Sótanos	Un detector por cada cuarto o sección compartimentada o semi-compartimentada
Áreas de hasta 1000 m ² (oficinas de planta abierta, superficies de atención al público, almacenes comerciales, etc.)	Un detector por cada 200 m ²
Áreas de hasta 5000 m ²	Un detector por cada 400 m ²
Áreas muy extensas	Un detector por cada 500 m ²

dos deben ser informados de los resultados obtenidos.

La IS-47 aporta también instrucciones precisas sobre el número de detectores de radón a emplear, según recoge la tabla 1 (tomada de la *Guía de Seguridad GS 11.4* del CSN) y sobre el periodo de exposición de los detectores. En concreto, la IS-47 establece que la exposición de los detectores debe tener lugar:

- Bien durante un periodo mínimo de tres meses, no necesariamente consecutivos, comprendido entre el 1 de octubre y el 31 de mayo (de manera que proporcione, en la mayoría de los casos, una estimación conservadora);
- Bien a lo largo de un año natural (excluyendo, en su caso, el periodo de cierre vacacional o de inactividad), en periodos de duración máxima trimestral.

Finalmente, la Instrucción estandariza el modelo de informe de resultados y aclara que debe integrarse en las evaluaciones de riesgos laborales que requiere la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, quedando, por tanto, sujetos a los

deberes de conservación y de remisión a la autoridad laboral que prevé la legislación laboral. Fija también la periodicidad con la que deben actualizarse los estudios (que pueden ser de cinco o diez años, dependiendo de los resultados de las mediciones previas y de si existen sistemas de mitigación de tipo activo) y concreta el alcance, que puede ser más limitado que el del estudio inicial.

Alianzas para la protección laboral contra el radón

La publicación de la Instrucción IS-47 en el BOE el 1 de mayo de 2025 marca un hito en la protección ocupacional frente a los riesgos del radón. La implantación de esta IS-47 tendrá beneficios indiscutibles en términos de protección radiológica, pero al afectar a decenas de miles de centros de trabajo, conlleva desafíos importantes, que requerirán el apoyo de las Administraciones competentes y el compromiso y proactividad de las empresas y de otros agentes sociales.

El Plan Nacional contra el Radón cuenta con un eje específico sobre «Zonas de actuación prioritaria».

Adicionalmente, el eje de «Lugares de trabajo» incluye el establecimiento de un convenio entre el CSN y la Inspección de Trabajo y Seguridad Social (ITSS), cuyo objetivo es reforzar la protección de las personas trabajadoras frente a la exposición al gas radón. Este acuerdo, firmado el 29 de julio de 2024, establece mecanismos de cooperación entre ambas entidades que permitirán mayor eficacia en las actuaciones inspectoras.

Entre sus principales cláusulas, se encuentra la obligación de la ITSS de remitir las conclusiones que obtengan en sus funciones inspectoras en relación con los incumplimientos recogidos en el artículo 82.3 del RPSI. Además, el CSN se compromete a proporcionar formación especializada a los inspectores de trabajo, con el fin de mejorar su capacidad de identificación y evaluación de riesgos asociados a este gas radiactivo. El primer curso de formación, organizado por la Escuela de la Inspección de Trabajo y Seguridad Social, se celebró el 14 de marzo de 2025, en Santiago de Compostela.

Hay que destacar también la importante labor de difusión que, des-



Acto de apertura del primer curso de radón para inspectores y subinspectores de trabajo, el pasado mes de marzo en Santiago de Compostela. El curso fue impartido por el CSN y la Subdirección para la coordinación de la ITSS del Ministerio de Trabajo.

de la aprobación del RPSI en 2022, han llevado a cabo los organismos regionales de prevención de riesgos laborales. A lo largo de 2024, el CSN ha participado como ponente en Jornadas de divulgación o formación organizadas por estos organismos, en Asturias, Castilla y León, Galicia y Madrid. Varias comunidades autónomas, como Castilla y León o Madrid, han incorporado el radón en sus Estrategias de Seguridad y Salud Laboral.

Recién aprobada la Instrucción, aún queda un largo camino por recorrer en su aplicación efectiva, para lo cual es imprescindible la colaboración de todos los actores. Las capacidades nacionales de medición y de asesoramiento experto deben reforzarse, y resulta crucial favorecer la especialización de empresas locales del sector de la construcción, que permita implementar soluciones accesibles. Pero, fundamentalmente, el éxito radicarán en el compromiso tanto de las empresas como de las personas trabajadoras, con la mejora continua en materia de protección radiológica. ■

Referencias

- 1 CSN (2025). Instrucción IS-47, de 9 de abril de 2025, por la que se aprueba el listado de términos municipales de actuación prioritaria contra el radón y se establecen directrices para las mediciones de radón en el aire interior de los centros de trabajo ubicados en ellos. *BOE*, n. 105, pp. 59229-59235.
- 2 Organización Mundial de la Salud (2009). *Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública*.
- 3 Ministerio de Sanidad (2021). *Mortalidad atribuible a la exposición a radón residencial en España*. Colección Informes, estudios e investigación.
- 4 Martín-Gisbert, L.; Candal-Pedreira, C.; García-Talavera, M.; Pérez-Ríos, M., Barros-Dios, J.; Varela-Lema, L. y Ruano-Ravina, A. (2023). Radon exposure and its influencing factors across 3,140 workplaces in Spain. *Environ Res.* 15; 239 (Pt 2):117305. doi: 10.1016/j.envres.2023.117305.
- 5 Dirección General de Agenda Urbana y Arquitectura (2020). *Guía de Rehabilitación frente al Radón*. Centro de Publicaciones del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.
- 6 Ministerio de Sanidad (2024). Plan Nacional contra el Radón. Aprobado por Resolución del Consejo de Ministros el 9 de enero de 2024. Centro de Publicaciones del Ministerio de Sanidad. ■

El arte de habitar el mundo

Viaje por los espacios que definen al ser humano



El empleo de la éntasis es una de las particularidades del Partenón de Atenas y de muchos otros templos de la Antigua Grecia

Desde el albor de los tiempos, el ser humano ha necesitado dos cosas básicas para sobrevivir: alimento y refugio. Consiguió lo primero, mal que bien, mediante la recolección, la caza y, más adelante, el cultivo; lo segundo ha evolucionado hasta convertirse en un ejercicio de virtuosismo técnico y diseño.

■ Texto: Isabel Alonso

Paleolítico superior. Tras machacar hematitas y óxido de hierro, uno de los primeros humanos de la cueva de Altamira se dispone a pintar bisontes sobre las paredes de lo que se ha convertido en el lugar que habita. A partir de entonces, el vínculo entre ciencia,

arte y arquitectura se ha perpetuado y desarrollado en todos los rincones del planeta.

Habitar implica transformar el entorno, adecuarlo a unas necesidades. Las primeras comunidades sedentarias, establecidas en lugares fijos donde cultivar la tierra,

comenzaron a construir sus propios refugios con los materiales con los que contaban en cada zona. Se levantaron casas, almacenes, talleres y comercios, pero también plazas, templos y edificios civiles donde las sociedades plasmaron su conocimiento.



Cúpula del Panteón de Roma, ejemplo de virtuosismo técnico y arquitectura imperial romana

Cúpulas, matemáticas y geometría

«Todas las cosas son números» afirmaban los pitagóricos, y la arquitectura no está exenta de estas representaciones. El templo más famoso de la antigua Grecia, el Partenón de Atenas, se construyó siguiendo proporciones pitagóricas, pero tiene una particularidad: la éntasis. Preocupados por la perspectiva –y la estética–, diseñaron columnas más anchas en el centro o en la mitad inferior que en los extremos y no las colocaron de manera equidistante, de modo que contrarrestaran la ilusión óptica que haría parecer que no están pa-

ralelas o rectas, en especial cuando se observan desde cerca.

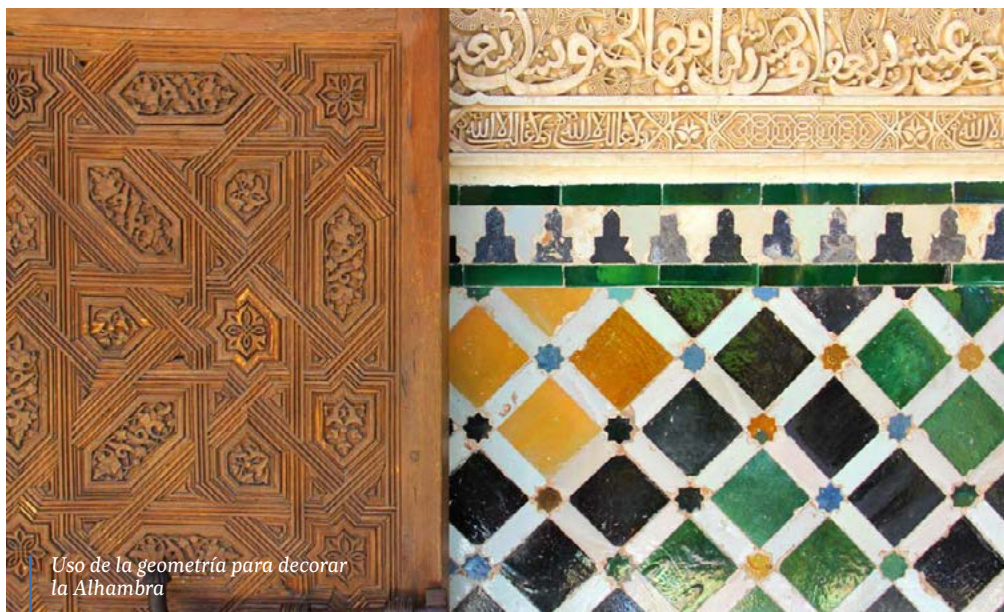
Más adelante, en el mundo romano, las matemáticas y la geometría seguirían muy presentes en sus grandes obras. Uno de los ejemplos más singulares es el Panteón de Agripa, en pleno centro de Roma, que conserva una de las cúpulas más famosas de la historia. Se trata de una semiesfera apoyada sobre un cilindro de ladrillos y hormigón romano. Sin contrafuertes, los muros soportan cinco mil toneladas gracias a un sistema de arcos y de siete ábsides interiores que permiten distribuir el peso hasta el suelo. Para aligerar la estructura, la cú-

pula se construyó con un total de veintiocho casetones colocados en cinco filas concéntricas. La cifra tampoco es casualidad: el veintiocho se consideraba perfecto, resultado de la suma de los primeros números naturales. También se tomaron otras medidas pensando en los números –y el peso–: la grava del hormigón de la cúpula es piedra pómez, mucho más ligera que el travertino de otros grandes edificios; el espesor del muro disminuye a medida que aumenta la altura y el óculo que la corona está orientado de forma que, el 21 de abril, día del natal de Roma según la tradición, el haz de luz que se cuela por él ilumina la monumental entrada.



La arquitectura es reflejo de la ciencia de cada época

No obstante, la geometría son más que cúpulas. Presente en edificios tan emblemáticos como la Alhambra, no solo sirve para construir –como en la fachada del palacio de Comares, donde se usan rectángulos áureos–, sino también para decorar, como es el caso de los alicatados, las yeserías o las maderas ornamentadas. En geometría, existe un total de diecisiete grupos cristalográficos planos, dependiendo de las simetrías que rigen sus patrones y que surgen por la transformación isométrica del plano: la Alhambra es el único edificio antiguo que tiene ejemplos de todos los grupos. Uno de los modelos más característicos es el de las «pajaritas»: un triángulo equilátero transformado. Al unir seis por el mismo vértice se forma un hexágono que se puede repetir de forma infinita. Lo mismo ocurre con otros elementos, como los «pétalos», que surgen de rombos, o los «huesos», que se originan a partir de cuadrados.



Uso de la geometría para decorar la Alhambra

Los materiales también son importantes. De su elección dependen las características de los edificios. Sin hormigón romano no existiría el Coliseo; sin acero no serían posibles los rascacielos y, sin ladrillo, uno de los desafíos técnicos más célebres de Florencia –la cúpula de Santa María del Fiore– no podría deslumbrar con su belleza. Sin embargo, no solo sus propiedades físicas son esenciales, sino que también dan pistas de la intención comunicativa y del mensaje

que se pretendía transmitir con su utilización.

Sociedades, narrativas y arquitectura

«La arquitectura, más que cualquier otra disciplina, es como un espejo –más o menos fiel, más o menos distorsionado– de una sociedad», explica Pedro Torrijos, arquitecto y divulgador. A pesar de que las obras arquitectónicas son el resultado, entre otros, de una serie de cálculos, «involucran algo más que pura lógica técnica: es casi como tratar



Santa María del Fiore



Sainte Chapelle (Paris)

Geometría sagrada

En la Edad Media, el deseo de materializar el cielo en la Tierra llevó a crear la «casa de Dios», la catedral. «Puesto que la creación del universo realizada por Dios era perfecta, el hombre se afanó en aplicar todos sus conocimientos para erigir esta edificación y no dudó en conjugar hábilmente todas las ciencias. De este modo, la arquitectura, la geometría y las matemáticas fueron esenciales para idear y confeccionar las proporciones, los cálculos *Ad Quadratum* y *Ad Triangulum*, las medidas áureas, los patrones o los simbolismos numéricos», explica María Pilar Alonso Abad, investigadora y catedrática de Historia del Arte de la Universidad de Burgos. Para alcanzar las alturas presentes en las catedrales góticas y concebir un edificio de estas características, era imprescindible conocer muy bien las propiedades de los materiales, las técnicas de ejecución y las condiciones de conservación, además de los lenguajes artísticos, la teología y las ciencias relacionadas con la manifestación artística, por lo que «la cualificación profesional de los profesionales especializados era un requisito indispensable para garantizar la calidad de la obra. Su formación la procuraban los gremios: transmi-

tían los secretos del oficio, con una normativa y, en los talleres, donde paulatinamente el profesional aprendía cada una de las tareas de la creación de la obra artística, consultaba tratados, manuales y bocetos, copiaba del natural o de maestros, realizaba ciertas labores de las obras y demostraba haber asimilado todo a la perfección», añade Alonso Abad.

Bóvedas de crucería, arbotantes, rosetones, pináculos, ajimeces, arcos ojivales y chapiteles son algunos de los elementos conjugados para crear estos edificios singulares. Recogidas en tratados, las reglas y geometrías que los diversos maestros aplicaban han llegado, en muchos casos, hasta la actualidad. La proporción era esencial para establecer un sistema de fuerzas internas compresivas que permitieran transferir las cargas de forma correcta, sin que la altura o dimensiones del edificio comprometieran su estructura. Esas cargas ya no reposaban en muros, sino que se transmitían por los nervios de las bóvedas a los pilares, arbotantes y contrafuertes, que contrarrestaban los empujes ayudados por los pináculos.

De este modo, en los muros podían abrirse grandes vanos en los que colocar uno de los elementos que más

destaca en las catedrales de este periodo, también fruto de la combinación de la ciencia –en especial, la química– y el arte: las vidrieras. Formado por una mezcla de arena de sílice, carbonato sódico y caliza calentada hasta superar los mil doscientos grados, el vidrio se coloreaba y, cuando se pintaba sobre él, los pigmentos se fijaban volviendo a calentarlo hasta los seiscientos grados. Después, cada una de las piezas se unía con tiras de plomo. «La vidriera es un arte del fuego. En su creación y su conservación intervienen múltiples factores y agentes, de los que son fundamentales los artistas vidrieros, la calidad del material –especialmente el vidrio y el plomo–, la ubicación del ventanal además de la cantidad e intensidad de condiciones y de elementos degradantes que puedan provocar daños». En este sentido, la ciencia también está muy presente en la preservación del patrimonio. «Las nuevas tecnologías están revolucionando el conocimiento y la intervención en casi todos los materiales con métodos efectivos, respetuosos y sostenibles. Son esenciales para la conservación y la restauración», afirma Alonso Abad. ■



Catedral de Santa
María del Fiore
(Florencia)



El desafío de Vitruvio

«No puede hablarse de una obra [arquitectónica] bien realizada si no existe esta relación de proporción, regulada como lo está el cuerpo de un hombre bien formado», escribía Marco Vitruvio Polión a finales del siglo I a. C. en su tratado *De Architectura*. Arquitecto de Julio César, consideraba que las proporciones de los edificios –en especial de los templos– debían seguir las del ser humano, el elemento más perfecto de la naturaleza. Para ello, la geometría era primordial, en particular dos figuras: el cuadrado, símbolo de lo terrenal, y el círculo, representación de lo divino. Según esta lógica, situada bocarriba y con los brazos extendidos, una figura humana bien proporcionada debía ser capaz de tocar los bordes de una circunferencia cuyo centro se encuentra en su ombligo, pero también los de un cuadrado. Durante siglos, esta representación supuso un desafío, ya que para lograr que todo encajara había que sacrificar la proporción de alguno de los elementos. Sin embargo, a finales del siglo XV, Leonardo da Vinci dio con la clave. No era necesario que el círculo y el cuadrado compartieran el mismo centro: bastaba con desplazar ligeramente el cuadrado hacia abajo. Así, todas las proporciones encajaban. Acababa de nacer el hombre de Vitruvio. ■



“ La arquitectura, más que cualquier otra disciplina, es como un espejo –más o menos fiel, más o menos distorsionado– de una sociedad

de equilibrar una balanza entre el intelecto y la intuición. Los cálculos y los materiales son fundamentales, pero hay una dimensión que escapa a la pura racionalidad, una especie de impulso humano que se manifiesta en la forma en que un edificio se siente», explica. Los edificios reflejan la visión del mundo –como se aprecia con claridad en las catedrales góticas– y los principios de la sociedad que los concibe. A pesar de que la forma cambia a lo largo de la historia, «los valores subyacentes –el deseo de pertenecer, de trascender, de marcar un lugar en el mundo– siguen siendo idénticos. Cada época trata de resolver los mismos dilemas: cómo vivir juntos, cómo crear un espacio que respire tanto la identidad colectiva como la individual», matiza Torrijos.

No obstante, la arquitectura no solo es el reflejo de una sociedad, sino que también condiciona a los individuos que viven en ella. Uno de los efectos más conocidos de hasta



Azadi Tower, símbolo de Teherán (Irán)



Museo Nacional de Qatar, inspirado en una rosa del desierto

qué punto la belleza de los edificios y el arte pueden influir en el ser humano es el síndrome de Stendhal, que causa taquicardias, mareos y sudores. Descrito por primera vez por Henri Beyle –Stendhal– mientras visitaba Florencia, es un buen ejemplo de cómo la arquitectura afecta a quienes la contemplan. Sin embargo, este no es el único caso: hay otros que se nutren de vivencias negativas, como ocurre en el síndrome de París, en el que la idealización de la ciudad, al confrontarse con la realidad, puede causar una profunda desilusión, acompañada de alucinaciones y ansiedad. También las *cités* HLM, «esos complejos habitacionales de la periferia francesa, muestran cómo el vacío y la despersonalización de los espacios pueden generar alienación y angustia. Es una paradoja fascinante: la arquitectura tiene el poder de elevarnos o de hacernos sentir pequeños y desorientados. Las formas y el diseño, más allá de lo estético, tienen un impacto directo en nuestra psique y

en nuestra capacidad para interactuar con el entorno», añade Torrijos.

También la arquitectura es reflejo de la ciencia de cada época. Desde el uso de nuevos materiales hasta el empleo de formas y estructuras que se basan en conocimientos modernos, esta disciplina se apoya en la ciencia para evolucionar. Para Torrijos, así se abre la puerta a un futuro donde las construcciones redefinan su función, con «edificios que generen su propia energía o materiales que se adapten al clima y que puedan cambiar de forma según las estaciones. La ciencia no solo permitirá mejorar la eficiencia, sino que también ampliará nuestra comprensión del espacio, llevándonos a un lugar donde la arquitectura sea más inteligente, más integrada e, idealmente, más humana».

Entre los lugares en los que las disciplinas científicas y la arquitectura se entrelazan de maneras sorprendentes hay algunos que son un verdadero acto de ciencia

«La forma cambia a lo largo de la historia, pero los valores subyacentes siguen siendo idénticos»

aplicada, como «el observatorio ALMA en el desierto de Atacama o la Estación Espacial Internacional, donde los límites entre ciencia, ingeniería y arquitectura se diluyen», destaca Torrijos. «Estos lugares no solo son el resultado de la ciencia, sino que son espacios que invitan a la reflexión, que nos enfrentan a lo desconocido y nos plantean nuevas preguntas sobre nuestro lugar en el universo. Son puntos de encuentro entre lo tangible y lo intangible, donde la ciencia y la cultura se nutren mutuamente. Esta reciprocidad y retroalimentación es algo que, en realidad, se ha producido desde siempre, pero que se diría que hemos olvidado en el último siglo», concluye. ■



NUEVO PORTAL WEB DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA DEL CIEMAT

■ Texto: **Isabel Villanueva Delgado**, Subdirección de Protección Radiológica Operacional (CSN)

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) han puesto en marcha un nuevo proyecto que prevé la actualización del material docente de los cursos para la obtención de licencias y acreditaciones que permitan operar en instalaciones radiactivas y de radiodiagnóstico.

El objetivo es ofrecer un nuevo **Portal Educativo de Protección Radiológica** moderno y accesible, con contenidos formativos actualizados, de alta calidad, gratuitos y en castellano, para facilitar un mejor desempeño a los profesionales que desarrollan sus actividades en instalaciones radiactivas o de rayos X con fines de diagnóstico médico.



Las acreditaciones y licencias tienen carácter individual y son concedidas por el CSN para validar y reconocer la capacitación en materia de seguridad y protección radiológica.

EL PROYECTO INCLUYE

PORTAL EDUCATIVO

de protección
radiológica



MATERIALES DIDÁCTICOS

de dieciocho cursos

PREGUNTAS FRECUENTES



Sistema de AUTOEVALUACIONES



BUZÓN DE CONTACTO

con los usuarios

formacioncsn@ciemat.es



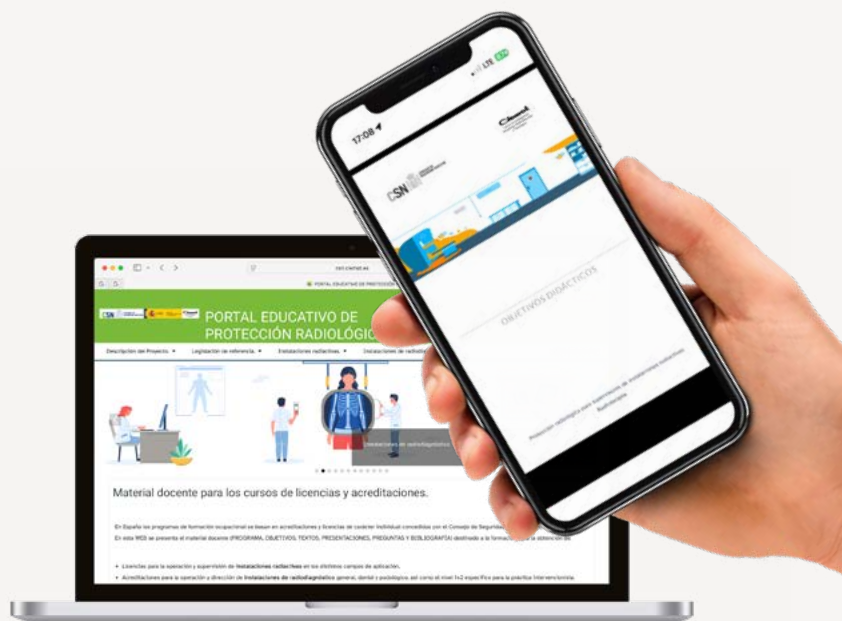
PORTAL EDUCATIVO DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

- Fue puesto en marcha en mayo de 2024.
- Mejora la usabilidad y la accesibilidad con una interfaz intuitiva y de fácil navegación.



OBJETIVOS

- Facilitar a los trabajadores de radiodiagnóstico médico las instalaciones radiactivas y de radiodiagnóstico formación en materia de seguridad y protección radiológica adecuada a su nivel de responsabilidad.
- Armonizar los programas de formación impartidos en las diferentes organizaciones homologadas, a través de nuevas tecnologías.
- Favorecer la cooperación y el intercambio de información entre los países de habla hispana en el campo de la formación de los profesionales sobre seguridad y protección de los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes.



CONTENIDO

Materiales didácticos puestos a disposición de la ciudadanía de forma gratuita:



Instalaciones radiactivas (diez cursos): cada uno consta de un módulo básico más un campo de aplicación.

- Cinco cursos de PR para operadores de instalaciones radiactivas en medicina nuclear, fuentes no encapsuladas, radioterapia, radiografía industrial y control de procesos y técnicas analíticas.
- Cinco cursos de PR para supervisores de instalaciones radiactivas en medicina nuclear, fuentes no encapsuladas, radioterapia, radiografía industrial y control de procesos y técnicas analíticas.



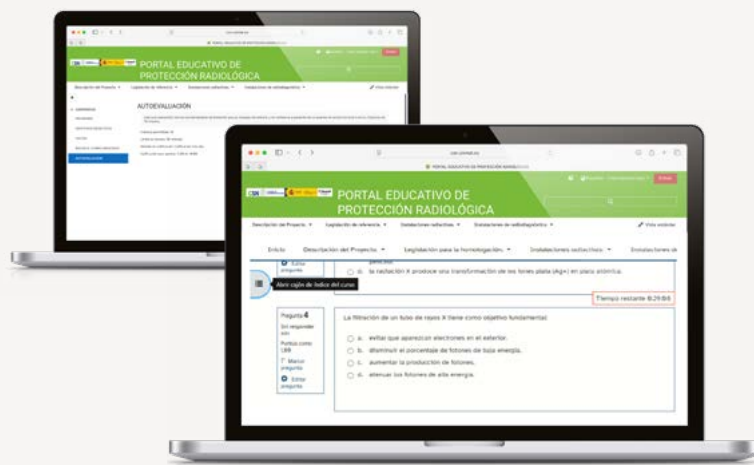
Instalación de rayos X de diagnóstico médico (ocho cursos):

- Tres cursos de PR para operar las instalaciones de rayos X con fines diagnósticos en las especialidades: general, podología y dental.
- Tres cursos de PR para dirigir las instalaciones de rayos X con fines diagnósticos en las especialidades: general, podología y dental.
- Curso de PR en radiología intervencionista: niveles 1 y 2.
- Curso de Técnico Experto en Protección Radiológica para instalaciones de radiodiagnóstico médico.



NOVEDADES

- Recoge una actualización de los materiales docentes a la luz de los cambios normativos más significativos producidos en los últimos años.
- Incluye herramientas de autoevaluación online, que permite a los usuarios medir su progreso y recibir retroalimentación inmediata.
- Promueve el autoaprendizaje y permite identificar las áreas en las que al alumno precisa poner una mayor atención.
- Amplía significativamente la base de datos de preguntas tipo test.



Exposición a radiación ionizante en anfibios: evaluación de marcos internacionales de protección radiológica

Germán Orizaola¹ y Pablo Burraco²

¹Área de Zoología, Departamento de Biología de Organismos y Sistemas (Universidad de Oviedo). IMIB-Instituto Mixto de Investigación en Biodiversidad (Universidad de Oviedo-CSIC-Principado de Asturias). ²Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC)

Uno de los pilares fundamentales de la regulación internacional referente a protección radiológica del medioambiente es el concepto de «Animales y Plantas de Referencia» (*Reference Animals and Plants-RAP*) desarrollado por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (*International Commission on Radiological Protection-ICRP* (ICRP 2008)). Los RAP son organismos consenso, definidos a nivel taxonómico de familia y modelados a partir de parámetros morfológicos y de historia de vida. Para cada uno de estos organismos modelo, partiendo de resultados obtenidos en estudios previos de exposición radiológica, se han establecido unos niveles de referencia de exposición a la radiación denominados *Derived Consideration Reference Levels* (DCRL). Los DCRL se definen como una banda de dosis, que abarca un orden de magnitud, dentro de la cual se espera que empiecen a detectarse efectos deletéreos generados por la exposición a radiación ionizante. Dentro de los organismos RAPD, se definió un anfibio modelo, *reference frog*, con una banda DCRL situada entre 40-400 $\mu\text{Gy/h}$.

Los anfibios representan un caso claro de la complejidad a la hora de analizar en detalle los efectos de la exposición a radiación a lo largo de todo el ciclo de vida de un organismo. El ciclo de vida básico de un anfibio incluye unas fases embrionarias (i.e. desarrollo de huevos) y larvarias (i.e. renacuajos) desarrolladas en el medio acuático y unas etapas de vida juvenil y adulta en el medio terrestre. Por tanto, una adecuada evaluación del efecto de la exposición a radiación ionizante sobre un anfibio modelo debería incluir los efectos a lo largo de todos los estadios del ciclo y todos



Larvas recién eclosionadas de *Xenopus laevis* durante el experimento de exposición crónica a radiación de intensidad media-baja en el laboratorio de radiación ambiental de la Universidad de Stirling (Reino Unido).

los ambientes, lo que implica una alta complejidad experimental. El proyecto «Exposición a radiación ionizante en anfibios: evaluación de marcos internacionales de protección radiológica», financiado por el CSN en la convocatoria de I+D+i de 2021, tuvo como objetivo general evaluar la adecuación de las bandas de protección radiológica DCRL para anfibios, considerando especialmente los estadios iniciales del ciclo de vida (embriones y larvas), en principio más susceptibles a radiación. Para ello, realizamos una aproximación experimental, considerando dos escenarios: a) exposición crónica a radiación de intensidad media-baja (similar a la encontrada en la actualidad en nuestros trabajos de campo en Chernobyl); b) exposición aguda a radiación (simulando un escenario de accidente grave).

Exposición crónica a radiación de intensidad media-baja

Con el objetivo de examinar los efectos de la exposición crónica a radiación de intensidad media-baja sobre el desarrollo embrionario de anfibios, realizamos un experimento en el Laboratorio de Radioecología de la Universidad de Stirling (Reino Unido), usando como especie modelo a la rana de uñas africa-

na (*Xenopus laevis*). El experimento utilizó las instalaciones del laboratorio, exponiendo durante todo el periodo de desarrollo embrionario a individuos de la especie a seis niveles de radiación: 1000, 400, 200, 40, 10 $\mu\text{Gy/h}$, y un tratamiento control (ca. 0.2 $\mu\text{Gy/h}$, equivalente a radiación de fondo), incluyendo por tanto valores dentro, por encima y por debajo de la banda DCRL.

Este trabajo reveló que la supervivencia embrionaria se redujo de manera significativa a partir de una tasa de 200 $\mu\text{Gy/h}$, pero no detectamos diferencias entre tratamientos control y 10 o 40 $\mu\text{Gy/h}$. Estos resultados reforzarían la utilidad de la banda DCRL incluso en embriones, al menos en lo que se refiere a supervivencia. La exposición crónica a radiación, por contra, no afectó al tamaño total de las larvas en el momento del muestreo (medidas dos días después de la eclosión). El tamaño de las larvas se mantuvo constante a lo largo de los diversos niveles de radiación. En la actualidad, estamos examinando la variación de diferentes parámetros fisiológicos (por ejemplo, marcadores de estrés oxidativo y envejecimiento principalmente) a lo largo del gradiente de radiación, así como cambios en la expresión génica inducidos por la exposición a

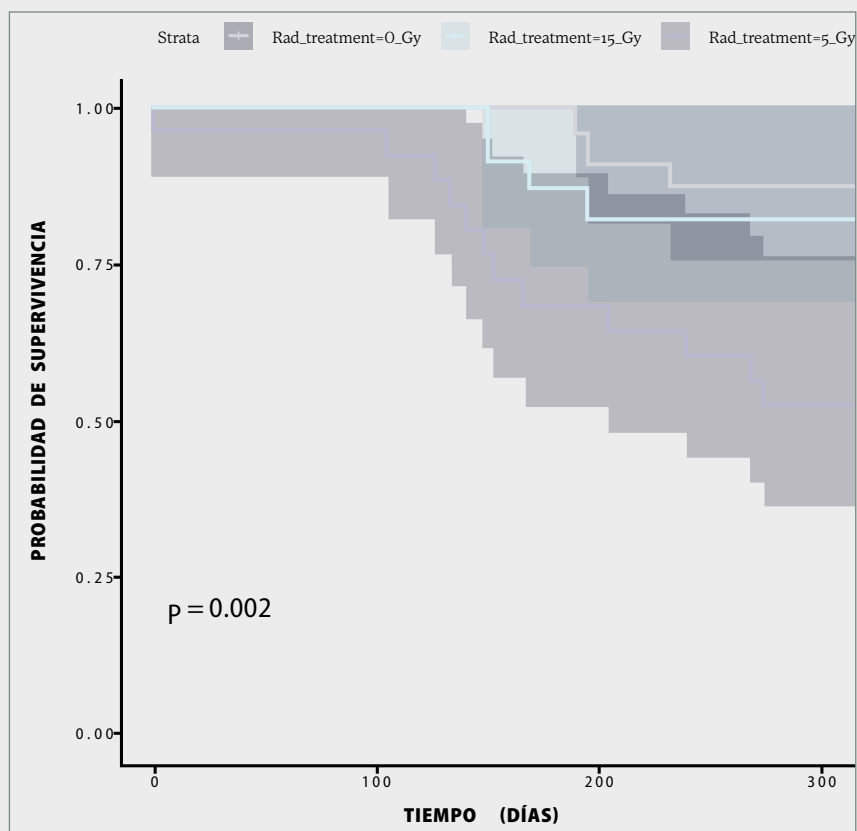
radiación durante el desarrollo embrionario. De esta forma, tendremos una visión más completa de los efectos no letales de la exposición crónica a radiación durante el desarrollo embrionario de anfibios.

Exposición a radiación aguda

En un segundo experimento, examinamos el efecto a medio y largo plazo de la exposición aguda a radiación ionizante durante el periodo larvario y juvenil de anfibios, usando al sapo de espuelas (*Pelobates cultripes*) como modelo de estudio. La exposición a radiación la realizamos utilizando un irradiador de cobalto-60 en el RADLAB del Centro Nacional de Aceleradores (Universidad de Sevilla-CSIC-Junta de Andalucía), y el mantenimiento de los ejemplares lo realizamos en los laboratorios de la Estación Biológica de Doñana (EBD-CSIC) en Sevilla.

En este experimento, utilizando una intensidad de radiación gamma de 3,33 Gy/h, dispusimos de tres tratamientos: control, exposición a 5 Gy, exposición a 15 Gy. La mitad de los individuos experimentales fueron expuestos durante la fase larvaria y la otra mitad una vez completada la metamorfosis y ya en fase juvenil. Mantuvimos a los ejemplares en condiciones controladas durante un total de 15 meses para observar posibles efectos a medio-largo plazo de la exposición a radiación.

La exposición a radiación aguda durante la fase larvaria no alteró la tasa de crecimiento de los individuos en el corto plazo, medida diez días después de la exposición. En cambio, sí redujo su supervivencia,



Dinámica de supervivencia de individuos de *Pelobates cultripes* expuestos a radiación aguda como larvas, hasta la finalización del experimento en junio 2024.

aunque solo en el tratamiento de exposición a 15 Gy. Un aspecto interesante fue que la reducción de la supervivencia en exposiciones de 15 Gy no empezó a detectarse hasta unos tres meses después de la exposición a radiación. No observamos ningún efecto de la exposición aguda a radiación sobre la supervivencia cuando la exposición a radiación ocurrió durante la fase juvenil. En la actualidad, continuamos examinando diversos parámetros fisio-

lógicos y moleculares adicionales indicadores de posibles efectos de la exposición a radiación aguda sobre los individuos experimentales.

Los resultados de este proyecto reflejan la importancia de considerar diferentes fases del ciclo de vida de un organismo a la hora de examinar los efectos de la exposición a radiación ionizante en organismos vivos, y la necesidad de examinar no solo efectos inmediatos, a corto plazo, sino de realizar experimentos de larga duración que permitan examinar posibles efectos a medio-largo plazo de la exposición a radiación. La realización de estos estudios aporta una valiosa información para ajustar con precisión los niveles de riesgo radiológico. Idealmente, estos experimentos deberían examinar el efecto de la exposición a radiación a lo largo de diferentes generaciones y combinar los efectos de la exposición a radiación con otros factores de estrés ambiental, para obtener una información más completa y realista que permita refinar los protocolos de protección radiológica del medioambiente. ■



Desarrollo del experimento de irradiación durante el estadio larvario de *Pelobates cultripes* en el laboratorio de irradiación (RADLAB) del Centro Nacional de Aceleradores (Universidad de Sevilla-CSIC-Junta de Andalucía).



Vista aérea de la ICTS Observatorio Astrofísico de Javalambre

Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón

Javalambre: Observatorio Astrofísico para cartografiados de gran escala del universo

■ Texto: Luisa Valdivielso Casas | Fotos: CEFCA/Galáctica

El Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón es el primer y único instituto de investigación en astrofísica de la región. Participado por el Gobierno de Aragón y el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, su misión principal ha sido la definición, construcción y, ahora, operación y explotación científica del Observatorio Astrofísico de Javalambre.

El Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA) es un instituto de investigación en astrofísica del Gobierno aragonés, fundado en 2008, con el objetivo de definir, construir, operar y explotar científicamente el Observatorio As-

trofísico de Javalambre (OAJ). Esta infraestructura astronómica está ubicada en el Pico del Buitre, a 1957 m de altitud, en la provincia de Teruel. Desde 2014, pertenece al mapa español de Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares (ICTS).

Cartografiados de gran escala

El Observatorio está equipado con dos telescopios principales con gran campo de visión y calidad de imagen limitada por el *seeing* en todo el campo: el *Javalambre Auxiliary Survey Telescope* (JAST80),



con un espejo principal de 0,8 m de diámetro, y el *Javalambre Survey Telescope* (JST250) de 2,5 m. Ambos están dotados con instrumentación panorámica que incorpora conjuntos de filtros ópticos únicos en el mundo.

El instrumento principal del telescopio JAST80 es T8oCam. Se trata de una cámara con un campo de visión efectivo de 2° , instalada en el foco Cassegrain del telescopio, que integra un conjunto de doce filtros, cinco anchos (*ugriz*) y siete intermedios, localizados en longitudes de onda relevantes para la física estelar, el estudio de galaxias cercanas con resolución o la detección de objetos extremos a lo largo de la historia del universo.

Por su parte, el JST250 dispone de una cámara científica de 1,2 Gpixel denominada JPCam. Con un mosaico de catorce detectores CCD de gran formato y un campo de visión de $4,1^{\circ}$, es hoy una de las cámaras astronómicas más grandes del mundo. Ha sido diseñada para maximizar tanto el campo de visión como el rango espectral cubierto, manteniendo una calidad de imagen en todo el plano focal y proporcionando imágenes de bajo

ruido de lectura. Dispone de un sistema de 54 filtros estrechos de 14,5 nm, más dos filtros anchos que cubren de forma continua el rango óptico del espectro electromagnético, desde 350 hasta 1050 nm, proporcionando así un espectro de baja resolución de cada pixel del cielo observado.

El CEFCA cuenta con otra gran infraestructura dedicada a almacenar, procesar, gestionar y calibrar científicamente el enorme volumen de datos recopilado por ambos telescopios, que también forma parte de la ICTS. Se trata de la Unidad de Procesado y Archivo de Datos (UPAD), con ~5PB de capacidad de almacenamiento. Las imágenes y catálogos del OAJ se encuentran a disposición de la comunidad a través de bases de datos científicas alojadas en los portales de acceso web del CEFCA, bajo los principios FAIR (localizable, accesible, interoperable y reutilizable) y los estándares del Observatorio Virtual Internacional.

Además, el CEFCA dispone de una unidad de aluminizado de espejos de hasta 3 m de diámetro y de equipamiento de caracterización óptica y metrológica, y ofrece sus

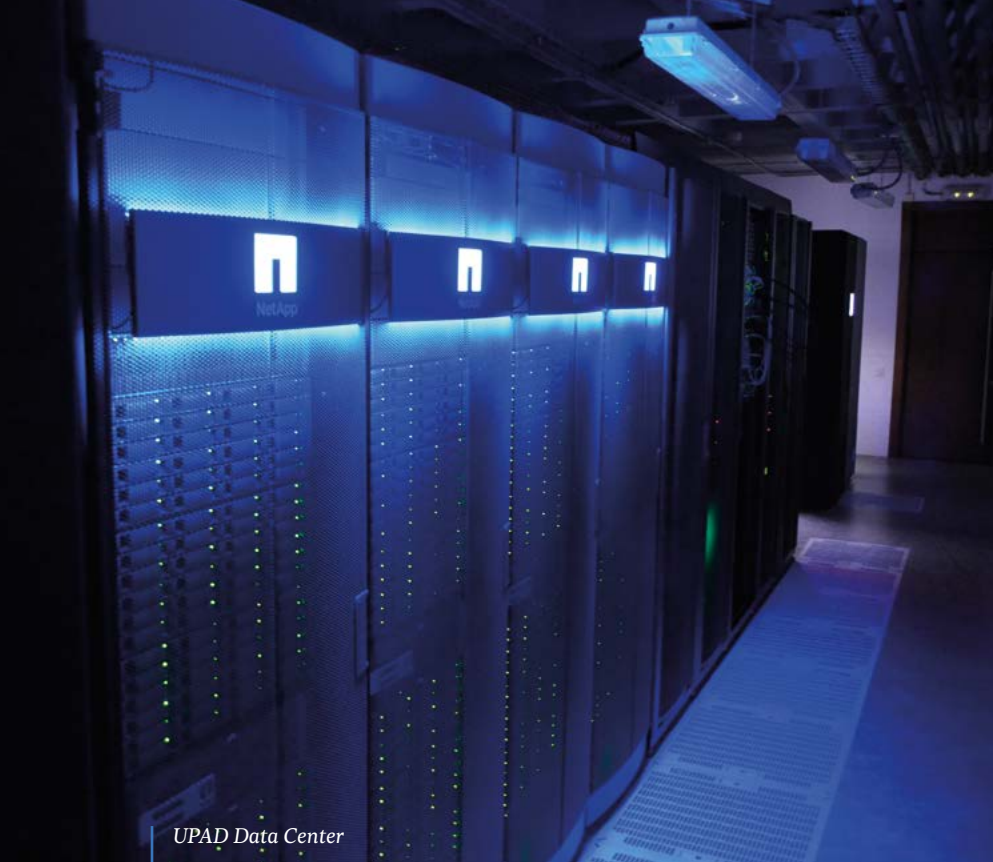


El CEFCA dispone de una unidad de aluminizado de espejos de hasta 3 m de diámetro y de equipamiento de caracterización óptica y metrológica

servicios a la comunidad científica y empresas del sector de I+D+i nacional e internacional.

Proyectos y colaboraciones

La excepcionalidad del OAJ radica en la instrumentación astronómica de vanguardia, diseñada especialmente para llevar a cabo cartografiados fotométricos a gran escala sin precedentes del universo en todo el rango espectral óptico, y con vocación de convertirse en proyectos de legado para toda la comunidad científica con la puesta a disposición pública de



UPAD Data Center



Vista general de Galáctica

todos los datos. Los grandes proyectos llevados a cabo actualmente desde el OAJ y que constituyen la materia prima para la actividad investigadora del CEFCA son:

- **J-PLUS:** *Javalambre Photometric Local Universe Survey* (<http://j-plus.es>). Es el primer gran cartografiado de T8oCam en el JAST80 y está observando miles de grados cuadrados del cielo. Los datos públicos más recientes (J-PLUS DR3) cubren más de 3000 grados cuadrados y contienen información para cuarenta millones de objetos. En este momento se han observado y están siendo procesados ya unos 5000 grados cuadrados que se publicarán a lo largo de 2025.
- **J-PAS:** *Javalambre Physics of the accelerating universe Astrophysical Survey* (<http://www.j-pas.org>). Iniciado en 2023, es el primer gran cartografiado estratégico de JPCam en el JST250, que proporcionará el estudio fotométrico 3D más preciso del universo hasta la fecha. Su objetivo es observar miles de grados cuadrados desde el hemisferio norte con el sistema de filtros de JPCam. Los datos de J-PAS proporcionan un espectro de baja resolución ($R \sim 50$) de millones de estrellas y galaxias. Esto permite llevar a cabo estudios punteros en todos los campos de

la astrofísica, desde los cuerpos menores del sistema solar hasta la cosmología, pasando por el estudio de estrellas de la Vía Láctea y la formación y evolución de las galaxias. La primera publicación de datos de J-PAS se realizó en noviembre de 2024, con unos 450 000 objetos catalogados, y ya se han observado cerca de 100 grados cuadrados.

- **J-VAR:** aprovechando las noches no fotométricas del OAJ, realiza once visitas en distintas épocas con siete filtros a campos previamente observados por J-PLUS. Con cadencia típica de una semana, J-VAR proporciona la dimensión temporal a los datos del OAJ, permitiendo obtener curvas de brillo de estrellas variables, detectar cuerpos menores del sistema solar y encontrar nuevos candidatos a Novae y Supernovae. Los primeros 200 grados cuadrados de J-VAR están disponibles de forma pública desde julio de 2024.

Estos proyectos generan catálogos públicos que, como los históricos SDSS o Gaia, servirán de referencia durante décadas.

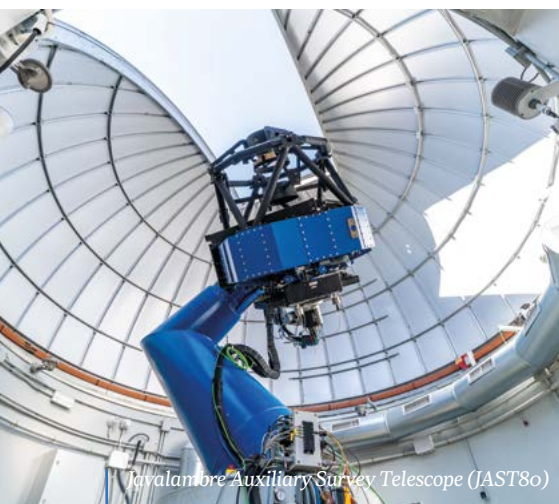
Además de estos cartografiados, existen otros proyectos realizados durante el tiempo abierto competitivo que el OAJ ofrece a la comunidad científica internacional por su



El CEFCA avanza con la mirada hacia el futuro, con el desarrollo de proyectos para implementar nuevas infraestructuras y telescopios en el OAJ

estatus como ICTS. Durante el periodo 2023-2027 se están llevando a cabo cuatro proyectos de legado de segunda generación con el JAST80, denominados mini-HAWK, J-ALFIN, MUDEHaR y North-Phase.

El CEFCA participa también en consorcios internacionales y mantiene acuerdos de colaboración con otros proyectos, como son la misión Euclid de la ESA, el proyecto IAXO (International Axion Observatory) y WEAVE (WHT Enhanced Area Velocity Explorer). CEFCA es, además, miembro de la misión ARRAKIS, primera misión espacial liderada por España en el programa científico de la ESA, cuyo lanzamiento



Javalambre Auxiliary Survey Telescope (JAST80)

está previsto para 2030. Su objetivo es poner a prueba la concepción actual sobre la materia oscura, con la observación de un centenar de galaxias similares a la Vía Láctea, alcanzando brillos superficiales sin precedentes, suficientes para detectar las débiles colas de marea y los satélites de baja masa predichos por las teorías actuales.

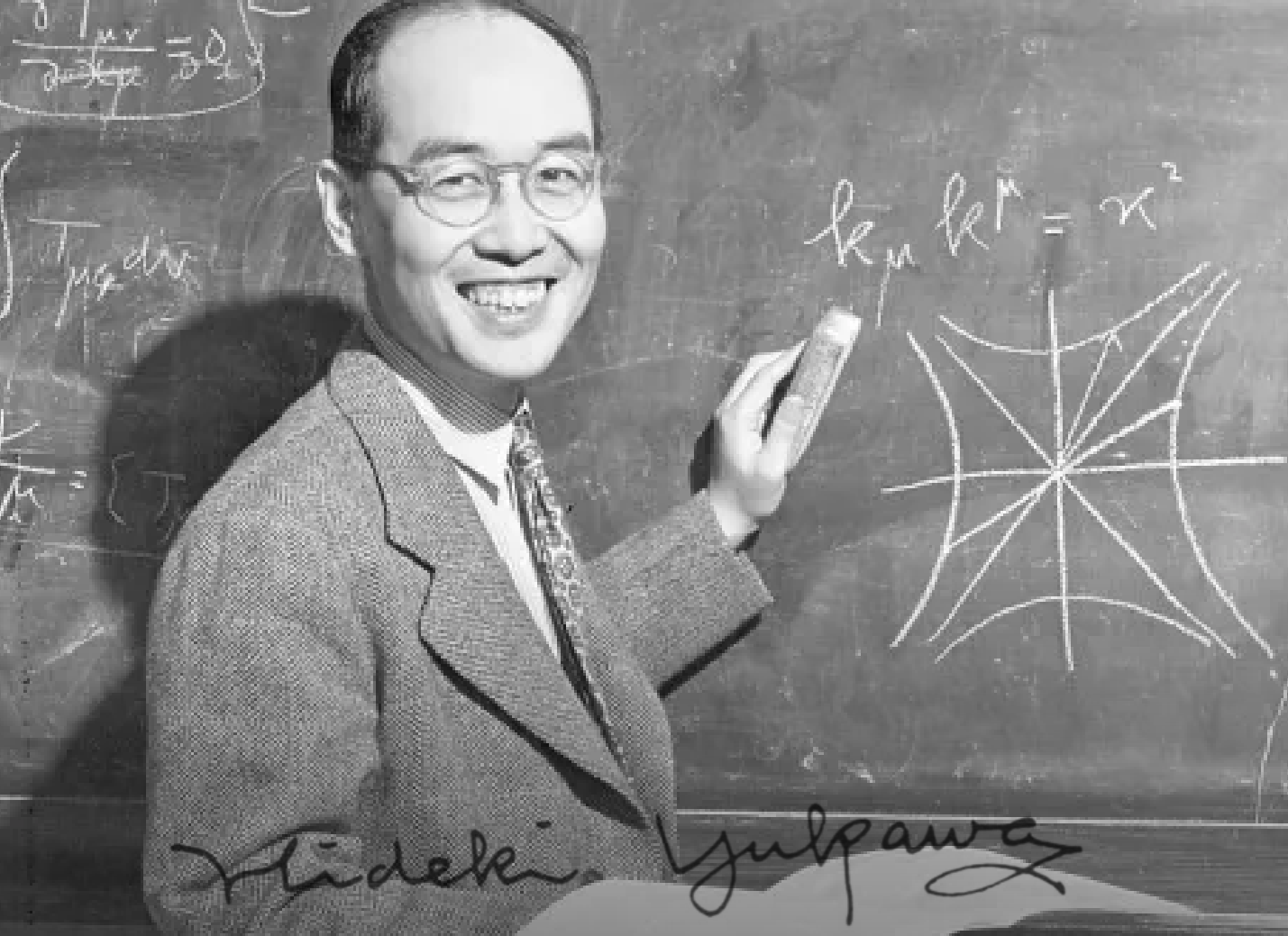
En el horizonte, el CEFGA avanza con la mirada hacia el futuro, con el desarrollo de proyectos para implementar nuevas infraestructuras y telescopios en el OAJ, destinados a la defensa planetaria y la definición de proyectos de legado de segunda generación para el JST250. ■



Bosque de cúpulas de Galáctica

GALÁCTICA: **astronomía para la sociedad**

Más allá de la investigación, el CEFGA es también el promotor de Galáctica. Este complejo, situado en la localidad de Arcos de las Salinas en Teruel, es actualmente el mayor centro de Europa para la divulgación y práctica de la astronomía. Inaugurado en abril de 2023, cuenta con un museo vanguardista e interactivo, una red de nueve cúpulas de observación y telescopios semiprofesionales accesibles al público. Este despliegue lo convierte en una instalación única para la educación, divulgación y proyectos de colaboración entre profesionales y aficionados (Pro-Am), en la que se desarrollan programas formativos para universidades de todo el mundo. ■



El profesor Hideki Yukawa, en su despacho de la Universidad de Columbia. Derecha, arriba, Yukawa reunido con Einstein en el Instituto de Estudios Avanzados de la Universidad de Princeton (1953) / Mainichi Shimbun / AFLO

Hideki Yukawa, arquitecto invisible de la fuerza nuclear

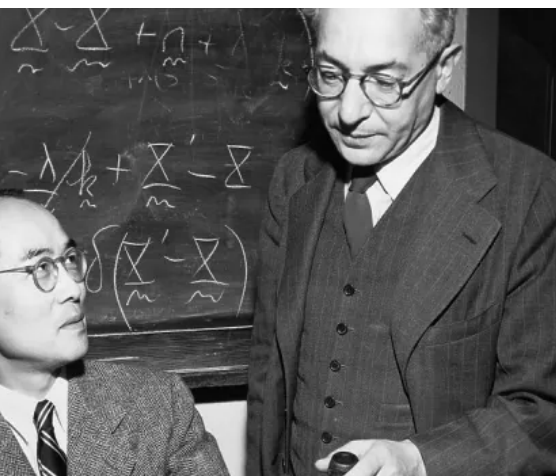
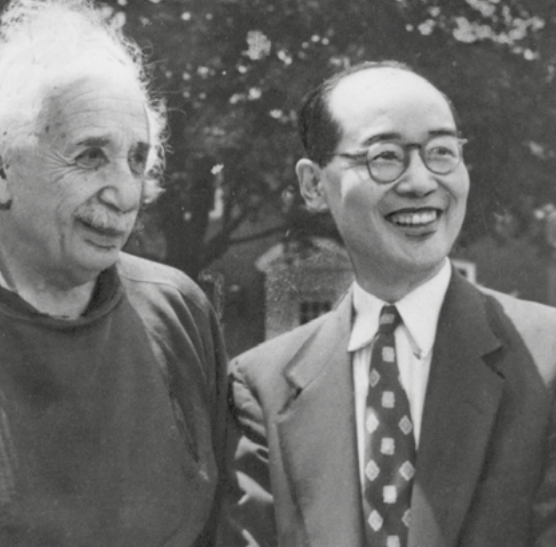
El físico japonés transformó la comprensión del núcleo atómico al predecir la existencia de los mesones, una hazaña que lo convirtió en el primer Nobel de Física de Japón y en un símbolo de la ciencia comprometida con la paz.

■ Texto: **Ana Xeoane**

Entre novelas filosóficas chinas, revistas populares y ecuaciones imposibles, un joven japonés descubrió que el mundo no siempre se comporta de forma continua. La física del siglo XX estaba en plena revo-

lución cuando Yukawa decidió sumarse a la conversación global desde una casa repleta de libros en Kioto. Con apenas diecisiete años, quedó fascinado por la mecánica cuántica, disciplina tan extraña como fascinante. Años después

postularía una idea que cambiaría para siempre la comprensión del núcleo atómico. Su teoría del mesón no solo puso a Japón en el mapa científico mundial, sino que lo convirtió en el primer Nobel de Física del país.



Yukawa, con el Premio Nobel de Física de 1944, el profesor I. Rabi



El príncipe heredero Gustavo Adolfo de Suecia entrega el Premio Nobel a Hideki Yukawa, el 10 de diciembre de 1949

Pasión por la lectura

Nacido en Tokio en 1907, Hideki Yukawa creció en un entorno profundamente influenciado por el saber. Cuando apenas tenía un año, su padre obtuvo una plaza como profesor de Geografía y Geología en la Universidad de Kioto. El traslado familiar marcaría el inicio de una vida impregnada por el aroma del conocimiento y la lectura. Su apellido era en realidad Ogawa, pero al casarse con Sumi Yukawa, adquirió el nombre con el que se haría famoso.

Desde una edad temprana, Yukawa mostró una curiosidad intelectual inusual. Antes incluso de ingresar a la escuela primaria, su abuelo le adentró en la lectura de los *Cuatro Libros* y los *Cinco Clásicos* del pensamiento chino. Aunque el método empleado –basado en la repetición memorística sin comprensión inmediata– era rígido, sentó las bases de su amor por los textos escritos.

El ambiente familiar reforzó esta inclinación, gracias al acceso libre a las revistas que su madre solía comprar para él y sus hermanos. La casa familiar estaba repleta de libros de todo tipo, fruto del interés ecléctico de su padre por la lectura. En ese espacio, Yukawa descubrió al filósofo chino Zhuangzi, cuya obra le acompañó durante toda su vida.

Durante la adolescencia, se sintió atraído por la historia occidental y la literatura extranjera, géneros que devoraba con pasión. Al mismo tiempo, comenzó a desarrollar una fascinación especial por la geometría. No era un estudiante brillante en términos convencionales, pero pronto destacó por su pensamiento lógico y abstracto.

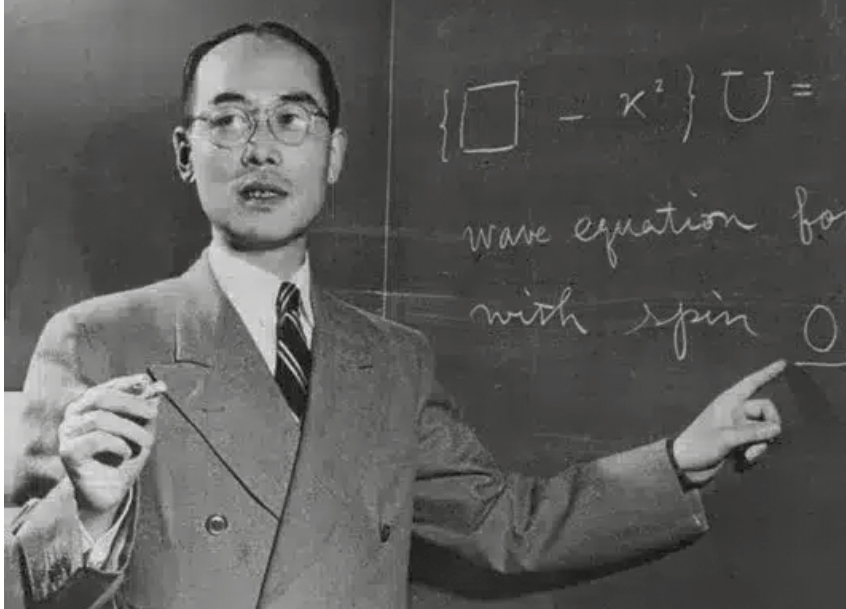
Al decantarse por el bachillerato de ciencias, comenzó a frecuentar la biblioteca con regularidad. Allí acarició los textos del filósofo Tanabe Hajime, en particular *Kagaku gaïron* (*Introducción a la ciencia*) y

Saikin no shizenkagaku (*Las ciencias naturales en la actualidad*), y creció su interés por la física.

Revolución cuántica y legado científico

A comienzos del siglo XX, importantes descubrimientos transformaron los cimientos de la física. En 1900, se introdujo la teoría de la discontinuidad cuántica, idea revolucionaria que proponía que la energía emitida por la luz no se distribuye de forma continua, sino en unidades discretas. Cinco años más tarde, Albert Einstein demostraría que la luz poseía una dualidad –partículas además de ondas– y presentaría al mundo su teoría de la relatividad, desafiando los principios clásicos que hasta entonces habían gobernado la ciencia.

En aquel contexto de ebullición científica crecía el interés científico de Yukawa. En 1924, siendo aún estudiante de segundo curso de bachillerato, descubre *Die Quanten-*



La ecuación de Yukawa

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-\mu r}}{r}$$

En 1934, el físico japonés formuló una ecuación fundamental para explicar cómo los protones y neutrones –partículas que forman el núcleo atómico– permanecen unidos a pesar de la repulsión electromagnética que debería separar a los protones, ambos con carga positiva. Su propuesta fue la primera teoría cuantitativa de la fuerza nuclear fuerte, uno de los cuatro pilares de las interacciones fundamentales de la naturaleza.

Yukawa postuló que esta fuerza no era directa ni instantánea, sino que se mediaba mediante el intercambio de una partícula intermedia a la que más tarde se llamaría mesón. Se trata de una extensión conceptual del intercambio de fotones en el electromagnetismo, pero con una diferencia clave: el mesón tiene masa y, por tanto, la fuerza que genera tiene alcance limitado.

La ecuación que describe el potencial de interacción entre nucleones (protones y neutrones) propuesto por Yukawa es:

Donde:

- $V(r)$ es el potencial de interacción a una distancia r ,
- g es una constante de acoplamiento (relacionada con la intensidad de la interacción),
- μ está relacionada con la masa del mesón intercambiado,

- $e^{-\mu r}$ indica que la fuerza decrece exponencialmente con la distancia.

Significado físico

La ecuación describe una fuerza atractiva de corto alcance (unos pocos fermis o fentómetros, mil billonésimas partes de un metro), coherente con las dimensiones del núcleo atómico. A diferencia de la fuerza gravitatoria o electromagnética, que disminuyen con la distancia, pero se extienden infinitamente, la interacción de Yukawa se extingue rápidamente más allá del tamaño del núcleo.

Impacto científico

La teoría fue revolucionaria: predijo la existencia del mesón antes de que fuera observado experimentalmente. En 1937, se detectaron partículas en rayos cósmicos con una masa intermedia entre la del electrón y el protón, compatibles con la predicción. Aunque inicialmente hubo confusión con otras partículas (como los muones), en 1947 los mesones pi (piones) fueron identificados como los verdaderos mediadores de la fuerza nuclear fuerte a nivel nuclear. Por esta contribución fundamental, Yukawa recibió el Premio Nobel de Física en 1949, convirtiéndose en el primer galardonado japonés. ■



theorie (la teoría cuántica) de Fitz Reiche. El impacto fue inmediato y profundo. «Es más emocionante que cualquier novela que haya leído jamás», declaró años más tarde. Este despertar intelectual le lleva, en 1926, a ingresar sin titubeos en la Facultad de Física de la Universidad de Kioto, donde comenzó a especializarse en física teórica y a estudiar con fervor la teoría cuántica a través de textos importados de Europa.

Tras graduarse en 1929, Yukawa emprendió una carrera investigadora marcada por la ambición y la soledad. Con pocos referentes a los que acudir, se propuso abordar dos de los mayores enigmas científicos de su tiempo: elaborar una nueva formulación que integrara la mecánica cuántica con la teoría de la relatividad, y desentrañar, con ayuda de la física cuántica, la naturaleza del núcleo atómico, epicentro desconocido de la materia.

En 1934, su esfuerzo dio un giro decisivo. Yukawa presentó su teoría mesónica, que postulaba que los



De izquierda a derecha, Lord Mayordomo Birger Ekeberg, que pronunció el discurso de bienvenida durante la entrega de los premios en Estocolmo, con el profesor Rudolph Hess, ganador del Nobel de Medicina; Hideki Yukawa, ganador del Nobel de Física, y el profesor William Giaque, ganador del Nobel de Química

protones y neutrones del núcleo atómico se mantenían unidos mediante una fuerza nuclear generada por el intercambio de partículas intermedias: los mesones. Expuso su propuesta ante la Asociación Físico-Matemática de Japón y, al año siguiente, publicó un artículo en inglés que atrajo la atención de la comunidad científica internacional.

Tres años después, en 1937, llegaron las primeras confirmaciones experimentales. Investigaciones en Estados Unidos y Japón con rayos cósmicos detectaron partículas con masa que coincidían con las predicciones de Yukawa. Su nombre comenzó a circular con fuerza en los círculos científicos globales, dando pie a múltiples proyectos de investigación y a una intensa competencia entre potencias como Japón y el Reino Unido por desarrollar sus ideas.

Su camino no estuvo exento de obstáculos. Pronto se comprobó que las propiedades de las partículas observadas no se alineaban del todo con las características teóri-

cas de los mesones de Yukawa. En 1942, dos miembros de su equipo, Tanikawa Yasutaka y Sakata Shōichi, propusieron que las partículas detectadas eran en realidad productos de desintegración de los mesones originales. Esta hipótesis fue confirmada en 1947 por el británico Cecil Powell, al observar cómo las partículas de Yukawa se desintegraban en partículas de rayos cósmicos. Un año después, en Estados Unidos, se logró producir mesones artificialmente mediante aceleradores.

La teoría mesónica había sido finalmente validada por la experimentación. En 1949, Yukawa se convirtió en el primer japonés en recibir el Premio Nobel de Física. Su contribución no solo sentó las bases de la física nuclear moderna, sino que abrió una nueva era para la ciencia japonesa. Al año siguiente, Cecil Powell fue galardonado con el mismo premio por las observaciones experimentales que confirmaban las predicciones teóricas de Yukawa.

Guerra y Paz

«Pasó la guerra, se liberó aquella infernal fuerza sobre Hiroshima y Nagasaki y dos años después, en 1947, se descubrieron los verdaderos mensajeros de la fuerza nuclear predichos por Yukawa: los piones. Se presentaban con las tres cargas eléctricas que el físico japonés exigía y con una masa muy aproximada a la que calculó que habían de tener.

Si no hubiera muerto en 1981, seguramente la opinión de Yukawa sobre lo que pasó en Fukushima treinta años después nos hubiera merecido el mayor respeto. Una pista nos la puede dar el renacimiento, por tímido que aún sea, pues hasta 2024 solo se han reiniciado 14 de sus 54 reactores, que en aquel país está teniendo la energía nuclear después de recuperarse del sopitipando de Fukushima».

PROF. MANUEL LOZANO LEYVA



Yukawa, con su familia, en su apartamento de Nueva York

// A diferencia de muchos científicos de su época, Yukawa no separaba ciencia y humanismo

Compromiso ético tras Hiroshima

Los bombardeos atómicos de Hiroshima y Nagasaki en 1945 impactaron profundamente a Yukawa, quien abogó por el uso pacífico de la energía nuclear y participó activamente en movimientos por el desarme. En 1955, fue uno de los firmantes del Manifiesto Russell-Einstein, que instaba a los líderes mundiales a evitar la guerra nuclear.

Yukawa también desempeñó un papel fundamental en el desarrollo de la física teórica en Japón. En 1953, se convirtió en el primer director del Instituto de Investigación de Física Fundamental de la Universidad de Kioto, que más tarde llevaría su nombre. Bajo su liderazgo, el instituto se convirtió en un centro de excelencia en investigación teórica.

A diferencia de muchos científicos de su época, Yukawa no separaba

ciencia y humanismo. En sus reflexiones tardías, abordó la noción de «belleza» en las leyes naturales, y su escritura revela una preocupación casi espiritual por la armonía entre el conocimiento humano y el orden cósmico. Consideraba que el progreso técnico sin una brújula ética solo podía conducir al desastre.

Murió en Kioto en 1981, tras una vida consagrada a la búsqueda de la verdad, la promoción de la ciencia en Asia y la defensa de la paz. ■

Bibliografía

- Yukawa, H. (1935). *On the Interaction of Elementary Particles I. Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan*, 17, pp. 48-57.
- Pais, A. (1993). *La partícula del fin del universo: Un viaje al corazón de la materia*. Barcelona: Editorial Crítica.
- Brown, L. M. (1997). La predicción del mesón de Yukawa. *Investigación y Ciencia*, 254, pp. 44-51.
- Close, F. (2005). *El puzzle cuántico: De la física clásica a la física cuántica*. Barcelona: Crítica.
- Powell, C. F., Fowler, P. H., & Perkins, D. H. (1947). La investigación de partículas elementales por el método fotográfico. *Nature*, 159, pp. 694-697.
- González, M. (2010). Hideki Yukawa y la teoría mesónica: 75 años de una idea revolucionaria. *Revista Española de Física*, 24(3), pp. 25-31.
- Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP). (2023). *Acerca del YITP*. Disponible en: <https://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp>



Instituto Yukawa: ciencia teórica en la frontera del conocimiento

Fundado en 1953 y adscrito a la Universidad de Kioto, el Instituto Yukawa de Física Teórica (YITP) honra el legado del nobel Hideki Yukawa como uno de los centros más prestigiosos de investigación fundamental en Japón. Su enfoque abarca desde la física de partículas y la cosmología hasta la materia condensada y la teoría de cuerdas.

Con una fuerte proyección internacional, el YITP organiza programas de investigación temáticos que reúnen a científicos de todo el mundo, fomentando un ambiente colaborativo e interdisciplinar. Además, impulsa la formación de jóvenes investigadores y edita la reconocida revista *Progress of Theoretical and Experimental Physics*.

Fiel al espíritu de su fundador, el Instituto Yukawa continúa explorando las grandes preguntas del universo con el convencimiento de que la ciencia básica es clave para el futuro del conocimiento humano. ■



La inteligencia artificial, clave para descifrar la escritura cuneiforme

Un equipo de investigadores de Cornell y la Universidad de Tel Aviv ha desarrollado un sistema de inteligencia artificial llamado ProtoSnap que permite identificar, alinear y copiar con precisión caracteres cuneiformes desde fotografías de tablillas antiguas. Esta forma de escritura, una de las más antiguas del mundo, con más de mil caracteres únicos, presenta

grandes desafíos por su variabilidad histórica, geográfica y estilística. ProtoSnap emplea un modelo de difusión para ajustar una plantilla de carácter a su versión impresa en la tablilla, mejorando notablemente el reconocimiento óptico de caracteres incluso en signos raros o deformados. El avance promete facilitar la digitalización masiva de las más de quinientas mil tabli-

llas existentes, la mayoría aún sin traducir, y ahorrar tiempo valioso a los expertos. Un desarrollo que no solo automatiza la reproducción de tablillas, sino que también abre nuevas posibilidades para el análisis comparativo de escrituras antiguas, ofreciendo un acceso sin precedentes a información sobre la religión, economía y vida social de las civilizaciones mesopotámicas. ■

Pink, el nuevo rostro de la humanidad que reescribe la historia de Europa

Un equipo internacional de científicos ha presentado Pink, un fósil hallado en Atapuerca que representa un nuevo homínido de hace entre 1,1 y 1,4 millones de años. Este descubrimiento adelanta en trescientos mil años la presencia humana en Europa occidental. El fósil, parte izquierda de una cara, muestra rasgos intermedios entre el *Homo erectus* y formas

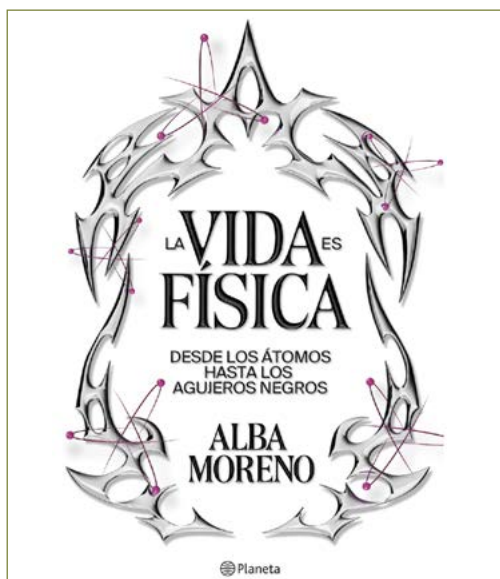
más modernas, lo que sugiere una migración humana distinta a la del *Homo antecessor*. Pink ha sido clasificado provisionalmente como *Homo aff. erectus*, y refuerza la hipótesis de múltiples entradas humanas al continente desde Oriente Próximo. El hallazgo desvela una Europa habitada por humanos mucho antes de lo que se pensaba, y bajo climas más benignos. ■





Una estudiante revoluciona la ciencia de la energía eólica al resolver un problema matemático centenario

Divya Tyagi, estudiante de posgrado en la Universidad Estatal de Pensilvania, ha resuelto un problema matemático formulado en 1935 por el aerodinamicista Hermann Glauert, revolucionando la teoría del rotor óptimo en turbinas eólicas. Su investigación, publicada en *Wind Energy Science*, actualiza y amplía los fundamentos teóricos que rigen la eficiencia de los aerogeneradores. Mediante el uso del cálculo de variaciones confirmó la validez del modelo clásico y obtuvo soluciones analíticas exactas para los coeficientes de empuje y momentos de flexión, esenciales para el diseño estructural. Su modelo corrige limitaciones históricas y predice el comportamiento del flujo de aire incluso en escenarios extremos antes no contemplados. Este avance permite diseñar turbinas más eficientes, adaptables y resistentes, lo que puede traducirse en aumentos significativos de la producción energética global. La comunidad científica reconoce este trabajo como un hito teórico y técnico y han otorgado a Tyagi el Anthony E. Wolk Award por su legado renovable con sello matemático. ■



La vida es física

Alba Moreno, física, divulgadora científica y una de las voces jóvenes más potentes en redes sociales, ofrece una obra fresca y profundamente pedagógica que tiene como objetivo conectar a la generación Z con la ciencia. Con un estilo cercano, visual y dinámico, el libro desmitifica conceptos complejos de la física, desde la relatividad y la mecánica cuántica hasta la termodinámica, anclándolos en situaciones cotidianas como un viaje en metro, una pelea en redes o el funcionamiento del microondas. Moreno parte de una idea poderosa: todo en la vida está atravesado por la física, solo necesitamos las herramientas adecuadas para entenderlo. Así, se sirve de analogías pop, referencias actuales y una narrativa con ritmo ágil para tender un puente entre la ciencia académica y el día a día de quienes han crecido entre pantallas, memes y notificaciones. ■

Moreno, A. (2025).

La vida es física. Desde los átomos hasta los agujeros negros. Editorial Planeta, 176 pp.



EN RED

Nuevas evidencias revelan la diversidad social oculta tras las pirámides egipcias

Un estudio reciente sobre las tumbas monumentales de Tombos, en Nubia, publicado en el *Journal of Anthropological Archaeology*, ha revelado que no estaban reservadas exclusivamente para la élite. Mediante el análisis de cambios entesiales, se ha descubierto que una gran cantidad de individuos sepultados en pirámides y capillas ejecutaban trabajos manuales intensos. Se identificaron entierros diversos, tanto por estatus como por identidad étnica, incluidos individuos nubios enterrados en posición flexionada, lo que indica la persistencia de tradiciones locales. Las tumbas contenían desde ajuares lujosos hasta simples esteras funerarias, sin relación directa con la intensidad del trabajo corporal. También se hallaron ejemplos de reutilización de tumbas y de entierros colectivos que reunían a personas de diferentes rangos sociales. Este patrón su-



giere una sociedad compleja, con vínculos entre colonos egipcios y población local y desafía décadas de teorías sobre la organización social en las comunidades funerarias egipcias. ■

Más información: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278416525000133>



Un paso hacia la cura del síndrome de Down: eliminan con precisión el cromosoma extra usando CRISPR

Un equipo de investigadores japoneses ha logrado un avance sin precedentes en la corrección genética de la trisomía 21, causa del síndrome de Down, mediante un sistema CRISPR/Cas9 de especificidad alélica que permite eliminar selectivamente una copia del cromosoma 21 sin afectar las restantes, preservando la impronta génica. El procedimiento se desarrolló en células madre pluripotentes y fibroblastos derivados de pacientes, empleando guías diseñadas con precisión tras un proceso de fase de haplotipos. Este método restauró la disomía y normalizó el cario-



tipo, mejorando la proliferación, reduciendo el estrés oxidativo y regulando genes clave del desarrollo neurológico, con eficacia también en células diferenciadas y no mitóticas. ■

REDES



@pbsspacetime

Con casi cuatro millones de seguidores, este canal explora conceptos complejos de la física teórica, como los agujeros negros, la naturaleza del tiempo, los multiversos y las partículas fundamentales. Sus vídeos profundizan en las teorías más actuales de la cosmología y la mecánica cuántica con un enfoque riguroso y estimulante.



SAGANet

Social Action for Grassroots Astrobiology Network es una comunidad científica y educativa centrada en la astrobiología, el estudio del origen, evolución, distribución y futuro de la vida en el universo. Utiliza esta plataforma digital como punto de encuentro entre científicos, divulgadores y aficionados de todo el mundo, y organiza eventos multitudinarios como "Ask an Astrobiologist".



@hubermanlab

El Dr. Andrew Huberman, neurocientífico y profesor en la Universidad de Stanford, es conocido por divulgar a través de *podcast* y de sus redes sociales ciencia sobre el cerebro y el bienestar. Comparte consejos basados en investigaciones sobre sueño, estrés, salud y rendimiento.



@spacex

Publica imágenes y vídeos de lanzamientos de cohetes, pruebas de naves como Starship, actualizaciones sobre proyectos de exploración espacial y contenido educativo sobre ingeniería aeroespacial y el futuro del transporte interplanetario. Se trata de imágenes visualmente impactantes y técnicas y de un contenido siempre actualizado, ya que está dedicada a mostrar los avances tecnológicos y las misiones espaciales de esta empresa revolucionaria.



@thejasonsilva

Su creador ofrece monólogos apasionados para comunicar sobre ciencia, psicología, filosofía y poesía. Reflexiona sobre la conciencia, el amor, la muerte y el futuro humano con un estilo lírico, asombroso y reflexivo. Ideal para mentes curiosas que busquen inspiración existencial en pocos segundos.



Constitución del Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear tras su renovación parcial

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear quedó constituido a finales de abril tras su renovación parcial para un nuevo mandato. De esta forma, Juan Carlos Lentijo fue nombrado nuevamente presidente del organismo regulador nuclear; los consejeros Francisco Castejón y Pilar Lucio renovaron en sus respectivos cargos, y se incorporó al Pleno del CSN Silvia Calzón como nueva consejera. Junto a ellos, completa el Pleno el consejero Javier Dies, que renovó su cargo en 2022.

El *Boletín Oficial del Estado* formalizó el nombramiento de Lentijo, Castejón, Lucio y Calzón el pasado 16 de abril, tras la decisión tomada por el Consejo de Ministros. En su comparecencia en la Comisión de Transición Energética y Reto Demográfico del Congreso de los Diputados, ninguno de ellos obtuvo la mayoría necesaria de tres quintos de los votos para su veto o idoneidad, pero, pasado un mes desde la comunicación de la propuesta del Consejo de Ministros al Congreso, realizada el 11 de marzo, según recoge la Ley de creación del CSN, se entenderán nombrados.

El CSN es el único organismo regulador en materia de seguridad nuclear y protección radiológica en España. Creado en 1980 tras la escisión de la Junta

de Energía Nuclear, vela por la seguridad en los ámbitos de su competencia entre las personas y en el medioambiente. El Pleno del organismo regulador está constituido por un presidente y cuatro consejeros para un mandato de seis años, que rinden cuentas ante el Parlamento. Los miembros del Pleno son personas de reconocida trayectoria.

El pasado mes, el Pleno designó a la consejera Pilar Lucio como vicepresidenta del CSN, de acuerdo con el artículo 24 de su Estatuto. Pilar Lucio (Plasencia, 1972) tiene una larga trayectoria directiva tanto en el sector privado como en el público: desde 2019 es consejera del CSN, donde ha coordinado el comité de enlace con ENRESA, fue elegida vicepresidenta de la Asociación Europea de Autoridades en Protección Radiológica (HERCA) y ha representado al CSN en el Comité de Actividades Reguladoras Nucleares (CNRA) de la Agencia de Energía Nuclear (NEA) y otros grupos de alto nivel.

Asimismo, el Pleno acordó las comisiones internas de trabajo, de acuerdo con el artículo 24.4 del Estatuto del CSN y el presidente informó de las asignaciones entre los miembros del Pleno para atender los comités nacionales e internacionales en los que participa el organismo. ■

El CSN asume la presidencia de turno de la Asociación Internacional de Reguladores Nucleares (INRA)



En la 55 reunión de la Asociación Internacional de Reguladores Nucleares, celebrada en París, se transfirió la presidencia de la Asociación al CSN. También se abordaron temas como las tareas que ha desarrollado el CSN, en especial la renovación de la autorización de explotación de la central nuclear Trillo, los objetivos alcanzados, la fusión nuclear y la situación en Ucrania. ■

Taller internacional de la NEA sobre gestión de incertidumbres en análisis de riesgos

Del 31 de marzo al 2 de abril se llevó a cabo el International Workshop on Treatment of Uncertainties for Novel Aspects of Risk Analyses en la sede del CSN. En el encuentro participaron más de sesenta expertos de los quince países miembros del foro internacional y se abordó el tratamiento de incertidumbres en los análisis de riesgos, aspecto clave en el ámbito de la seguridad nuclear. ■



ACUERDOS DEL PLENO DEL CSN

El CSN aprueba la Instrucción IS-47 que determina el listado de términos municipales de actuación prioritaria contra el radón

Está constituido por municipios en los que un número significativo de edificios pueden presentar concentraciones de radón en aire superiores al nivel de referencia, fijado en 300 Bq/m³.

El CSN informa favorablemente la ampliación del Almacén Temporal Individualizado de Santa María de Garoña

El CSN dio luz verde a la ampliación del ATI de la central nuclear Santa María de Garoña para asegurar espacio suficiente al combustible gastado generado. Esta decisión incluye una actualización del plan de gestión de residuos radiactivos.



Acceso a todas las actas

Simulacro de emergencia en la central nuclear Almaraz I



Como cada año, la central nuclear Almaraz I ha llevado a cabo un simulacro de emergencia en el que participaron el CSN y la Subdelegación del Gobierno en Cáceres. Para simular la indisponibilidad de la Sala de Emergencias en la sede del CSN, se acudió a la Sala de Emergencias de respaldo (Salem 2) del cuartel general de la UME en Torrejón de Ardoz. Durante el ejercicio, el CSN ha realizado el seguimiento del estado de la planta y de las actuaciones del titular para recuperar las condiciones seguras, y ha recomendado a la Subdelegación del Gobierno en Cáceres las medidas de protección radiológica que hubiesen sido necesarias. ■

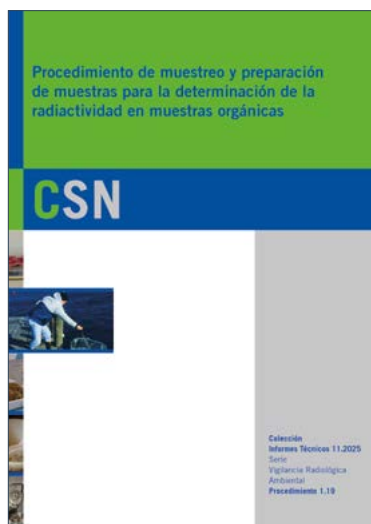
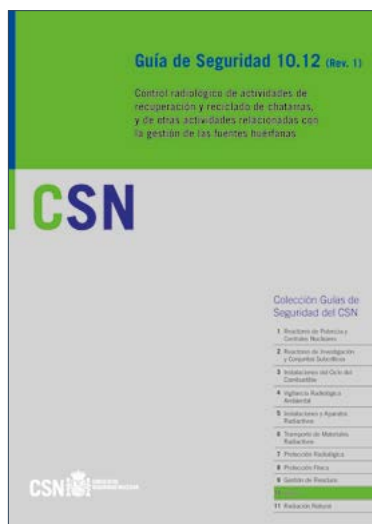
Avances en protección radiológica

La jornada anual de la Sociedad Española de Protección Radiológica, que tuvo lugar en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, contó con la participación del CSN. En ella se destacaron las actuaciones en materia de protección radiológica que se han llevado a cabo este año y los proyectos futuros que se implementarán, entre los que destaca el proyecto Meyer, cuya finalidad es desarrollar un protocolo nacional para la medición de yodo en tiroides en situaciones de emergencia. ■



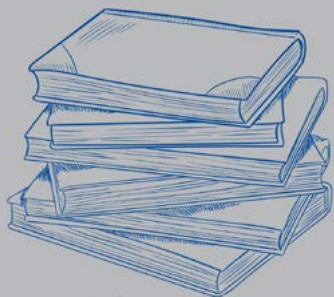


ÚLTIMAS PUBLICACIONES



Catálogo de publicaciones

CSN





CONSULTA EL CATÁLOGO DE PUBLICACIONES DEL CSN.

Disponible en:



CSN **ALFA**

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica

BOLETÍN DE SUSCRIPCIÓN



Institución/ Empresa

Nombre

Dirección

CP

Localidad

Provincia

Tel.

Fax

Correo electrónico

Fecha

Firma

Enviar a Consejo de Seguridad Nuclear – Servicio de Publicaciones. Pedro Justo Dorado Delmans, 11 · 28040 Madrid / FAX: 913460558 / 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 > Biotechnology at the Service of Agriculture

Tools that accelerate selection processes and enable the development of crop varieties better adapted to current challenges, such as climate change

REPORTS

14 > International Year of Quantum Science and Technology

One hundred years after the foundations of quantum mechanics were established, the science that revolutionized our understanding of reality is now giving rise to a new generation of technologies

22 > Environmental Radioactivity: Invisible Presence, Controlled Reality

Spain has one of the most robust environmental radiological monitoring systems in Europe, endorsed by the International Atomic Energy Agency.

INTERVIEW

28 > Ana María Crespo de las Casas

After a distinguished career, she has made history by becoming the first woman to preside over the Spanish Royal Academy of Exact, Physical and Natural Sciences since its founding in 1847

TECHNICAL ARTICLES

32 > Leakage Testing of Control Room Envelope in Nuclear Power Plants

40 > The New CSN IS-47: The Challenge of Universalising Radon Protection in the Workplace

SCIENCE AND LANGUAGE

46 > The Art of Dwelling in the World

A journey through the spaces that define us

RADIOGRAPHY

52 > New Radiological Protection Web Portal from CIEMAT

CSN I+D

54 > Exposure to Ionising Radiation in Amphibians: An Evaluation of International Frameworks for Radiological Protection

ENTITIES

56 > Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón

Javalambre: An Astrophysical Observatory for Large-Scale Mapping of the Universe.

NAMES IN SCIENCE

60 > Hideki Yukawa, the Invisible Architect of Nuclear Force

Japan's first Nobel Laureate in Physics transformed our understanding of the atomic nucleus by predicting the existence of mesons and became a symbol of science committed to peace



I PLAN de IGUALDAD del Consejo de Seguridad Nuclear

Periodo 2023-2026