CSN
alfa

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Consejo de Seguridad Nuclear
Número 63
Septiembre 2025

El futuro de la radioterapia: precisión y menor daño en los tejidos sanos

¿Hay vida más allá de la Tierra? El origen de la vida: límites y posible existencia en el universo

Geoingeniería: alternativas para agilizar la carrera contra el cambio climático

Entrevista a Alfredo Poves Paredes, catedrático emérito de Física Teórica

I PLAN de IGUALDAD del Consejo de Seguridad Nuclear

Periodo 2023-2026

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

La ciencia contemporánea se encuentra en un momento de inflexión, en el que los avances tecnológicos y conceptuales transforman de manera simultánea la capacidad de conocer el mundo. En el ámbito médico, la radioterapia avanza hacia el futuro con tecnologías como la protonterapia o la terapia FLASH, donde la radiación se convierte en una herramienta cada vez más precisa y selectiva capaz de destruir el tumor al tiempo que protege mejor los tejidos sanos y amplía las posibilidades de curación.

Este número de *Alfa* se adentra también en la astrobiología, disciplina que reúne biología, química, física, geología y astronomía para abordar una pregunta fundamental: ¿qué es la vida y dónde puede existir? Desde los organismos extremófilos que prosperan en condiciones hostiles en la Tierra hasta los biosensores diseñados para detectar biofirmas en Marte, este campo del conocimiento recuerda que comprender lo esencial de la vida no es solo un desafío experimental, sino también un imperativo filosófico que conecta a la humanidad con su propia historia y su porvenir cósmico.

Esta nueva entrega apunta además hacia algunos de los grandes retos que marcan la agenda internacional. La geoingeniería, analizada en un extenso reportaje, plantea alternativas –desde la captura de CO_2 hasta la modificación de la radiación solar– que despiertan esperanzas y controversias en la lucha contra el cambio climático.

La sección técnica incluye un informe sobre los veinticinco años del Protocolo de la Chatarra, que firma Juan Pedro García Cadierno, jefe de Área de Coordinación de Operaciones de Emergencia del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Un instrumento clave para la vigilancia radiológica en el reciclaje de metales, que ha demostrado la capacidad de la cooperación público-privada para garantizar la seguridad en entornos industriales sensibles.

Asunción Barquín Dueña, jefa de Proyecto de la central nuclear Trillo, evalúa a continuación la renovación de la autorización de explotación de esta central, y pone de manifiesto cómo la evaluación regulatoria rigurosa y la planificación a largo plazo son esenciales para sostener un modelo energético seguro y eficiente.

A través de estas páginas se puede descubrir también cómo la ciencia traspasa disciplinas en el ensayo de Isabel Alonso, «Del uranio al ultramarino: la ciencia que da color al arte», donde la física y la química dialogan con la estética, desde la prehistoria hasta la actualidad.

El apartado de I+D conduce a un escenario igualmente relevante: la caracterización, exhalación y remediación de Radón en materiales de construcción (EXRADON), a través de un estudio de la Universitat Politècnica de València.

Este número sirve, además, para conocer mejor la labor del complejo de laboratorios de Seibersdorf del Departamento de Ciencias y Aplicaciones Nucleares del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), referente en la aplicación multidisciplinar de la tecnología nuclear que, desde su apertura en 1962, ha dado soporte técnico a los Estados miembros en el uso pacífico y de no proliferación de esta tecnología.

El perfil histórico se detiene en esta ocasión en Niels Bohr, figura que revolucionó la física con sus teorías sobre la estructura atómica y la dinámica nuclear, pero también advirtió sobre las implicaciones políticas y éticas de la ciencia. Su legado trasciende el cálculo y la experimentación, al mostrar que el conocimiento científico solo cobra pleno sentido en diálogo con la cultura, la ética y la responsabilidad histórica.

En conjunto, este número de *Alfa* invita a reflexionar sobre el papel de la ciencia como empresa compartida que, desde la radiología clínica hasta la astrobiología, la seguridad nuclear o la creación artística, busca comprender, proteger y transformar el mundo que habitamos en la actualidad. Feliz recorrido. ■

alfa

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Editada por el CSN

Número 63
Septiembre 2025

MIXTO
Papel procedente de fuentes responsables
FSC® C125445
FSC www.fsc.org

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

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

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

Coordinación editorial
Editorial MIC · 987272727
www.editorialmic.com

Fotografías
CSN, Editorial MIC, BSC, CEFCA, CNA, Envato, Freepick, istockphoto

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

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

© Consejo de Seguridad Nuclear

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

EN PORTADA

6 **El futuro de la radioterapia: precisión y menor daño en los tejidos sanos**

Técnicas como la protonterapia o la terapia FLASH ofrecen tratamientos más precisos, seguros y personalizados contra el cáncer

REPORTAJES

14 **¿Hay vida más allá de la Tierra? El origen de la vida: límites y posible existencia en el universo**

Unas condiciones propicias y una serie de reacciones químicas dieron lugar a la vida en la Tierra. Pero, quizá no sea el único lugar...

22 **Geoingeniería: alternativas para agilizar la carrera contra el cambio climático**

El calentamiento global continúa un ascenso que la comunidad científica se esfuerza por controlar desde diferentes flancos

ENTREVISTA

28 **Alfredo Poves Paredes**

Maestro de varias generaciones de físicos nucleares, pionero en el estudio del modelo de capas y en la colaboración internacional

ARTÍCULOS TÉCNICOS

32 **XXV aniversario de la firma del Protocolo de Colaboración sobre la Vigilancia Radiológica de los Materiales Metálicos**

41 **Evaluación de la solicitud de renovación de la autorización de explotación de la central nuclear Trillo**

CIENCIA Y ARTE

47 **Del uranio al ultramarino: la ciencia que da color al arte**

RADIOGRAFÍA

52 **Nueva IS-48**

Publicada el 1 de mayo de 2025, establece los criterios que deben cumplir los programas de experiencia operativa de las centrales nucleares

CSN I+D

54 **Caracterización, exhalación y remediación de Radón en materiales de construcción (EXRADON)**

ENTIDADES

56 **Laboratorios de Seibersdorf del OIEA**

Complejo multidisciplinar para la aplicación de técnicas y seguridad nuclear

CIENCIA CON NOMBRE PROPIO

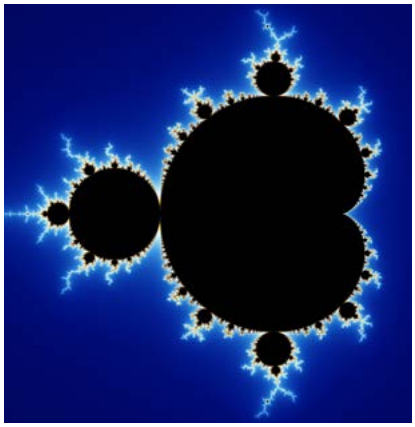
60 **Niels Bohr: del átomo cuántico a la política de un mundo abierto**

Pionero en desentrañar la estructura cuántica del átomo, fue un pensador que advirtió sobre las implicaciones éticas y políticas de la ciencia

65 **Reacción en cadena**

68 **Panorama**

70 **Últimas publicaciones**



El futuro de la radioterapia: precisión y menor daño en los tejidos sanos

La radioterapia se basa en el uso de radiación ionizante para destruir células tumorales. En la actualidad, se están desarrollando nuevas formas de tratamiento que emplean dosis precisas de radiación para dañar el ADN de las células cancerosas e impedir que sigan multiplicándose. Tras la irradiación, el tumor reduce su tamaño y, en más del 40 % de los casos, desaparece por completo.

Texto: **Pura C. Roy** | Fotos: **Envato**

Los orígenes de la radioterapia se remontan a la década de 1890, tras los trabajos de Röntgen y del matrimonio Curie. Actualmente, la radioterapia es un tratamiento consolidado, seguro y eficaz.

Cada año, millones de pacientes se someten a radioterapia para curar o controlar los síntomas de cánceres como los de cabeza y cuello, cerebro, mama, cervicouterino, próstata y piel. Esta técnica constituye uno de los tratamientos oncológicos más frecuentes, ya que puede emplearse en casi todos los tipos de cáncer y combinarse con otros tratamientos como la quimioterapia o la cirugía. Para ello, emplea diversos tipos de radiación, como los rayos X, los rayos gamma, los electrones de alta energía o los protones e incluso núcleos pesados.

Se estima que un 50 % de los pacientes necesitará radioterapia durante el curso de la enfermedad.

Sin embargo, tal y como sucede con otros tratamientos contra el cáncer, puede tener efectos secundarios. A lo largo de las últimas décadas, se han realizado muchos avances para

mitigarlos y se ha trabajado en mejorar la precisión de los equipos. La tecnología actual «permite aplicar las dosis de manera muy exacta. Asimismo, se han incorporado imágenes que permiten delimitar el tumor y se aplican técnicas dosimétricas para distribuir la radiación, tal como se hace en la radioterapia de intensidad modulada. Los últimos avances han incrementado la eficacia de los tratamientos y han mejorado tanto la supervivencia como la calidad de vida de los pacientes», explica Rubio. El primero de ellos es el uso de la imagen —TAC o resonancia magnética— a tiempo real para identificar mejor el contorno del tumor y recalcular la dosis de radiación según los cambios en el cuerpo del paciente (terapia adaptativa con fotones). «El segundo es que hemos mejorado la dosimetría. Podemos, gracias a la imagen, volver a calcular la dosis si es necesario modificarla».

A pesar de que los equipos actuales de radioterapia ofrecen la posibilidad de llevar a cabo un tratamiento muy dirigido, la radioterapia y la física médica se enfrentan al reto de destruir el tumor sin dañar los órganos sanos circundantes, lo que ha impulsado una intensa investigación en nuevas técnicas más precisas, personalizadas y menos invasivas, como la radioterapia FLASH o la protonterapia.

Las posibilidades de la terapia FLASH

En 2014, Marie-Catherine Vozenin, radiobióloga del Hospital Universitario de Ginebra, publicó, junto con otros colaboradores, un artículo en la revista *Science Translational Medicine* donde describía un nuevo enfoque en el tratamiento de radioterapia tradicional al que llamaron FLASH. Consistía en administrar radiación a dosis ultraelevadas y con exposiciones de menos de un segundo (una tasa >40 Gy/s, cuatrocientas veces más rápida que la radioterapia actual) que apenas afectaban a los tejidos sanos, pero destruían los tumores.

En una entrevista concedida por Marie-Catherine Vozenin a la revista *Mètode*, consideraba que la técnica Flash podría ser «útil para cualquier tipo de tumor, no solo para los sólidos. Tumores como el glioblastoma, que requieren dosis muy altas de radiación, podrían beneficiarse enormemente de esta tecnología, mejorando el control del tumor y reduciendo las complicaciones. Hemos investigado el impacto de FLASH en estudios preclínicos en muchos órganos, incluyendo el intestino y el sistema hematológico, y es todo positivo: todos los modelos que hemos estado usando hasta ahora son receptivos».

Hasta ahora, los protones han sido las partículas elegidas para los

DRA. CARMEN RUBIO,
EXPRESIDENTA DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ONCOLOGÍA RADIOTERÁPICA (SEOR) Y JEFA DEL SERVICIO RADIOLÓGICO EN EL HOSPITAL HM SANCHINARRO EN MADRID

«La radiología oncológica es uno de los pilares del tratamiento del cáncer junto con la cirugía y otras técnicas como la quimioterapia, la inmunoterapia o diferentes fármacos. La radioterapia tiene un papel fundamental y es muy útil cuando no se puede llevar a cabo una intervención quirúrgica, ya que ayuda a conservar el órgano, como es el caso del cáncer de laringe, recto o meningiomas»

ensayos de la terapia FLASH, tanto porque pueden penetrar hasta 30 cm en el cuerpo —lo que les permite llegar a órganos internos relativamente profundos— como porque los equipos de radioterapia de protones existentes pueden adaptarse con relativa facilidad para administrar las dosis.

Uno de los desafíos principales es la administración precisa de dosis en muy poco tiempo. Aunque se han logrado avances significativos, cada sesión de radioterapia convencional dura de dos a cinco minutos y, para mejorar su tolerancia, la dosis total suele fraccionarse en hasta treinta sesiones durante un máximo de ocho semanas. Sin embargo, la terapia FLASH administra toda la dosis de radiación a tasas ultraaltas en una o unas pocas fracciones, con tiempos de exposición del orden de milisegundos.

De este modo, la tecnología FLASH podría reemplazar las técnicas actuales, ya que permite más eficiencia y menos toxicidad. A pesar de que aún se requiere más investigación y estudios en seres humanos para establecer su eficacia en diferentes tipos de cáncer y en tratamientos tanto curativos como paliativos, los ensayos clínicos iniciales sugieren que podría ser el gran avance en radioterapia.

Terapia con protones

Mientras la radioterapia «clásica» se basa en un haz de alta energía

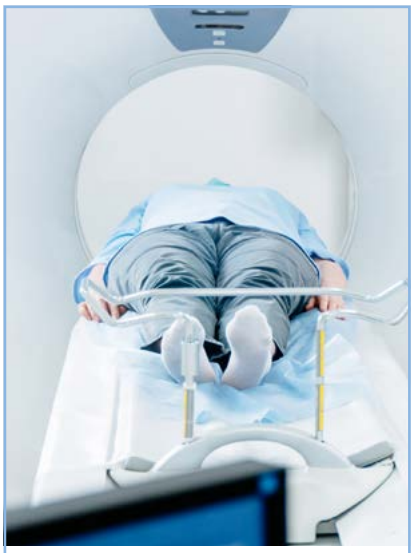
> *La tecnología FLASH podría reemplazar las técnicas actuales, ya que permite más eficiencia y menos toxicidad*

de rayos X (fotones), la protonterapia utiliza un haz de partículas aceleradas (protones) de alta energía que permite dirigir de forma más precisa el depósito de la radiación en el tumor.

La utilización de los protones se debe a sus características físicas ya que, por su masa, sufren menos alteraciones en su trayectoria hacia la lesión y pueden depositar la mayor parte de su energía dentro del tumor. Gracias a su propiedad de frenado súbito, no irradian más allá de ese punto de frenada (pico de Bragg), a diferencia de los fotones. Esto es muy relevante en el caso de los niños, ya que «en los tumores pediátricos es muy importante proteger los órganos sanos, ya que su esperanza de vida es larga y es necesario minimizar los riesgos», explica Rubio.

Las sesiones de protonterapia tienen una duración estimada de unos 25 minutos, la mayor parte de los cuales se destinan a la colocación, posicionamiento y verificación guiada por imagen de la zona de tratamiento en el paciente. El tiempo de irradiación es, en la mayor parte de los casos, inferior al minuto. Además, los nuevos equipos de protonterapia han incorporado también la posibilidad de captar y procesar la imagen.

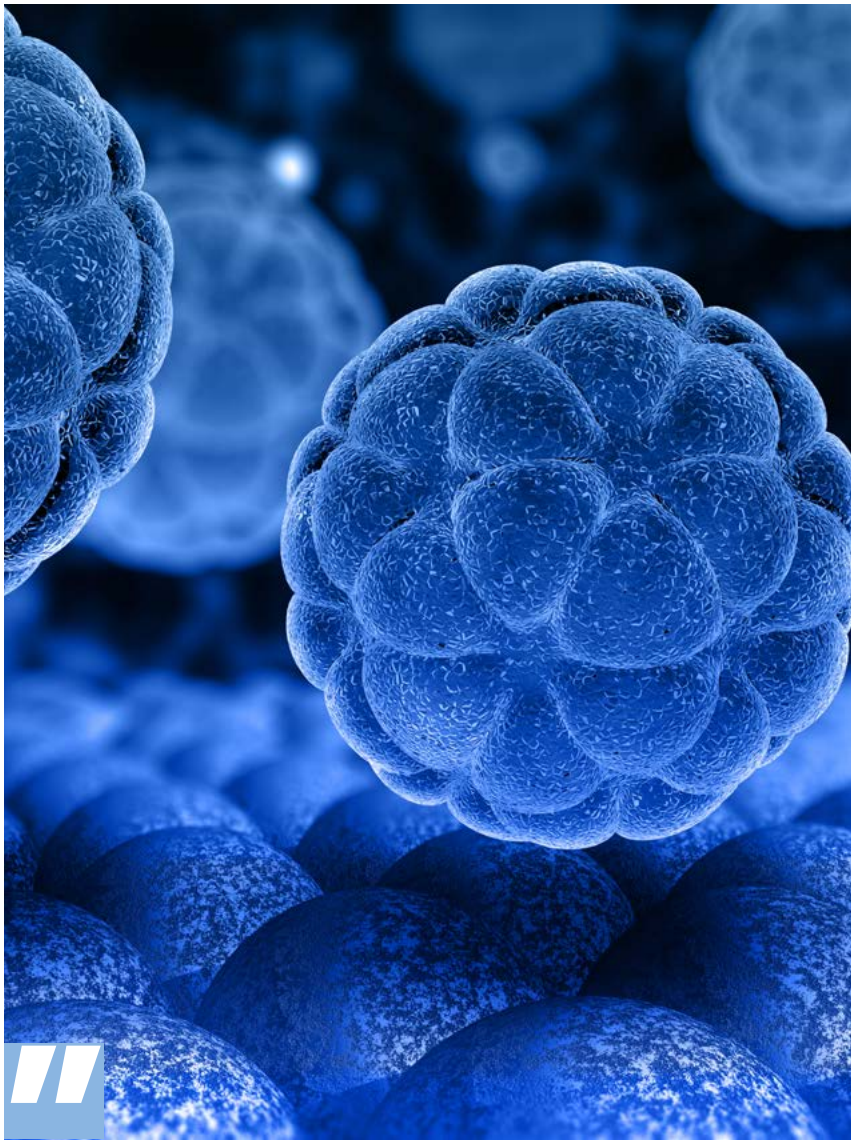
Para calcular mejor la dosis de radiación, la Unidad de Innovación Nuclear del Departamento de Fisión Nuclear del Ciemat ha diseñado



Rayos de Esperanza

Con más de 19 millones de casos nuevos y 10 millones de muertes solo en 2020, se prevé que para 2040 el cáncer alcance los 30 millones de casos nuevos y los 16,3 millones de defunciones anuales por esa afección en todo el mundo. Los países más afectados por esa enfermedad son los de ingresos medianos y bajos, donde se prevé que se producirá más del 70 % de las muertes por cáncer.

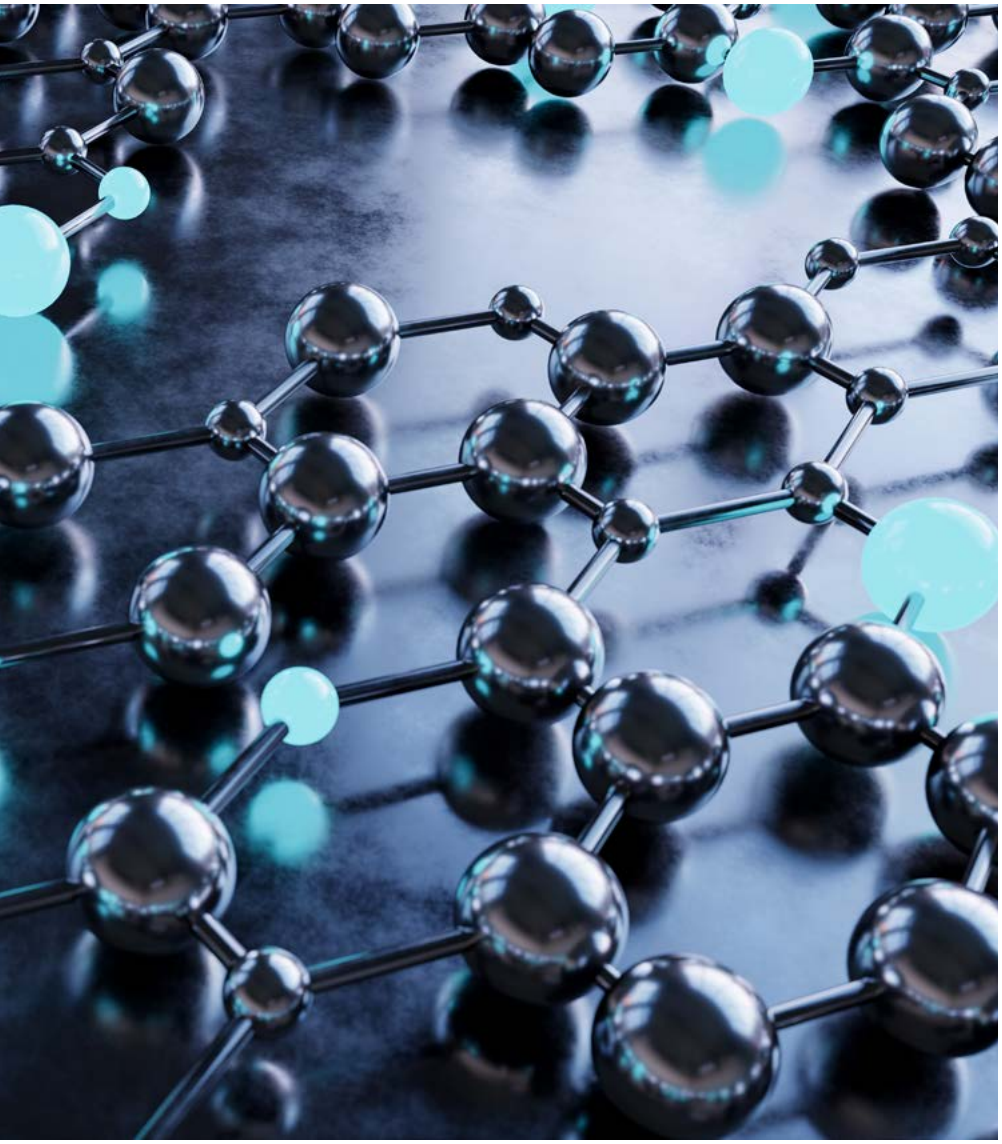
Para Rafael Mariano Grossi, director general del Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA), el programa *Rayos de Esperanza* pretende cambiar esta situación apoyando la creación y ampliación de servicios de radioterapia, imagenología médica y medicina nuclear en los más de veinte Estados miembros del OIEA que carecen por completo de instalaciones para el tratamiento con radiación, así como en los que las tienen y deben ampliarlas. Mediante *Rayos de Esperanza* se pretende reforzar los programas nacionales de control del cáncer y ofrecer a millones de pacientes la posibilidad de recibir una atención de calidad.



La investigación apunta a que la radiación no solo destruye directamente las células tumorales, sino que también puede hacer que el tumor sea más visible para el sistema inmune

dos nuevos dosímetros de neutrones. Ambos dispositivos incorporan una tecnología basada en detectores CLYC, un cristal inorgánico centelleante capaz de discriminar neutrones de rayos gamma. Los nuevos aparatos permiten detectar neutrones desde meV hasta cientos de MeV, como los producidos habitualmente en instalaciones de protonterapia, y tienen una respuesta más rápida que los dosímetros comerciales basados en detectores de He-3.

Además, tanto el Ciemat como la Clínica Universidad de Navarra han llevado a cabo estudios para conocer los efectos biológicos de la protonterapia y, de este modo, proporcionar un tratamiento eficaz a todos los pacientes. Entender estos efectos posibilita combinar el tratamiento con inmunoterapia (donde se estimula el sistema inmune para que destruya el tumor). En este sentido, la investigación apunta a que la radiación no solo destruye directamente las células tumorales, sino que también puede hacer que el tumor sea más visible para el sistema inmune al liberar antígenos y modificar su microambiente. Esto abre la posibilidad de potenciar la eficacia de la inmunoterapia —como los inhibidores de puntos de control inmunitario— cuando se administra junto con radioterapia o protonterapia. La clave está en comprender en qué tumores y en qué momento la combinación resulta más beneficiosa, lo que convierte a la búsqueda de biomarcadores en una prioridad para



avanzar hacia tratamientos personalizados y más efectivos.

En España, dos entidades privadas disponen de equipos de protonterapia, Quirón Salud y la Clínica Universitaria de Navarra en Madrid. Debido a su coste, este tratamiento no es accesible para todos los centros. Sin embargo, es posible implantar nuevas unidades en el sistema público, diez de las cuales han sido donadas por la Fundación Amancio Ortega, para administrar esta técnica de irradiación.

Compromiso con la calidad

Cuando se habla de pacientes, las competencias fundamentales corresponden al Ministerio de Sanidad, «pero independientemente de los equipos o las técnicas que se emplean, es necesario delimitar los campos de utilización y planificar, de modo que se aplique la dosis máxima con el menor daño. Este trabajo es multidisciplinar. Se debe llevar a cabo, tanto en su ejecución como en su estudio, por sociedades profesionales, como son los físicos médicos y los oncólogos radioterápicos, y por los técnicos especialistas que operan los equipos», afirma María Luisa Ramírez, jefa de Área de Instalaciones Médicas del CSN.

En estos momentos se utilizan aceleradores lineales médicos muy avanzados que utilizan fotones, una onda-partícula con larga penetración y de alta energía que puede llegar a las zonas tumorales del paciente. «También se utilizan

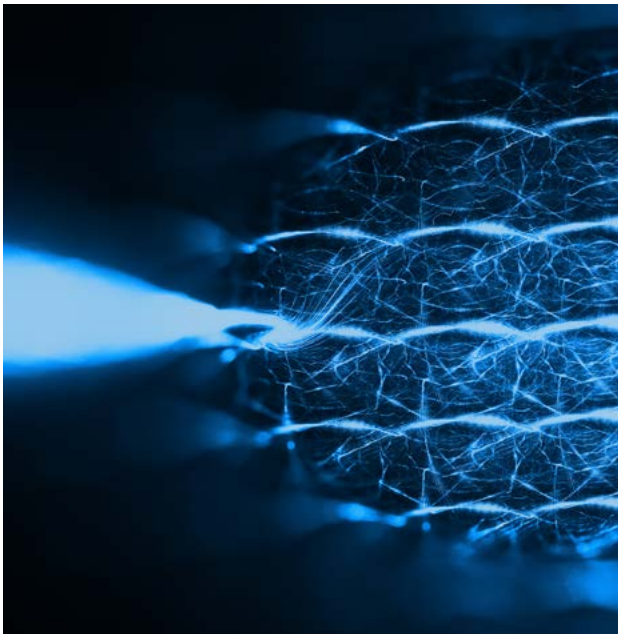
MARÍA LUISA RAMÍREZ,
JEFA DE ÁREA DE INSTALACIONES MÉDICAS DEL CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR (CSN)

«Los oncólogos, físicos médicos, radioterapeutas, técnicos de radioterapia y profesionales sanitarios están debidamente formados y cuentan con las calificaciones adecuadas. Los procesos que intervienen están sometidos a controles de calidad para garantizar que se llevan a cabo conforme a lo establecido y que se administra la dosis de radiación correcta en el lugar adecuado. Todos los equipos de radioterapia deben revisarse de forma periódica para asegurar que funcionan debidamente, y la dosis de radiación administrada debe medirse a fin de garantizar que es la correcta»

Radioterapia e inteligencia artificial

La incorporación de la inteligencia artificial en radioterapia permite no solo acelerar procesos técnicos, sino también mejorar la calidad y personalización del tratamiento de cáncer. Herramientas de IA ya se usan para optimizar etapas críticas del tratamiento, desde la planificación hasta la evaluación de la respuesta. En concreto, algoritmos de aprendizaje profundo han demostrado ser muy eficaces en la predicción de la distribución de dosis de radiación en distintos tipos de tumores, reduciendo drásticamente los tiempos para diseñar un plan de tratamiento.

Por ejemplo, un estudio reciente con 622 pacientes mostró que modelos como U-Net, Flex-Net o Highres-Net pudieron generar predicciones de dosis muy cercanas a las usadas clínicamente, con diferencias normativas menores al 3 % en tumores de mama, cuello uterino y nasofaríngeo. Además, la IA facilita la segmentación automática de tumores y órganos sanos, lo que ayuda a minimizar errores y mejorar el tratamiento y la tasa de supervivencia de los pacientes con cáncer.



protones, que tienen un recorrido menor. Nosotros tenemos competencia para que todo este grupo interdisciplinar que trabaja lo haga de forma segura y que las instalaciones donde se dan esas dosis de radiación muy elevadas sean también seguras para cualquier persona que no sea el paciente. En el CSN autorizamos el diseño de la instalación, las dependencias y los materiales. También autorizamos el suministro de equipos que sean seguros y qué empresas lo suministran, así como la asistencia técnica», añade Ramírez. «Las dos instalaciones de protonterapia que hemos autorizado fueron para entidades de iniciativa privada: Quirón y la Clínica Universidad de Navarra. Estas dos unidades iban a ser singulares hasta que llegó la donación de la Fundación Amancio Ortega y otro equipo al Hospital Universitario Marqués de Valdecilla en Cantabria, que utilizó fondos europeos para su compra. También teníamos una previsión de terapia FLASH, pero está a la espera».

La utilización de elementos radiactivos no se limita al tratamiento del cáncer, sino que es muy amplia. En el tratamiento de ciertos cánceres también se utilizan los llamados *Gamma Knife*, sistemas de radiocirugía estereotáctica que utilizan un conjunto de fuentes de cobalto-60 para emitir rayos gamma altamente focalizados y tratar lesiones intracraneales como tumores, malformaciones vasculares y trastornos neurológicos. Estos haces convergen con extrema precisión en la zona objetivo, destruyendo las células enfermas con una mínima afectación del tejido sano circundante, lo que permite un procedimiento poco invasivo y una recuperación rápida. Estas fuentes de radiación también están sometidas a controles de calidad.

Seguir investigando es básico en este campo. «Desde la Sociedad Española de Oncología Radioterápica (SEOR) se trabaja para crear nuevas plataformas interdisciplinares y promover la investigación de esta especialidad», alega Rubio. Esta especialista también resalta que es esencial la colaboración con otras sociedades científicas para enfrentarse a los retos del futuro, como la integración de la protonterapia en el Sistema Nacional de Salud o la mejora de la radioterapia estereotáctica corporal, y aprovechar el potencial de la inteligencia artificial. «El futuro será una combinación de tecnologías, así que es necesaria una gran preparación». ■

Herramientas de IA ya se usan para optimizar etapas críticas del tratamiento, desde la planificación hasta la evaluación de la respuesta

¿Hay vida más allá de la Tierra?

Origen de la vida: límites y posible existencia en el universo

¿Estamos solos en el universo? La pregunta, tan antigua como la humanidad, ha dejado de ser solo asunto de filósofos y escritores de ciencia ficción. La astrobiología, disciplina joven en plena expansión, trata de ofrecer respuestas con rigor científico.

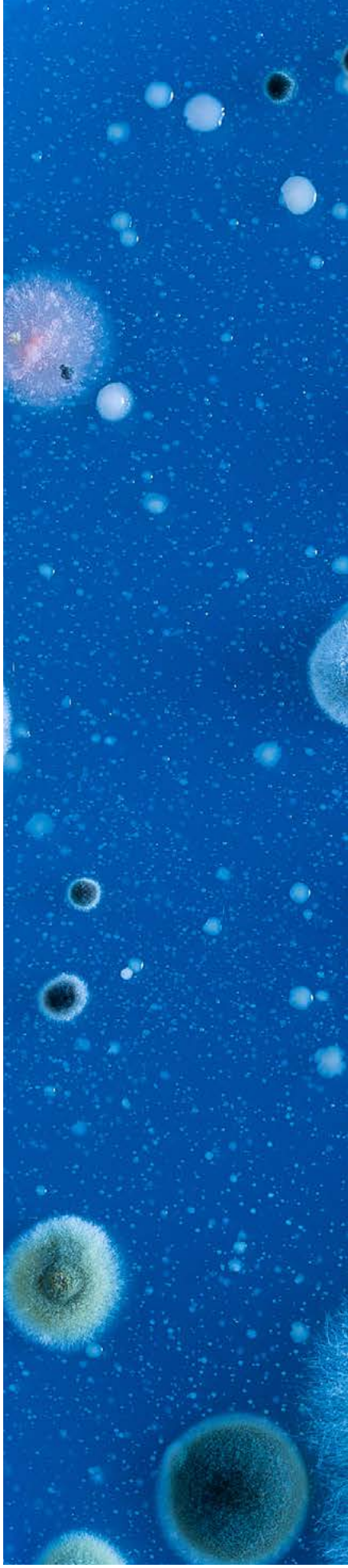
Texto: **Isabel Robles**

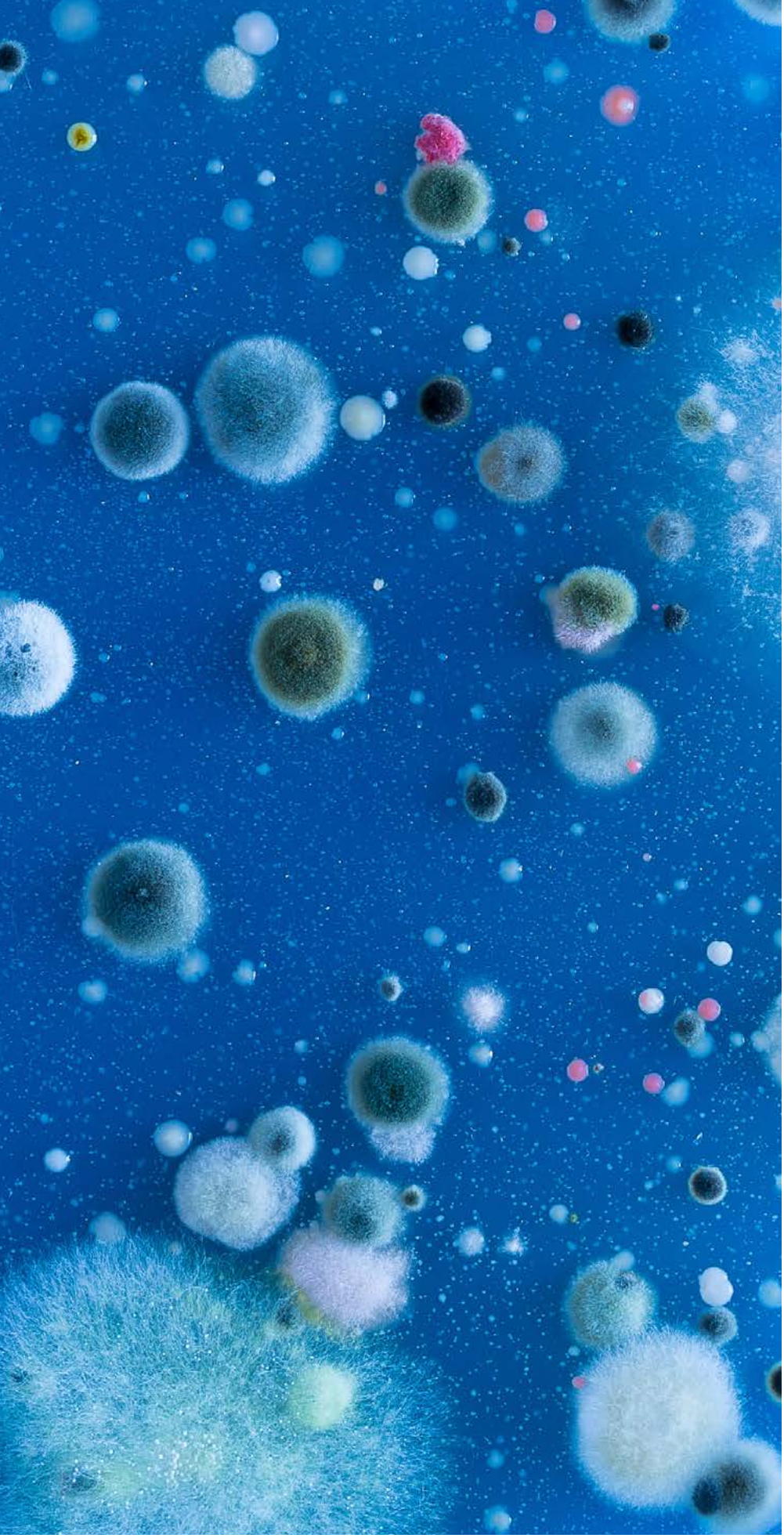
El objetivo principal de cualquier rama de la ciencia es responder a interrogantes que plantea el universo y la naturaleza. La astrobiología no es una excepción. Ciencia interdisciplinar que combina biología, química, física, geología y astronomía, explora una de las cuestiones que más han inquietado a la humanidad desde sus inicios: la vida. «Su objetivo es comprender cómo, a partir de procesos fisicoquímicos, pudieron surgir las condiciones que dieron lugar a la vida en la Tierra, y explorar la posibilidad de que exista en otros mundos», indica Eva Villaver, subdirectora del Instituto de Astrofísica de Canarias.

No obstante, es necesario reflexionar sobre las características de lo que se consideran seres vivos. «Podría parecer suficiente examinar las formas de vida terrestres y elaborar una lista de sus propiedades comunes, suponiendo que estas nos revelan lo esencial de la vida. Sin embargo, los organismos terrestres comparten muchas características que probablemente no sean fundamentales, sino heredadas de un ancestro común. Un ejemplo claro es el uso de ADN como molécula de almacenamiento de información genética. ¿Significa esto que cualquier forma de vida debe poseer ADN? En mi opinión, no necesariamente. Lo esencial es que exista una molécula capaz de almacenar la información genética para el mantenimiento y reproducción de la vida», explica Ester Lázaro, jefa del departamento de Evolución Molecular del Centro de Astrobiología (CSIC-INTA). De este modo, «una estructura puede considerarse viva si es capaz de transformar energía con base en una información genética que le permita evolucionar».

El origen de la vida

Hace unos 3800 millones de años, la Tierra era un planeta muy distinto al actual, con una intensa actividad geológica y una atmósfera compuesta principalmente por nitrógeno, dióxido de carbono, hidrógeno y metano. No obstante, el planeta reunía las condiciones necesarias para que pudiera desarrollarse la vida: era lo suficientemente grande como para retener el calor interno y permitir la tectónica de placas, contaba con atmósfera y tenía agua lí-





quida. «Esto depende de la estrella en torno a la que orbita. Para que no experimente variaciones extremas que pongan en peligro la evolución de la vida, la estrella no puede variar demasiado su energía en escalas de miles de millones de años, lo que significa que no puede ser mucho más grande que el Sol. Además, mantener una atmósfera requiere una estrella que no sea demasiado activa, que no emita grandes cantidades de altas energías en poco tiempo», afirma Villaver.

La Tierra contaba con estas condiciones y en ella ya estaban presentes muchos de los componentes químicos esenciales para el surgimiento de la vida. «Hoy en día, numerosos experimentos de laboratorio han demostrado que existen múltiples vías posibles para la formación de las moléculas básicas que componen los seres vivos. Lo que aún desconocemos es cuál –si es que fue alguna de ellas– tuvo lugar en la Tierra primitiva», indica Lázaro.

Durante los primeros centenares de millones de años, la interacción entre el agua y los minerales del manto terrestre, así como la presencia de energía en forma de luz ultravioleta, generaron condiciones propicias para la aparición de moléculas precursoras de la vida que, poco a poco, evolucionaron hasta volverse más complejas y especializarse en funciones determinadas.

Existen diversas hipótesis –como la síntesis prebiótica, la panspermia o el ARN, entre otras– que intentan explicar cómo se dio esta evolución hasta llegar a la vida celular. A pesar de que son diferentes, todas coinciden en que, en algún momento, ciertas moléculas adquirieron la capacidad de replicarse y evolucionar. «La adaptación biológica –o evolución, en términos más amplios– es el proceso mediante el cual los seres vivos cambian a lo largo del tiempo para ajustarse mejor a su entorno», explica Lázaro. «En la vida terrestre, este proceso ocurre gracias a que la información genética, contenida en el ADN, puede experimentar modificaciones que se transmiten a la descendencia. Así, se generan poblaciones

con individuos distintos entre sí, cada uno con características que pueden hacerlo más o menos apto para sobrevivir y reproducirse en determinadas condiciones ambientales. Los cambios en el ADN pueden ser pequeños, pero también existen cambios más drásticos que, en ocasiones, dan lugar a grandes innovaciones evolutivas».

Condiciones extremas

No todos los organismos han prosperado en un medio que, en principio, se consideraría apropiado, sino que algunos pueden sobrevivir en ambientes y condiciones casi incompatibles con la vida, de modo que, según Villaver, «son extremadamente útiles para entender los rangos en los que la vida podría ser posible en otros planetas». Los denominados extremófilos –la mayoría microscópicos– «no han reinventado la vida para adaptarse a estos entornos, sino que han ajustado sus proteínas, sus membranas y sus mecanismos celulares para que funcionen en condiciones que, para otros organismos, serían destructivas», añade Lázaro.

Uno de esos lugares hostiles para la vida es el río Tinto, en Huelva. Sus aguas, de color rojo escarlata y con un pH muy ácido, son ricas en metales, pero también en azufre. En este entorno, semejante al que se puede encontrar en Marte –y, por tanto, un análogo perfecto para estudiar cómo podría desarrollarse la vida en otros planetas–, la NASA y el Centro de Astrobiología han llevado a cabo una serie de investigaciones en las que han detectado microorganismos adaptados a estas condiciones. «Uno de los hallazgos más sorprendentes ha sido la detección de cianobacterias vivas y capaces de realizar la fotosíntesis a más de seiscientos metros de profundidad, en completa oscuridad y en un ambiente con escasos nutrientes», indica Lázaro. También se han detectado bacterias capaces de sobrevivir a la radiación en entornos como los reactores nucleares.

Estos descubrimientos abren la posibilidad de que, con unas condiciones semejantes, en otros planetas se hayan dado las reacciones químicas necesarias para que existan formas de vida adaptadas a medios que, desde nuestro punto de vista, son hostiles.

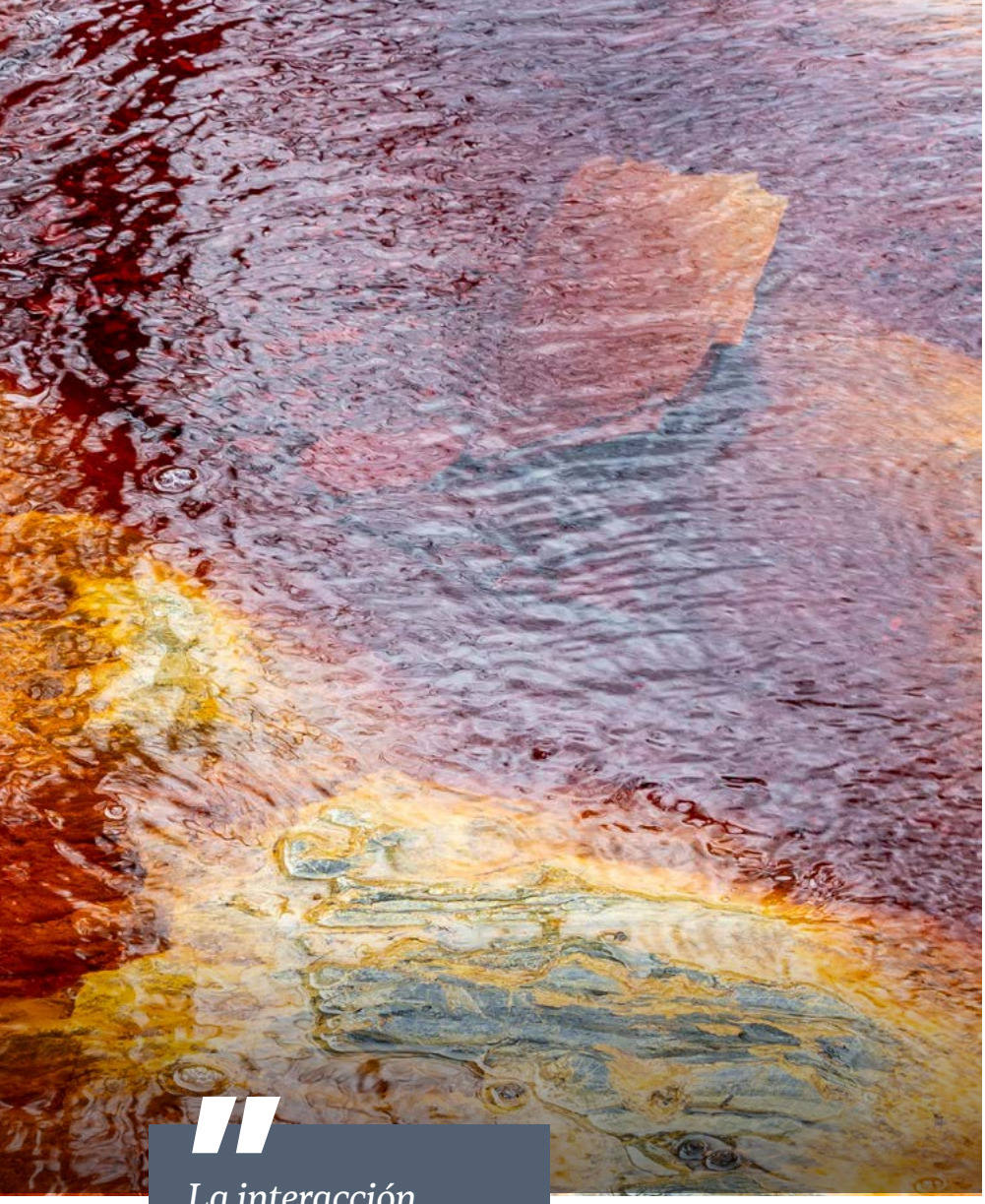
Río Tinto (Huelva). Sus condiciones, similares a las de Marte, lo convierten en el entorno perfecto para estudiar los organismos extremófilos.

> *Si la vida aparece en otros mundos, es estadísticamente más probable que lo haga en forma de microorganismos simples*

La vida en el universo

La existencia de vida en el universo cuenta con argumentos tanto a favor como en contra. Se afirma que es una cuestión de estadística: ante los cientos de trillones de planetas y lunas que existen –tanto en la Vía Láctea como en otras galaxias–, algunos reúnen las condiciones necesarias para que la vida se desarrolle; no obstante, no se han encontrado biomarcadores y son muchos los factores que deben coincidir en tiempo y en espacio para que surja la vida.

El primer requisito es que el planeta se encuentre dentro de la zona habitable de su estrella. Esta zona es «la región en torno a una estrella donde el agua puede existir en forma líquida en la superficie de un planeta. Depende de la cantidad de energía que recibe de la estrella, por lo que tiene una dependencia tanto de la distancia a la que se encuentra la estrella como de su tamaño», explica Villaver. Estar en la zona habitable no garantiza la existencia de vida, pero es una condición ne-



Eva Villaver / Foto: Inés Bonet

Algunos organismos pueden sobrevivir en ambientes y condiciones casi incompatibles con la vida, de modo que son extremadamente útiles para entender los rangos en los que la vida podría ser posible en otros planetas

La interacción entre el agua y los minerales del manto terrestre generaron las condiciones propicias para la aparición de moléculas precursoras de la vida

cesaria para que puedan darse procesos biológicos similares a los que ocurren en la Tierra.

Además, se necesita la suficiente diversidad de elementos químicos que den comienzo a la vida –vida que, como prueban los organismos extremófilos, es más resistente de lo que se creía–. El hallazgo de moléculas orgánicas en meteoritos demuestra que esos elementos existen en el cosmos de manera abundante.

«El meteorito ALH84001, encontrado en la Antártida y originario de Marte, generó un gran debate en los años noventa al sugerirse que contenía fósiles de bacterias marcianas, hipótesis que hoy se considera poco probable. Más recientemente, los rovers Curiosity y Perseverance han encontrado moléculas orgánicas en la superficie marciana que, aunque no prueban la existencia de vida, podrían ser la base a partir de la cual esta podría haberse desarrollado en el pasado», explica Lázaro. Además, fuera del sistema solar también se han encontrado otras moléculas que plantean varias incógnitas. «En 2020 se anunció la posible detección de fosfina –sustancia asociada a procesos biológicos en la Tierra– en la atmósfera de Venus, aunque estudios posteriores han puesto en duda esta observación. Más recientemente, se ha informado de la presencia de dimetil sulfuro (DMS) en la atmósfera de un exoplaneta, una molécula que en la Tierra está vinculada a la actividad microbiana marina. Sin embargo, no podemos asegurar que su origen fuera de la Tierra sea biológico», admite Lázaro.

Gracias a los biosensores –dispositivos que combinan elementos biológicos con tecnología–, se pueden detectar biofirmas o señales de vida en otros planetas. Estos biosensores ya se utilizan para analizar la superficie de Marte y podrían usarse en misiones a lunas como Europa. En concreto, este satélite de Júpiter cuenta con la presencia de agua, tanto en forma de hielo como en la

Radiaciones cósmicas

La radiación cósmica está formada por partículas de alta energía –principalmente protones, núcleos atómicos como partículas alfa y núcleos pesados– que provienen del Sol, del espacio interestelar y de fenómenos como supernovas. Al alcanzar a los seres vivos, este tipo de radiación puede producir roturas en el ADN y dañar proteínas y membranas celulares.

En la Tierra, la atmósfera y el campo magnético protegen a los seres vivos, pero en el espacio este tipo de radiación supone uno de los mayores desafíos para la vida. En los vuelos espaciales tripulados, «los astronautas quedan expuestos a los rayos cósmicos y, durante las erupciones solares, los eventos de partículas son capaces de generar dosis potencialmente letales en cuestión de horas. Aunque existen materiales que atenúan parte de esta radiación, un blindaje completo resulta inviable por su peso, lo que obliga a diseñar hábitats y vehículos con zonas de refugio y a limitar la duración de las misiones. Estos riesgos condicionan la planificación y afectan a la viabilidad de la exploración humana del espacio profundo», explica la subdirectora del Instituto de Astrofísica de Canarias, Eva Villaver.

Las formas de vida que podrían encontrarse fuera de la Tierra dependerán tanto de las condiciones ambientales como del tiempo durante el cual haya actuado la evolución

de un océano líquido bajo esa capa. En estas condiciones, podrían encontrarse compuestos que indiquen actividad biológica, tal como ocurre en la Tierra, donde existen organismos que habitan ambientes similares. En esos entornos, la energía no proviene del Sol, sino de fuentes hidrotermales y reacciones químicas. «La certeza solo la tendremos el día en que logremos encontrar una prueba concreta. Por eso, la búsqueda resulta tan relevante: porque, en este momento,

Imagen tomada por Curiosity del Gillespie Lake Member, en el valle Paz de Marte / NASA JPL-Caltech MSSS

no contamos con ninguna seguridad absoluta, solo con hipótesis y posibilidades que guían nuestra exploración. Encontrar vida en otro lugar, además de la Tierra, nos permitiría afirmar con absoluta certeza que las posibilidades de vida en el universo son infinitas», indica Villaver.

No obstante, las formas de vida que podrían encontrarse fuera de la Tierra dependerán tanto de las condiciones ambientales como del tiempo durante el cual haya actuado la evolución. «Si tomamos como referencia nuestro propio planeta, veremos que durante la mayor parte de su historia la vida estuvo representada exclusivamente por microorganismos. La aparición de formas más complejas fue un proceso lento y dependiente de circunstancias muy específicas, que quizás no se hayan repetido en otros rincones del universo», plantea Lázaro. «Si la vida surge en otros mundos, es estadísticamente más probable que lo haga y permanezca en formas microbianas simples, dado que estas requieren menos condiciones específicas y son más resilientes a entornos extremos», añade Villaver.

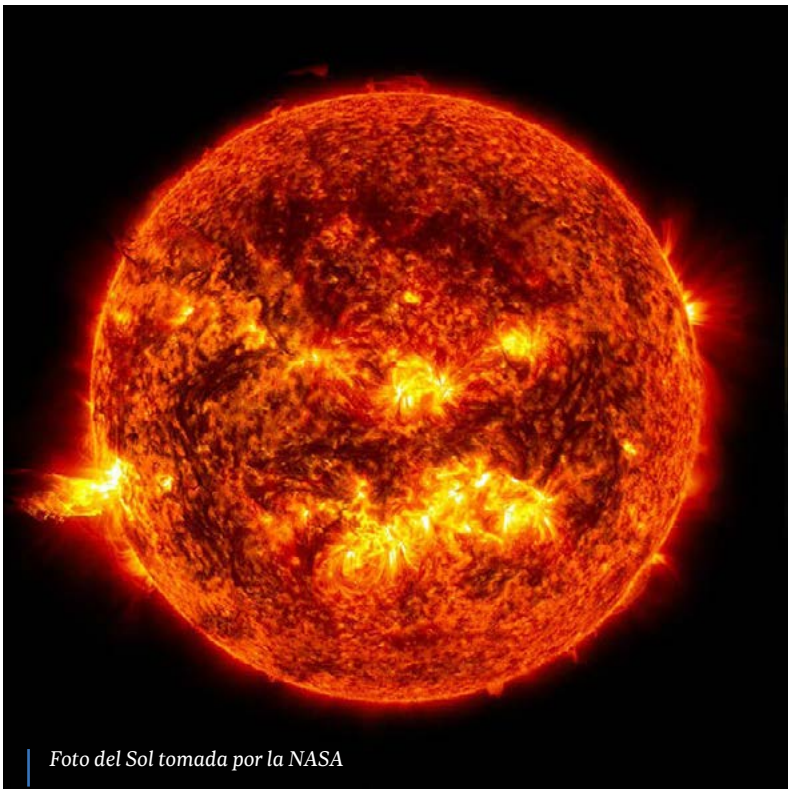


Foto del Sol tomada por la NASA

¿El fin de la vida?

La vida en la Tierra está íntimamente ligada al Sol, y su evolución determina el futuro del planeta. «En los próximos 1200 millones de años, como consecuencia de un cambio gradual en la composición química del núcleo del Sol, se producirá un aumento de la energía que incide sobre nuestro planeta, lo que tendrá consecuencias catastróficas para la atmósfera, que se convertirá en algo similar a la de Venus o desaparecerá en su mayor parte», explica Eva Villaver, subdirectora del Instituto de Astrofísica de Canarias. Esta evolución provocará que los planetas del sistema solar modifiquen sus órbitas, aumentando el riesgo de que choquen entre sí. «A medida que el Sol crece en tamaño para convertirse en gigante, lo más probable es que los planetas internos acaben siento engullidos por él. Es el futuro que les espera a Mercurio y Venus en la primera fase de gigante roja y el destino al que no podrán escapar la Tierra y Marte en el momento en que la estrella se convierta en gigante por segunda vez», añade.

Además, también existe el problema de la tectónica de placas: «desde que el planeta se formó, se ha enfriado, y su interior cada vez es más viscoso. A medida que la viscosidad del manto terrestre aumenta y la parte más alta de la litosfera se hace más gruesa, la tectónica de placas se vuelve problemática. En algún momento en los próximos mil millones de años, cesará la tectónica de placas y, con ella, la regeneración atmosférica y los ciclos del carbono», explica Villaver. «La única esperanza a largo plazo parece ser la huida. Otra posibilidad, sin embargo, es que la vida encuentre una segunda oportunidad cuando la estrella se transforme en una enana blanca, ofreciendo un nuevo escenario para su desarrollo».

La astrobiología en España

España es un actor destacado en el ámbito de la investigación espacial, tanto por su infraestructura científica como por su participación en misiones internacionales. Investigadores españoles colaboran con agencias como la ESA, la NASA y la JAXA en el desarrollo de instrumentación científica y análisis de datos para misiones espaciales. Centros como el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), el Centro de Astrobiología (CAB), el IFCA de Cantabria o el Instituto de Ciencias Espaciales de Cataluña contribuyen de forma decisiva al avance de la astrofísica y la astrobiología.

El Centro de Astrobiología (CAB), creado como un centro mixto entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), fue el primer centro de fuera de Estados Unidos asociado al NASA Astrobiology Institute. Desde entonces, trabaja en múltiples áreas entre las que destacan el estudio de microorganismos en ambientes extremos que simulan las condiciones de otros planetas, el desarrollo de biosensores para detectar moléculas que podrían indicar la presencia de vida, la observación en tiempo real de cómo se produce la evolución biológica o la investigación sobre química prebiótica y origen de la vida. Del mismo modo, también ha contribuido al desarrollo de instrumentos que están operando en Marte, como las estaciones meteorológicas REMS y MEDA, a bordo de los rovers Curiosity y Perseverance respectivamente.

Por su parte, el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) gestiona dos de los observatorios más prestigiosos del mundo: el Observatorio del Teide (Tenerife) y el Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma), ambos situados en emplazamientos con cielos excepcionalmente claros y estables.

Destaca su participación en el desarrollo de instrumentación para misiones espaciales de la ESA y su gestión conjunta de la Estación Óptica de Espacio Profundo (OGS), utilizada para probar comunicaciones láser con satélites. Del mismo modo, en el IAC se abordan estudios de fenómenos de altísima energía relacionados con el *big bang* y los agujeros negros, el origen de los rayos cósmicos y gamma, la formación y evolución de las galaxias los ciclos de vida de las estrellas, la física en condiciones de gravedad extrema, el comportamiento de los campos magnéticos del Sol, así como la detección y caracterización de planetas similares a la Tierra en estrellas cercanas.

Además, España liderará próximamente la misión ARRAKIHS, la primera del Programa Científico de la ESA con liderazgo nacional, lo que confirma su papel creciente en la exploración espacial y la astrobiología.

Gran Telescopio Canarias / Foto: Dani López

"Si algún día logramos descubrir una forma de vida que no comparta nuestra historia evolutiva, podríamos por fin entender qué es lo esencial, lo universal, lo inevitable en la vida

Instituto de Astrofísica de Canarias / Foto: Dani López

Esther Lázaro

Hoy en día, numerosos experimentos de laboratorio han demostrado que existen múltiples vías posibles para la formación de las moléculas básicas que componen los seres vivos. Lo que aún desconocemos es cuál –si es que fue alguna de ellas– tuvo lugar en la Tierra primitiva

¿Dónde podrían encontrarse? Además de en las lunas heladas de Júpiter y Saturno, Marte también es buen candidato. Los indicios sobre la existencia de agua salobre y algunas moléculas orgánicas encontradas indican que podrían darse procesos biológicos en el planeta rojo. «La búsqueda de vida más allá de la Tierra se organiza principalmente en dos aproximaciones complementarias. La primera se centra en el estudio *in situ* de los cuerpos de nuestro sistema solar, a través del envío de sondas robóticas a lugares cercanos como Marte, o las lunas de los planetas gigantes como Europa o Encélado para analizar la composición del terreno, la atmósfera y, en algunos casos, el subsuelo en busca de señales biológicas. La segunda aproximación se orienta hacia el estudio de mundos lejanos, los llamados exoplanetas, empleando telescopios y técnicas de observación avanzadas que nos permiten caracterizar a distancia sus propiedades físicas: tamaño, masa, temperatura, atmósfera o incluso la presencia de moléculas en sus atmósferas», señala Villaver.

Sin embargo, este no es el único desafío al que se enfrenta la astrobiología. «Quizá el reto más profundo sea encontrar otro ejemplo de vida con un origen distinto al terrestre. Si algún día logramos descubrir una forma de vida que no comparta nuestra historia evolutiva, podríamos por fin entender qué es lo esencial, lo universal, lo inevitable en la vida. Quizá entonces podríamos empezar a responder no solo cómo es la vida, sino qué significa», concluye Lázaro. «La astrobiología no es solo una ciencia que busca vida en otros mundos, sino una forma de mirar con asombro la vida en el nuestro». ■

Geoingeniería

Alternativas para agilizar la carrera contra el cambio climático

El calentamiento global continúa un ascenso que la comunidad científica se esfuerza por controlar desde diferentes flancos. A la reducción de gases de efecto invernadero, el fomento de energías renovables y el control del consumo, acciones en las que Gobiernos, instituciones y población civil llevan años trabajando, se suma un nuevo elemento que, no exento de debate, podría ayudar a ganar tiempo en la lucha contra el cambio climático: las tecnologías de intervención en el clima.

Texto: **Ana Fernández**

La Organización Meteorológica Mundial sitúa a 2024 como el año más caluroso hasta la fecha. El aumento de la temperatura media mundial respecto a la era preindustrial (1850-1900) se estimó en 1,55 °C, con un margen de error de ± 0,13 °C, lo que significa que, aunque no puede afirmarse con total certeza que se haya rebasado de forma definitiva la barrera de 1,5 °C, por primera vez se ha rozado peligrosamente. Este límite fue fijado en el Acuerdo de París en 2016, y los 196 países firmantes se comprometieron a evitar que fuese superado para mediados de siglo. Aunque la evidencia hace pensar que la situación actual dificulta mucho su consecución, los expertos aseguran que este posible sobrepaso puntual no significa que todo esté perdido. A largo plazo, las cifras aportan un poco más de margen, y el índice de calentamiento global anual se fija en torno a 1,34 y 1,41 °C. Pero evitar que continúe al alza es un imperativo y la comunidad científica cada vez coincide más en que las tecnologías de intervención climática son un complemento necesario a las tareas de reducción de emisiones.

En este contexto, aparecen dos frentes de acción principales: uno, orientado a la captura y almacenamiento de CO_2 (CCS por sus siglas en inglés), y otro, que propone la alteración de la radiación solar que llega a la superficie (SRM).

Descarbonización industrial

Según datos del Global Carbon Budget, las emisiones globales de carbono se encuentran actualmente cerca de las cuarenta gigatoneladas y mantienen una tendencia creciente, contraria al objetivo de la neutralidad de emisiones y motivada, entre otras cosas, por el aumento demográfico. Aunque existen medidas en marcha, los datos evidencian que no son suficientes y aconsejan valorar técnicas artificiales de descarbonización que complementen la transición a fuentes de energía renovables.

En este escenario, la captura y almacenamiento geológico de CO_2 (CCS-*carbon capture and storage*) es la opción más madura y extendida. La estrategia consiste en capturar el CO_2 generado por instalaciones industriales antes de que sea liberado a la atmósfera y, posteriormente, inyectarlo en formaciones geológicas profundas, normalmente acuíferos salinos situados a más de ochocientos metros de profundidad, donde el gas adquiere estado supercrítico, lo que facilita su almacenaje de manera estable y segura. El primer proyecto de este tipo se puso en marcha en 1996 en Sleipner (mar del Norte, Noruega) y desde entonces se han desarrollado múltiples iniciativas, especialmente, en regiones con intensa actividad industrial. Este enfoque se considera crucial para sectores de difícil descarbonización, como el del cemento, el acero o los fertilizantes, responsables en conjunto de cerca del 20 % de las emisiones globales y cuya descarbonización completa es imposible solo recurriendo al uso de energías renovables.

> *Según el informe Copernicus State of the Climate in Europe 2024, Europa es el continente que más rápido se calienta. Desde la década de los ochenta, ha registrado un aumento de la temperatura dos veces más rápido que la media global.*

Foto: © *Residencia de Estudiantes*

Víctor Vilarrasa, profesor de investigación del CSIC en el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA-CSIC-UIB), trabaja en el desarrollo y consolidación de estas técnicas de almacenaje de CO_2 en acuíferos salinos profundos. Afirma que «no existe alternativa a capturar y almacenar bajo tierra si queremos llegar a la neutralidad climática», pero «con la tecnología y conocimiento actuales, es posible lograr altos niveles de descarbonización que ayuden a frenar los efectos del cambio climático». Los proyectos actuales alcanzan una capacidad de captura de cuarenta millones de toneladas de CO_2 al año, aunque, en su opinión, «el objetivo a futuro es ambicioso y se considera factible multiplicar esa capacidad por doscientos, alcanzando unas ocho gigatoneladas al año para mediados de siglo».

Para ello, proyectos como los liderados por el profesor Vilarrasa buscan reducir al máximo los posibles riesgos derivados de esta técnica, como la sismicidad inducida o las fugas que, aunque escasas, siguen preocupando a la opinión pública. Según explica, se sabe con certeza que el mejor lugar para realizar estas inyecciones con seguridad es donde se encuentren «areniscas, formaciones que sean permeables y porosas para que no se produzca sobrepresión que dé lugar a eventos sísmicos». Además, para reducir el riesgo de fugas, es importante evitar las fallas terrestres y, aunque será más complicado a medida que las zonas inyectadas vayan aumentando, el control y la vigilancia adecuados podrían garantizar la seguridad de estos almacenes.

> *Actualmente, el coste de este proceso está en torno a los 70-80 euros por tonelada almacenada, de los cuales la mayor parte proviene de la captura de CO2. Ante la subida sostenida del precio de los derechos de emisión en el mercado europeo –que se mueve ya en niveles comparables o superiores–, cada vez más compañías grandes emisoras de carbono están apostando por financiar proyectos propios de captura y almacenamiento.*

Aunque mucho más compleja, otra alternativa para la descarbonización que se estudia actualmente es la captura del CO_2 que ya está liberado en la atmósfera. Algo que, según Víctor Vilarrasa, profesor de investigación del CSIC en el Instituto Mediterráneo de Estudios Avan-zados (IMEDEA-CSIC-UIB, se tendrá que valorar tarde o temprano para lograr la descarbonización deseada. No obstante, advierte que «esta variable requiere de mucha más energía (entre 5 y 10 GJ por tonelada de CO_2 según la International Energy Agency) y recursos que la captura industrial, aunque hay diversas investigaciones en marcha para seguir avanzando en optimizarla».

Fertilización oceánica

En los océanos se abre también un amplio campo de actuación con potencial para contribuir a la eliminación de dióxido de carbono de la atmósfera. El mar almacena carbono en una capacidad cincuenta veces superior a la de la atmósfera y entre quince y veinte veces mayor que plantas y suelos terrestres. Dada esta magnitud, explorar mecanismos que refuercen la función natural se plantea hoy como estrategia prometedora para avanzar hacia la descarbonización.

Entre las propuestas más estudiadas se encuentra la fertilización oceánica con hierro, que busca replicar un proceso natural. Tras erupciones volcánicas o grandes tormentas de polvo, el aporte de hierro mineral al agua marina ha generado proliferaciones de fitoplancton, capaz de absorber grandes cantidades de CO_2 durante la fotosíntesis. Al morir o ser devorado, parte de este plancton se hunde en aguas profundas, transportando carbono a zonas donde permanece almacenado. La técnica propone intensificar este mecanismo mediante la adición controlada de hierro en regiones oceánicas pobres en nutrientes.

Los experimentos realizados desde los años noventa han confirmado que el hierro estimula el crecimiento de estos organismos. Sin embargo, persisten incertidumbres sobre su eficacia real como

método de secuestro de carbono a largo plazo, ya que las partículas añadidas se oxidan y precipitan con rapidez, y la cantidad necesaria para lograr este objetivo aún no está del todo clara. Para que el almacenamiento sea duradero, el carbono fijado debe alcanzar profundidades superiores a 500-1000 metros, pasando el horizonte de profundidad de la termoclina principal para evitar que la mezcla invernal le haga regresar a la atmósfera.

Con el fin de avanzar en esta línea, la organización Exploring Ocean Iron Solutions (ExOIS) promueve actualmente un proyecto piloto previsto para ejecutarse en 2026 en el Pacífico nororiental. La iniciativa pretende fertilizar un área de hasta 10 000 km² para evaluar cuánta captura de CO_2 es posible lograr y qué consecuencias tendría sobre los ecosistemas.

Aunque la previsión de resultados es positiva, existen dudas y escepticismos basados en los posibles impactos ecológicos derivados. El exceso de nutrientes

Marco legislativo y ético necesario

Resulta evidente que este tipo de técnicas irán ganando terreno en la gestión medioambiental, pero no se debe obviar que su puesta en marcha tiene consecuencias globales y, en muchos casos, irreversibles, por lo que sentar un marco legal y ético en el que encajar estas tecnologías resulta imprescindible para evitar consecuencias indeseadas de alcance geopolítico. De hecho, en 2009, se formularon los llamados Principios de Oxford, con el objetivo de fijar los condicionantes éticos y de gobernanza que deben acompañar cualquier intento de desplegar estas tecnologías a gran escala.

Los principios son los siguientes:

1. Geoingeniería regulada como un bien público: aunque el sector privado pueda participar en estas técnicas, su regulación debe realizarse siempre atendiendo a un interés público.
2. Participación pública en la toma de decisiones sobre la geoingeniería: los investigadores deben notificar y consultar, en la medida de lo posible, a las personas que se vayan a ver potencialmente afectadas por las técnicas que se quieren desarrollar.
3. Divulgación de la investigación en geoingeniería y publicación abierta de los resultados: se debe promover y facilitar la comprensión de los riesgos y beneficios derivados de estas técnicas entre la población civil.
4. Evaluación independiente de los impactos: la evaluación de los impactos derivados de estas técnicas tiene que llevarse a cabo por una entidad independiente de la que ha realizado la investigación para garantizar la objetividad.
5. Gobernanza antes del despliegue: las decisiones sobre su puesta en marcha deben tomarse únicamente con estructuras de gobernanza sólidas. ■

en el océano puede alterar la estructura del fitoplancton, favorecer la aparición de especies de algas nocivas y reducir el oxígeno en profundidad, necesario para el resto de vida marina, generando las llamadas «zonas muertas». Además, algunos estudios sugieren que la fertilización podría estimular la producción de otros gases de efecto invernadero como el óxido nitroso, con un efecto climático contraproducente. Por ello, los expertos insisten en que, aunque la técnica resulta prometedora como complemento, no sustituye en ningún caso la reducción de emisiones, y aseguran que es necesaria una mayor inversión en investigación y la creación de marcos regulatorios que aseguren que la ejecución de estas técnicas se realizan con garantías éticas.

Inyecciones en la estratosfera. Imitando a la naturaleza

En cuanto a las técnicas de SRM (*solar radiation modification*), una de las líneas de investigación más antiguas para intentar disminuir la temperatura terrestre como complemento a la reducción de emisiones se basa en la búsqueda de métodos que aumenten el albedo de la atmósfera, es decir, su capacidad de reflexión. Para lograrlo, la alternativa con más peso pasa por recrear los efectos que se aprecian cuando se produce una erupción volcánica en los trópicos, como la que tuvo lugar en 1991 en el Pinatubo (Filipinas), en la que las emisiones de dióxido de azufre provocaron una reducción de la temperatura terrestre estimada entre 0,14 y 0,37 °C en el año siguiente. En estos casos, las partículas de azufre alcanzan la estratosfera. Ahí sufren una reacción química que las transforma en nubes que se dispersan por toda la superficie terrestre gracias a las corrientes de aire atmosféricas y reflejan la radiación solar de nuevo hacia el espacio. La idea central de esta propuesta es, por tanto, mantener el planeta en un estado de «posterupción» permanente, mediante la liberación anual de millones de toneladas de aerosoles de este tipo en la estratosfera. El efecto sería una reducción temporal de

"Tras los atentados del 11-S, la suspensión total del tráfico aéreo en Estados Unidos durante tres días permitió medir un fenómeno muy particular: sin estelas visibles en el cielo, los climatólogos registraron un aumento importante en la amplitud térmica diaria. Así, quedó de manifiesto el fuerte impacto que tienen las emisiones de aerosoles en las variaciones de temperatura terrestre.

Juan A. Añel, profesor titular de Física de la Tierra de la Universidade de Vigo e investigador del laboratorio EPhysLab, trabaja para restar incertidumbre sobre las consecuencias de estos procesos, y explica que la alternativa aún está lejos de ser completamente garante. En su opinión, la reducción de la radiación solar solucionaría únicamente uno de los problemas derivados del cambio climático –el del calentamiento terrestre–, pero no actuaría sobre otros impactos, como la acidificación de los océanos: «es como tomar aspirina para una enfermedad grave: se alivia el síntoma, pero no se cura la causa», resume.

Además, asegura que aún no existe consenso científico sobre el efecto real que tendría sobre la temperatura media global, y no es posible conocer con exactitud qué cantidad de partículas se necesitarían para lograr un resultado suficiente, aunque sí se sabe que la inyección debería ser anual e indefinida, con la complejidad técnica y de recursos que eso supone. «A nivel planetario, está bastante claro que se dañaría la capa de ozono, retrasando su recuperación, y podría interrumpir la circulación normal de los vientos en altura, crítica para el planeta. A nivel regional, sabemos que el uso de estas técnicas podría afectar más a unas zonas del planeta que a otras, generando desigualdades. Por otro lado, desde un punto de vista más práctico, sabemos que el potencial de generación de energía solar fotovoltaica disminuiría. […] Sobre el impacto en la precipitación existe consenso en que, en términos globales, se crearía un planeta más seco, aunque los cambios serían regionales y, por tanto, desiguales», argumenta.

la temperatura superficial, pero no hay suficiente conocimiento sobre su viabilidad real.

A los desafíos que la comunidad científica debe hacer frente se suma un reto tecnológico. Para lograr un enfriamiento efectivo son necesarios millones de toneladas de azufre, inyectadas a alturas por encima de los veinte kilómetros sobre los trópicos, y la realidad es que, actualmente, no existe ningún medio capaz de realizar tal hazaña. «Las cantidades de partículas que habría que dispersar son enormes, estamos hablando del orden de varios millones de toneladas anualmente. Está claro que ningún globo o técnica similar, como se ve en ciertas noticias, es capaz de trasladar tales pesos a más de 20 km de altura. La única solución es utilizar aviones, pero los capaces de cargar grandes pesos no llegan tan alto y los pocos que llegan no son capaces de transportar cargas pesadas como la necesaria en este caso. Existe algún concepto previo de cómo deberían ser estos aviones, pero, de momento, no existen. Tendrían que ser desarrollados y construidos todavía, lo que llevaría varios años», explica Juan A. Añel, profesor titular de Física de la Tierra de la Universidade de Vigo e investigador del laboratorio EPhysLab.

> *En los próximos tres años, el equipo del EPhysLab, con Juan A. Añel, estará envuelto en el proyecto SARTRE, financiado por la Agencia Estatal de Investigación, con el que pretenden reducir la incertidumbre sobre el impacto de las emisiones de las grandes erupciones volcánicas.*

Con el objetivo de salvar estas dificultades, en los últimos años se han planteado alternativas al azufre para realizar inyecciones, como la calcita o el polvo de diamante. Sin embargo, su evaluación científica es muy limitada, aunque creciente, y las incertidumbres son aún mayores. Aunque escéptico, Añel señala la necesidad de seguir trabajando para que, poco a poco, vayan eliminando las incógnitas que empañan este tipo de métodos: «No es posible calificar cualquier técnica de intervención sobre el clima como segura. Una cuestión distinta es si podemos enfrentarnos a un punto donde algún tipo de valoración de coste-beneficio haga caer la balanza hacia el lado de la necesidad inevitable de la intervención climática». Para ello, explica, la única solución es aumentar la financiación de la investigación. ■

Alfredo Poves Paredes
Catedrático Emérito de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid

«Me satisface que, tras apenas una o dos generaciones, la física nuclear española haya pasado de casi no existir a ser muy bien valorada en el mundo»

De Zaragoza a Estrasburgo, y de la Autónoma de Madrid a los principales laboratorios internacionales: la carrera de Alfredo Poves ha estado marcada por la búsqueda constante de la excelencia en la docencia y la investigación. Maestro de varias generaciones de físicos nucleares, pionero en el estudio del modelo de capas y en la colaboración internacional, su trabajo ha contribuido a que la física nuclear española alcance reconocimiento internacional. Con serenidad y rigor, reflexiona sobre su trayectoria, los retos del presente y las oportunidades que abre el futuro de esta disciplina.

Texto: **Luis Tejedor**

Hijo de un ingeniero de Caminos, ¿no le apeteció seguir la misma senda y dar gusto a su padre?

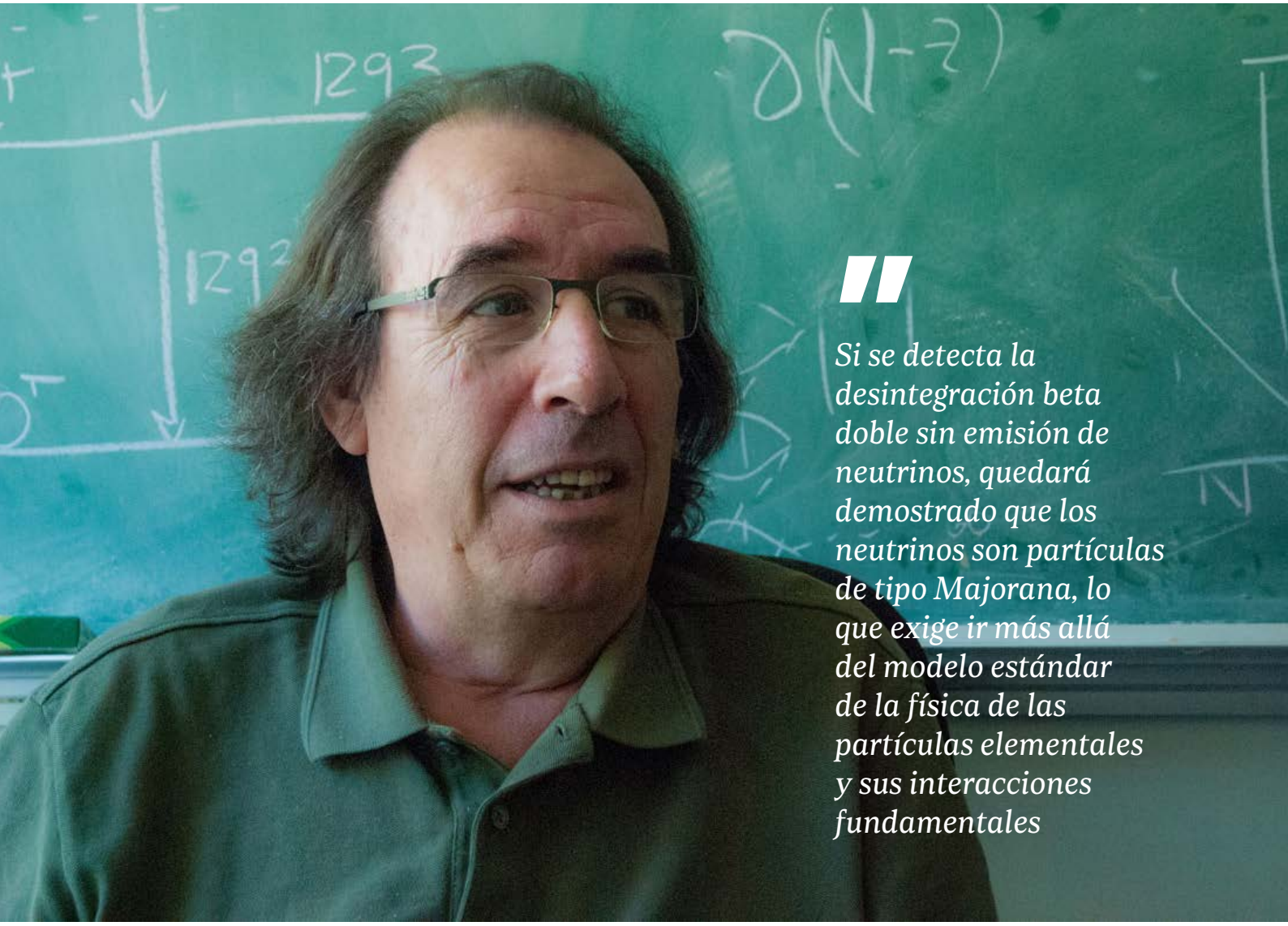
No me hubiera importado, pero, por alguna razón que he olvidado, preferí la física, una disciplina más básica y cercana a mis intereses difusos de aquellos años.

Tras el férreo ambiente de su bachillerato, que usted ha descrito en ocasiones, es de suponer que sus tiempos universitarios en Zaragoza fueron un respiro de libertad…

Sin duda. Pero más que por el ambiente del bachillerato, fue por la general inepcia de los profesores del colegio religioso en el que estudié. Mis recuerdos de Zaragoza son excelentes: un clima intelectual y político muy motivador, buenos profesores y compañeros, algunos de los cuales son amigos de por vida.

Después llegó el doctorado en la Universidad Autónoma de Madrid y su estancia postdoctoral en Estrasburgo. ¿Cómo marcó su trayectoria científica esa etapa en Francia?

Fue el momento fundamental de mi carrera. A pesar de que el Departamento de Física Teórica de la UAM estaba a la vanguardia de la física en España en ese momento, el Centro de Investigaciones Nucleares de Estrasburgo (CRN) era puntero de física nuclear en el mundo. Tuve un gran maestro (y también amigo), Andrés Zuker, que me enseñó casi todo lo que sé. Junto con Étienne Caurier (también entrañable amigo), formamos la colaboración SM² (Strasbourg-Madrid, Shell-Model) cuyos hallazgos, además del placer intelectual que nos han proporcionado, han tenido un impacto notable en la comunidad de física nuclear. En cierto modo, forzamos un cambio de paradigma hacia una visión más microscópica de un sistema tan complejo como el núcleo atómico.



"Si se detecta la desintegración beta doble sin emisión de neutrinos, quedará demostrado que los neutrinos son partículas de tipo Majorana, lo que exige ir más allá del modelo estándar de la física de las partículas elementales y sus interacciones fundamentales

La colaboración Estrasburgo-Madrid en el modelo de capas ha sido clave durante décadas. ¿Qué destacaría de ese trabajo entre instituciones?

La puesta en común de competencias diferentes y el intercambio de postdoctorandos entre las dos instituciones. Ahora, la colaboración se ha ampliado a la Sociedad para la Investigación de Iones Pesados (GSI), en Darmstadt, y a las universidades de Barcelona y Padua. Otro aspecto importante es la intensa interacción con numerosos grupos experimentales de los laboratorios más importantes del mundo.

Usted contribuyó al estudio de núcleos deformados y superdeformados, y aclaró la aparición de islas de inversión en neutrones. ¿Qué significado tienen estos hallazgos para el conocimiento del núcleo atómico?

Me temo que la respuesta tiene que ser algo técnica. Los modelos de la estructura del núcleo habían utilizado hasta entonces la dicotomía entre comportamientos semejantes a los de los electrones en el átomo o a los de una gota cuántica de neutrones y protones. Los núcleos en las islas de inversión deberían pertenecer al primer supuesto y, en realidad, lo hacen al segundo. En su día dimos una explicación microscópica unificada de ambos comportamientos y, posteriormente, la reformulamos en términos de ciertas simetrías cuánticas de la interacción nuclear. Creo que es de lo mejor que hemos hecho.

Su investigación también aborda las desintegraciones beta y beta doble, incluido el caso sin neutrinos. ¿Cuál es su relevancia en la física actual y futura?

Si se detecta la desintegración beta doble sin emisión de neutrinos, quedará demostrado que los neutrinos son partículas de tipo Majorana, lo que exige ir más allá

> *El modelo de capas nuclear con mezcla de configuraciones a gran escala continuará proporcionando la mejor descripción de estos núcleos y, en general, la de todos*

> *Siempre he buscado una cierta excelencia y no causar daño a nadie*

del modelo estándar de la física de las partículas elementales y sus interacciones fundamentales. Pero, para extraer la información sobre las masas de los neutrinos tras una eventual detección de esas desintegraciones, y para conocer cuáles son las vidas medias esperadas de esos procesos, es necesario tener un conocimiento preciso de las propiedades de los núcleos que participan en ellos. Y ahí es donde entramos nosotros.

En un momento en que la frontera de la carta nuclear se expande, ¿qué desafíos y oportunidades ve en el modelo Shell para describir núcleos alejados del valle de estabilidad?

Creo que el modelo de capas nuclear con mezcla de configuraciones a gran escala continuará proporcionando la mejor descripción de estos núcleos (y, en general, de todos los núcleos).

¿Qué aprendizaje destacaría de su doble faceta como gestor académico y científico?

Mi periodo como vicerrector de la UAM fue breve, intenso y apasionante. Éramos un equipo muy sólido (y a veces un poco ingenuo), pero pusimos las bases que han hecho de la UAM una universidad prestigiosa en España y en el mundo. Los equipos rectorales posteriores fueron clave para desarrollar las políticas que nos han llevado a donde estamos hoy.

En cuanto a la Comisión Nacional Evaluadora de la Actividad Investigadora, mis sensaciones son agridulces. Acepté el puesto porque pensaba que sus evaluaciones habían supuesto un revulsivo crucial para la mejora de la investigación en la universidad española. Plan-

teé una serie de iniciativas para reactivar esa función, que fueron aceptadas por las autoridades. Pero, al poco, cambiaron las autoridades y sobrevino una crisis económica que dejó todos mis planes en papel mojado. Aguanté, gestionando lo que ya existía, y me fui discretamente cuando buenamente pude.

¿Cómo valora su ingreso en la Academia Europea y Outstanding Referee de la Sociedad Americana de Física?

Con enorme orgullo. Me satisface que, tras apenas una o dos generaciones, la física nuclear española haya pasado de casi no existir a ser muy bien valorada en el mundo.

¿Qué le motivó a comprometerse con la enseñanza universitaria?

Me gustó enseñar desde muy joven, cuando daba clases particulares. Mi entorno profesional ha sido siempre la universidad, y la enseñanza constituye el elemento básico de su actividad junto con la investigación. He disfrutado mucho con la docencia y espero que mis alumnos también lo hayan hecho (al menos, en ocasiones).

> *Hay en marcha investigaciones muy interesantes que pueden expandir drásticamente el ámbito de aplicación de la teoría nuclear*

Ha formado a múltiples generaciones en física teórica nuclear. ¿Ha percibido cambios en el perfil de las sucesivas hornadas de estudiantes que pasaron por sus clases?

Contrariamente a los lamentos que escucho a veces –«cualquier tiempo pasado fue mejor»–, los cambios han sido positivos. Todos los años he tenido el placer de trabajar con alumnos excelentes.

¿Qué legado personal le gustaría dejar en quienes hoy trabajan en física nuclear?

Los valores del trabajo en colaboración. El contacto con los experimentales. Siempre he deseado buscar una cierta excelencia y no causar daño a nadie.

¿Qué preguntas sobre teoría nuclear le ilusionan? ¿Qué consejo compartiría con los jóvenes científicos?

Hay en marcha investigaciones muy interesantes que pueden expandir drásticamente el ámbito de aplicación de la teoría nuclear, incorporando al modelo de capas técnicas procedentes de los métodos de campo medio. El desarrollo de los ordenadores cuánticos puede tener también una influencia crucial en el futuro de la disciplina. Como consejo, les diría que no sigan los pasos de nadie, que busquen su propio camino. ■

XXV ANIVERSARIO DE LA FIRMA DEL PROTOCOLO DE COLABORACIÓN SOBRE LA VIGILANCIA RADIOLÓGICA DE LOS MATERIALES METÁLICOS

Juan Pedro García Cadierno / Jefe de Área de Coordinación de Operaciones de Emergencia
Consejo de Seguridad Nuclear

En mayo de 1998, un grave incidente en una empresa siderúrgica del sur de España marcó un antes y un después en la gestión de materiales radiactivos en el país. Una fuente radiactiva se fundió accidentalmente en un horno de arco eléctrico y provocó una alerta nacional sobre los riesgos reales —no solo potenciales— de la presencia de material radiactivo en la chatarra metálica. El suceso evidenció la necesidad urgente de establecer un sistema de control y vigilancia radiológica en el sector del reciclaje de metales.

Hasta ese momento, aunque algunas empresas ya habían instalado sistemas de detección tipo pórtico, no existía una normativa específica ni una estructura administrativa dedicada al control de estos riesgos. La gravedad del incidente llevó a la intervención del entonces Ministerio de Industria y Energía (MINER)[1], el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA), junto con empresas afectadas, como ACERINOX, EGMASA y PRESUR. También participaron asociaciones sectoriales como la Federación Española de Recuperación (FER) y la Unión Española de Empresas Siderúrgicas (UNESID).

Como respuesta, se firmó un protocolo voluntario que estableció un sistema nacional de vigilancia y control radiológico de la chatarra y los productos derivados de su procesamiento. Conocido como «Protocolo de la Chatarra» o «Spanish Protocol», se convirtió en una herramienta clave dentro de la infraestructura nacional para la gestión de residuos radiactivos.

El protocolo se estructura en torno a cinco líneas de acción fundamentales[2]:

- Bases legales para la vigilancia y control radiológico.
- Instalación y mejora de sistemas de detección de radiaciones.
- Gestión segura de materiales radiactivos detectados.
- Programas de formación e información sobre riesgos radiológicos.
- Mejora de los planes de respuesta ante emergencias radiológicas.

A nivel internacional, se observó que no existían normas específicas sobre el control radiológico de la chatarra, aunque sí recomendaciones de organismos como la Comisión Europea (CE) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Algunos países de la OCDE ya habían instalado sistemas de vigilancia en acerías, pero siempre de forma voluntaria.

En España, la falta de regulación específica llevó a modificar la Ley de Tasas del CSN[3], otorgándole nuevas competencias para inspeccionar, evaluar y proponer medidas en situaciones excepcionales, incluso en instalaciones no sujetas a la legislación nuclear. A partir de ahí, se elaboraron instrucciones específicas, también de carácter voluntario, que culminaron en la creación formal del protocolo en 1999[4].

1 Hoy, Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO).

2 Carboneras, P. (2002). El protocolo español para el control radiológico en el reciclado de materiales metálicos. Descripción y experiencia en su aplicación. *I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente.* Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, p. 1052.

3 Ley 14/1999, de 4 de mayo, de Tasas y Precios Públicos por servicios prestados por el Consejo de Seguridad Nuclear. *BOE,* 5 de mayo de 1999. Disponible en: https://www.boe.es/buscar/pdf/1999/BOE-A-1999-10035-consolidado.pdf

4 Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Vigilancia radiológica en el reciclado de materiales metálicos, Energía nuclear.* Disponible en: https://energia.gob.es/nuclear/Vigilancia/Paginas/vigilancia.aspx

Reconocido internacionalmente como una iniciativa pionera en su ámbito, el protocolo representa un ejemplo de colaboración público-privado para prevenir riesgos radiológicos en el reciclaje de metales.

Hitos relevantes en los veinticinco años

1. MARCO NORMATIVO INICIAL (1999–2001)

En 1999 se publica el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas (RINR)[5], que actualiza el Decreto 2869/1972 e incorpora las normas básicas de la Directiva 96/29/Euratom. Establece nuevas actividades exentas de control administrativo, modernizando el marco regulador español.

En 2001, se aprueba el Reglamento de Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes (RPSCRI)[6], que sustituye al RD 53/1992 e introduce criterios para estimar dosis razonables de exposición, tanto en contextos laborales como en situaciones de exposición a fuentes naturales o artificiales. Además, completa la transposición de la Directiva 96/29/Euratom, cubriendo aspectos no tratados por el RINR.

2. INICIATIVAS COMUNITARIAS Y NACIONALES (2002–2003)

Durante la presidencia española de la UE en 2002, se celebran en Sevilla las Jornadas sobre prevención de riesgos radiológicos en el reciclaje de metales, organizadas por el Ministerio de Economía, el CSN y ENRESA. En este escenario se presenta el protocolo español de control radiológico en reciclaje de metales con el objetivo de establecer una iniciativa comunitaria para minimizar la presencia de material radiactivo en productos metálicos reciclados.

Ese mismo año, el Consejo de la UE publica una Resolución[7] sobre la creación de sistemas nacionales de vigilancia y control de materiales radiactivos en el reciclaje de metales. Se insta a los Estados miembros a implementar medidas para reducir los riesgos radiológicos en la industria del reciclaje.

En 2003, se aprueba la Directiva 2003/122/Euratom[8], centrada en el control de fuentes selladas de alta actividad y fuentes huérfanas. Reconoce que, a pesar de la legislación vigente, estas fuentes representan riesgos significativos para la salud y el medioambiente, por lo que deben estar bajo estricto control desde su fabricación hasta su almacenamiento o eliminación.

Ese mismo año, el CSN publica la *Guía de Seguridad GS-10.12*[9], que establece medidas de protección radiológica en actividades de recuperación y reciclaje de chatarra metálica. También se revisa el Protocolo de Colaboración para la Vigilancia Radiológica de los Materiales Metálicos, firmado en 1999, incorporando una Comisión Técnica para analizar su aplicación.

3. TRANSPOSICIÓN Y COOPERACIÓN INTERNACIONAL (2006–2010)

La Directiva 2003/122/Euratom se incorpora al Derecho español mediante el Real Decreto 229/2006[10], que regula el control de fuentes radiactivas encapsuladas de alta actividad y fuentes huérfanas. Este decreto contempla acuerdos de vigilancia y control en instalaciones donde es probable encontrar fuentes huérfanas, haciendo referencia implícita al protocolo de colaboración.

En paralelo, el Departamento de Energía de EE. UU. lanza la Iniciativa Megaport[11], que busca prevenir el uso de puertos marítimos para el transporte ilícito de materiales radiactivos. España se suma a esta iniciativa, que incluye la instalación de equipos de detección y la capacitación de personal en puertos estratégicos.

En 2009, el CSN y el OIEA organizan en Tarragona la Conferencia Internacional sobre Control y Gestión de Material Radiactivo en

5 Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas. *BOE*, 31 de diciembre de 1999. Disponible en: https://www.boe.es/buscar/pdf/1999/BOE-A-1999-24924-consolidado.pdf (31 de diciembre de 1999).

6 Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. *BOE*, 26 de julio de 2001. Disponible en: https://www.boe.es/boe/dias/2001/07/26/pdfs/A27284-27393.pdf

7 Resolución del Consejo sobre la creación en los Estados miembros de sistemas nacionales de vigilancia y control de la presencia de materiales radiactivos en el reciclaje de materiales metálicos. EUR-LEX. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 22 de mayo de 2002. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=OJ:C:2002:119:FULL&from=BG

8 Directiva 2003/122/Euratom del Consejo de 22 de diciembre de 2003 sobre el control de las fuentes radiactivas selladas de actividad elevada y de las fuentes huérfanas. EUR-LEX. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 31 de diciembre 2003. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0122&from=es

9 CSN (2003). *Guía de Seguridad 10.12 Control radiológico de actividades de recuperación y reciclado de chatarras.* Disponible en: http://www.elradon.com/wp-content/uploads/2012/04/guia10.12csn.pdf

10 Real Decreto 229/2006, de 24 de febrero, sobre el control de fuentes radiactivas encapsuladas de alta actividad y fuentes huérfanas. *BOE*, n.º 50, 28 de febrero de 2006, pp. 8022-8027. Disponible en: https://www.boe.es/boe/dias/2006/02/28/pdfs/A08022-08027.pdf

11 National Nuclear Security Administration, USDOE (2004). *Megaports Initiative. Protecting the world's shipping network from dangerous cargo and nuclear materials.* Homeland Security Digital Library. Disponible en: https://www.hsdl.org/?view&did=473907

Chatarra Metálica[12], destacando el valor del protocolo español por su enfoque integral.

En 2010, se firma el Protocolo Megaport en España, estableciendo procedimientos de actuación ante la detección de tráfico ilícito de material radiactivo en puertos de interés general. Participan organismos como la Agencia Tributaria, el CSN, ENRESA y varias Secretarías de Estado.

4. CONSOLIDACIÓN NORMATIVA INTERNACIONAL (2012–2013)

En 2012, el OIEA publica la guía *SSG-17*, dirigida a Gobiernos, autoridades nacionales y órganos reguladores[13], que ofrece recomendaciones para el control de fuentes huérfanas y otros materiales radiactivos en industrias de reciclado y producción de metales.

En 2013, se aprueba la Directiva 2013/59/Euratom[14], que establece normas básicas de seguridad para la protección contra radiaciones ionizantes. Deroga varias directivas anteriores, incluida la 2003/122/Euratom, y amplía los requisitos para incluir cualquier fuente radiactiva. El artículo 106 exige a los Estados miembros implementar las disposiciones legales necesarias para su cumplimiento.

5. TRANSPOSICIÓN NACIONAL Y REVISIÓN TÉCNICA (2016–2025)

En 2016, se crea un grupo de trabajo entre el Ministerio para la Transición Ecológica y el CSN para transponer la Directiva 2013/59/Euratom en relación con los materiales metálicos. Este proceso culmina en 2020 con la publicación del Real Decreto 451/2020[15], que regula el control y recuperación de fuentes radiactivas huérfanas.

La cronología detallada del proceso de elaboración de este Real Decreto es[16]:

1) Octubre 2016: inicio del proceso.

2) Abril 2017: elaboración del primer borrador.

3) Enero 2018: trámite de audiencia e información pública.

4) Junio 2018: evaluación de comentarios.

5) Junio 2018: elaboración del segundo borrador.

6) Septiembre 2018: envío del borrador a otros ministerios.

7) Mayo 2019: envío al CSN para aprobación.

8) Noviembre 2019: informe del Consejo de Estado.

9) Marzo 2020: aprobación por el Consejo de Ministros.

10) Abril 2020: publicación en el *BOE*.

11) Día siguiente: entrada en vigor.

En 2022, se publica el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, que completa la transposición de la Directiva 2013/59/Euratom en lo relativo a la protección radiológica de la salud[17].

En 2024, se actualiza el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas, adaptando el RINR de 1999 a los nuevos requerimientos de la Directiva 2013/59/Euratom[18].

Finalmente, en 2025, el CSN publica la Revisión 1 de la *Guía de Seguridad GS-10.12*[19], incorporando toda la legislación y prácticas

12 IAEA (2011). *Control and Management of Radioactive Material Inadvertently Incorporated into Scrap Metal.* Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1502_web.pdf

13 IAEA (2013). «Control de fuentes huérfanas y otros materiales radiactivos en las industrias de reciclado y producción de metales». *Colección de normas de seguridad del OIEA*, n.º SSG-17. Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1509s_web.pdf

14 Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, y se derogan las Directivas 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom y 2003/122/Euratom. EUR-LEX. *DOUE,* 17 de enero de 2014. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013L0059&from=ES

15 Real Decreto 451/2020, de 10 de marzo, sobre control y recuperación de las fuentes radiactivas huérfanas. *BOE,* n.º 117, 27 de abril de 2020, pp. 30392-30403. Disponible en: https://www.boe.es/boe/dias/2020/04/27/pdfs/BOE-A-2020-4667.pdf

16 García Cadierno, J. P. (2021). «El control de las fuentes radiactivas huérfanas». *Alfa* (47), pp. 44-50. Disponible en: https://www.csn.es/documents/10182/13557/Alfa+47/8708ab99-c0b5-5c39-d6bb-90e1b728922d

17 Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes. *BOE*, n.º 305, 21 de diciembre de 2022. Disponible en: https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/12/20/1029/con/20241204

18 Real Decreto 1217/2024, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas, y otras actividades relacionadas con la exposición a las radiaciones ionizantes. *BOE* n.º 292, de 4 de diciembre. Disponible en: https://www.boe.es/boe/dias/2024/12/04/pdfs/BOE-A-2024-25205.pdf

19 CSN (2025). *Guía de Seguridad 10.12 (Rev. 1). Control radiológico de actividades de recuperación y reciclado de chatarras, y de otras actividades relacionadas con la gestión de las fuentes huérfanas.* Disponible en: https://www.csn.es/documents/10182/2470154/GS+10-12+Rev+1+B-1+CE+NOR-21-003.pdf/e4bae18d-3b93-cecb-8d49-b34e28e4e66c

desde su primera edición en 2003. Esta revisión refuerza las medidas de control radiológico en actividades de reciclaje y gestión de fuentes huérfanas.

La figura 1 muestra el cronograma de los hitos mencionados relacionados con el control de fuentes radiactivas huérfanas.

Resultados obtenidos

Este apartado se centra en el estudio de tres aspectos:

- Evolución de las instalaciones adscritas y detecciones notificadas, teniendo en cuenta los distintos sectores a los que pertenecen las empresas adscritas (recuperación, siderurgia, fundición de metales y producción de metales no férreos).
- Análisis de los materiales radiactivos detectados y su procedencia geográfica.
- Análisis de las fuentes radiactivas detectadas, así como su actividad. Clasificación de las fuentes detectadas de acuerdo con la clasificación del Organismo Internacional de Energía Atómica (Clasificación de las fuentes radiactivas, 2009).

Instalaciones y detecciones

Desde su firma en 1999 hasta finales de 2024, ha habido 262 instalaciones inscritas en el registro del MITECO: 228 siguen todavía de alta y 32 han causado baja. La distribución de empresas se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. **Distribución de empresas inscritas en el MITECO por sectores**

Sector	Total	Alta	Baja
Recuperación	211	183	28
Siderurgia	23	20	3
Fundición de metales	19	18	1
Producción de metales no férreos	9	7	2
TOTAL	262	228	34

Línea de tiempo normativa y técnica sobre radiaciones ionizantes y fuentes huérfanas

2025	Rev. 1 de la Guía de Seguridad 10.12 del CSN
2024	Rev. 4 del Anexo Técnico del Protocolo RD 1217/2024, Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas y otras actividades relacionadas con la exposición a radiaciones ionizantes
2022	RD 1029/2022, Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes
2021	Rev. 3 del Anexo Técnico del Protocolo
2020	RD 451/2020 sobre control y recuperación de las fuentes radiactivas huérfanas
2015	Rev. 2 del Anexo Técnico del Protocolo
2014	Borrador del código de conducta del OIEA sobre movimiento transfronterizo de material radiactivo en la chatarra
2013	Directiva sobre nuevas normas básicas de seguridad 2013/59/EURATOM
2012	Publicación del SSG-17 del OIEA sobre el control de fuentes radiactivas huérfanas
2010	Firma del Protocolo español de actuación en caso de movimiento inadvertido o tráfico ilícito de material nuclear y radiactivo en puertos de interés general (MEGAPORT)
2009	Conferencia internacional de Tarragona sobre el control radiológico de la chatarra (OIEA)
2006	RD 229/2006, sobre fuentes selladas de alta actividad y fuentes huérfanas
2003	Directiva sobre fuentes selladas de alta actividad 2003/122/EURATOM Publicación del CSN de la Guía de Seguridad 10.12 sobre control radiológico de chatarras Rev. 1 del Anexo Técnico del Protocolo
2001	Jornadas sobre prevención de riesgos radiológicos en el reciclaje de metales (UE, Sevilla) Reglamento de protección sanitaria contra las radiaciones ionizantes RD 783/2001
1999	Firma del Protocolo de colaboración para la vigilancia radiológica de los materiales metálicos RD 1836/1999. Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas
1998	Incidente de fusión en una acería española
1996	Directiva sobre Normas básicas de seguridad 96/29/EURATOM

Figura 1. *Cronograma de sucesos en relación con la gestión y recuperación de las fuentes radiactivas huérfanas*

El principal sector de reciclado de metales al que pertenecen las empresas adscritas es el de recuperación de metales metálicos, seguido de la siderurgia.

La evolución de las instalaciones adscritas al protocolo se muestra en la figura 2.

El número acumulativo de instalaciones inscritas cada año (número de altas anuales menos el de bajas) se muestra en la figura 3.

Las adscripciones al protocolo han ido siempre en aumento. Su crecimiento se ralentizó a partir de 2007 y hasta 2014. Luego se mantuvieron constantes hasta 2016, cuando empezaron a decrecer por el inicio de la recesión económica, que obligó a muchas empresas del sector de la recuperación a cerrar su actividad. El crecimiento aumentó otra vez tras la entrada en vigor del RD 451/2020, que obliga a inscribirse en la base de datos del MITECO a todas las instalaciones dedicadas a la producción o manipulación de materiales metálicos; por tanto, el incremento se debe a la inscripción de empresas dedicadas a la recuperación y la fundición de metales.

La figura 4 refleja la evolución temporal del número de detecciones en cada uno de los cuatro sectores considerados. Desde el comienzo del protocolo se contabilizan 2361 detecciones notificadas, de uno o varios materiales.

El sector que acumula más detecciones es el siderúrgico, aunque la tendencia desaparece en el último año y cede el principal lugar al sector de la recuperación. Hay que destacar el período 2004-2008, en el que se observa un pico de detecciones en los sectores siderúrgico y de la recuperación, por dos hechos fundamentales:

a) En los incidentes de fusión de fuentes de años anteriores se contempló la posibilidad de la existencia de fuentes radiactivas en los parques de chatarra introducidas en las instalaciones antes de la colocación de los pórticos de radiación. Esto motivó que las instalaciones

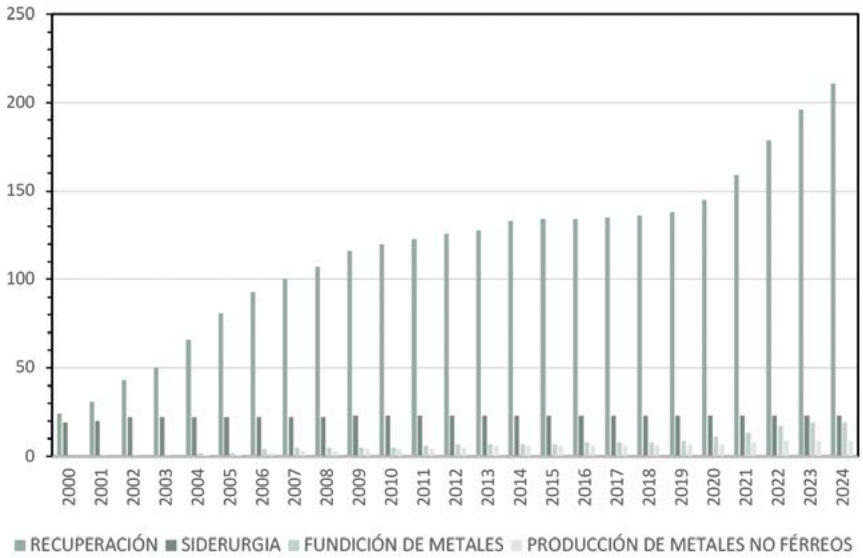


Figura 2. *Evolución de la inscripción de instalaciones por sector dentro del protocolo*

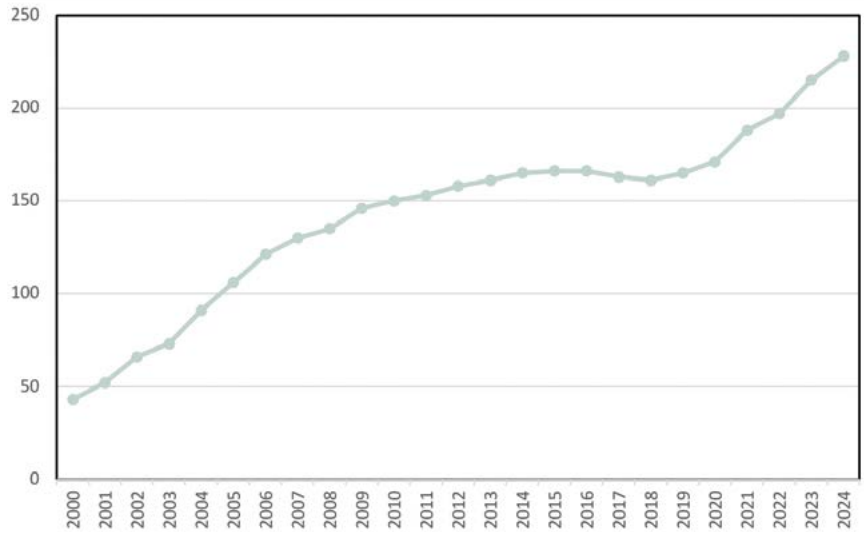


Figura 3. *Evolución temporal del número de instalaciones inscritas en el protocolo*

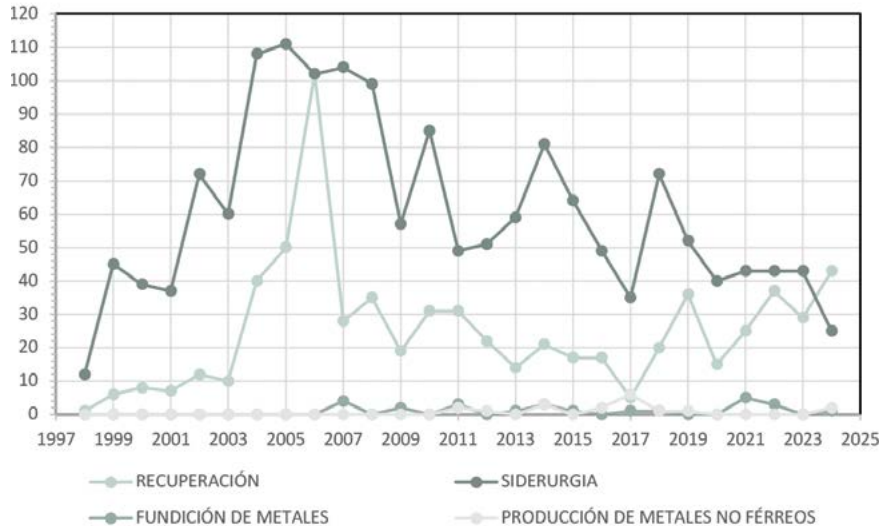


Figura 4. *Evolución temporal del número de detecciones por sector*

siderúrgicas adscritas en esos años vaciaran sus parques de chatarra y volvieran a pasar todo el material metálico por los pórticos de radiación para detectar posibles materiales radiactivos.

b) El continuo aumento de instalaciones adscritas al protocolo. En 2004, eran 91 las instalaciones adscritas y pasaron a 135 en 2008.

En 2006, se observa una subida anómala del número de detecciones en el sector de la recuperación. Esto es debido a que se contabilizan instalaciones que inicialmente pertenecían al sector de la siderurgia, pero actualmente, debido a su cese de actividad siderúrgica, están dentro del sector de la recuperación, ya que solamente funcionan como parques de chatarra para otras empresas del sector siderúrgico. Estas instalaciones, al vaciar sus parques de chatarra, detectaron materiales radiactivos que fueron notificados al CSN.

El número total de detecciones notificadas al CSN desde 1998 hasta 2024 suma 2361, y su distribución por sector se aprecia en la tabla 2.

Tabla 2. Número de detecciones notificadas al CSN desde 1998 hasta 2024 por sectores

Sector	N.º de detecciones
Recuperación	681
Siderurgia	1637
Fundición de metales	25
Producción de metales no férreos	18

Análisis de los materiales detectados y país de procedencia

Desde el comienzo del protocolo, se realizó la siguiente clasificación para identificar los materiales radiactivos detectados:

- Fuentes radiactivas.
- Piezas con contaminación de radionucleidos artificiales.
- Indicadores con pintura luminiscente.
- Productos con radio/torio.
- Piezas de uranio.
- Pararrayos radiactivo.
- Detector iónico de humos.
- Piezas con contaminación de radionucleidos naturales (NORM).

De acuerdo con esta clasificación, la distribución de materiales se muestra en la figura 5, a partir de datos de las 1895 detecciones retiradas por ENRESA (80 % del total). Esto significa que, en el 20 % de las detecciones restantes, el material tenía escasa presencia de radiación y podía incorporarse al proceso de la instalación.

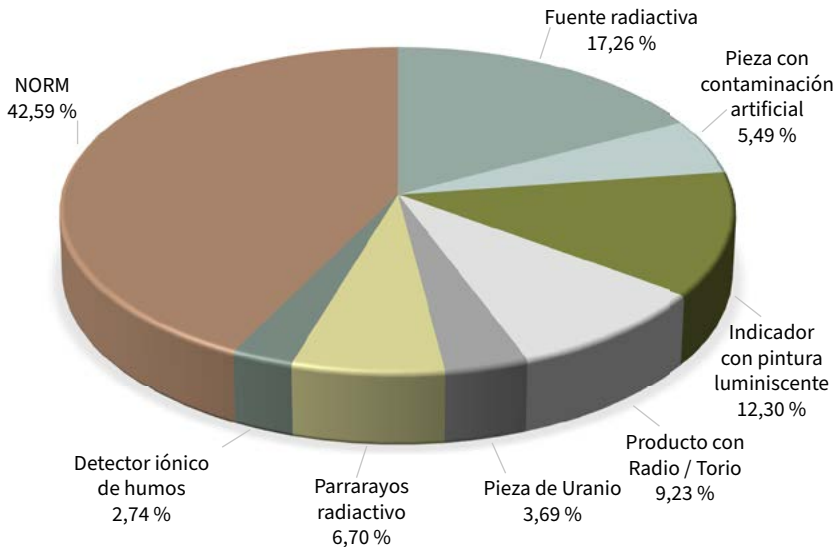


Figura 5. *Distribución de las detecciones por tipo de material*

Como puede verse en la figura 5, la mayor parte del material detectado corresponde a productos con contaminación natural, seguido de fuentes radiactivas, que serán tratadas en otro apartado.

La evolución temporal de las detecciones de cada uno de los tipos de material puede verse en la figura 6.

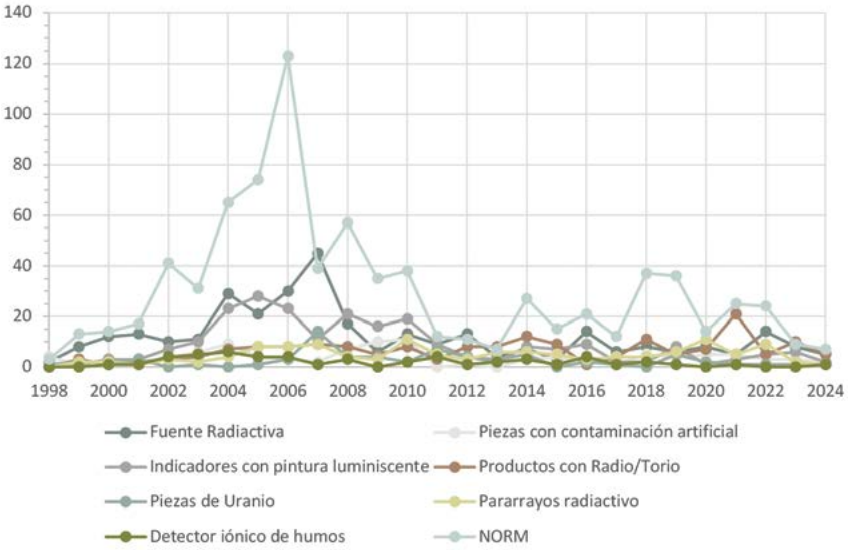


Figura 6. *Evolución temporal de cada tipo de material detectado*

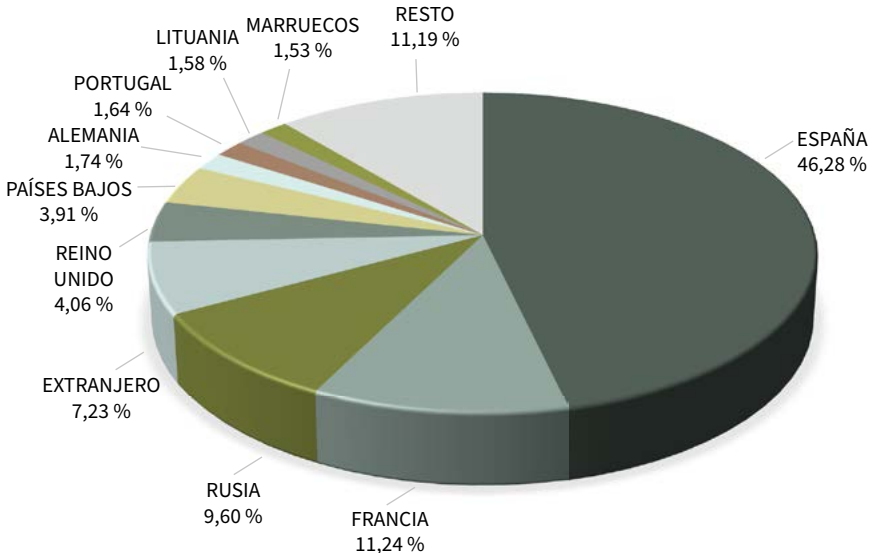


Figura 6. *Distribución de las detecciones por países*

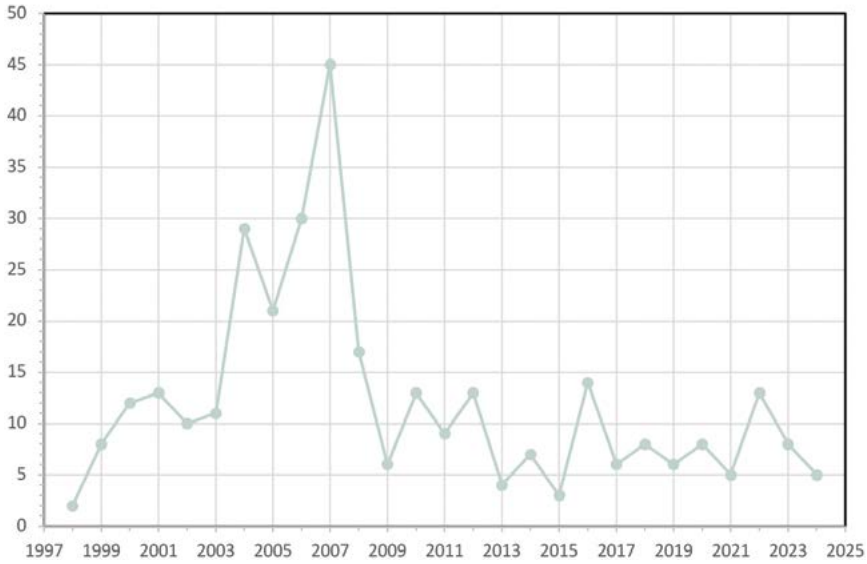


Figura 7. *Evolución temporal de las detecciones de fuentes radiactivas*

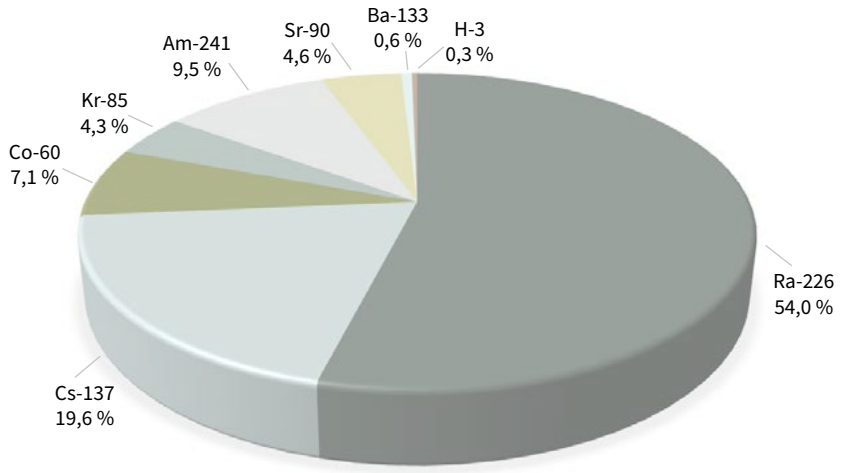


Figura 8. *Distribución de fuentes en relación con el número detectado*

En relación con la procedencia geográfica del material, la distribución sigue básicamente el principio de Pareto, que establece una relación de correspondencia 80-20, donde el 80 % de las consecuencias provienen del 20 % de las causas (QuestionPro, 2025). Y se detecta material contaminado en 53 países (figura 6).

El país con mayor número de detecciones es España, ya que el valor medio durante los veinticinco años de este estudio indica que en torno al 50 % de la chatarra utilizada para la producción de acero es de origen nacional. Es de destacar, que el porcentaje de fuentes en Reino Unido es significativamente mayor que en el resto de los países, aunque la mayoría de estas fuentes son de categoría 5.

Fuentes radiactivas detectadas

El segundo material detectado es el de las fuentes radiactivas, por ello se le dedica un apartado especial.

Desde 1998, cuando las instalaciones dedicadas a la producción de acero empezaron a comunicar detecciones de material radiactivo al CSN, se ha registrado en 326 ocasiones la presencia de fuentes radiactivas que alguna vez tuvieron un uso industrial o médico. La evolución temporal de estas fuentes se presenta en la figura 7.

Al igual que en otras gráficas de evolución temporal, puede observarse un máximo en 2007, fruto de la limpieza de los parques de chatarra. Sin embargo, haciendo un estudio más detallado, se comprueba que en 2007 existió la detección de una fuente clasificada como peligrosa de acuerdo con la categorización del OIEA (Clasificación de las fuentes radiactivas, 2009). Además, hubo seis fuentes de categoría 4 (improbable que sea peligrosa) y treinta y ocho de categoría 5 (sumamente improbable que sea peligrosa).

Los isótopos encontrados entre el material radiactivo han sido varios, destacando en cuanto a su número el radio-226, seguido del cesio-137 y cobalto-60. La figura 8 muestra la distribución de los

isótopos en cuanto a número y la figura 9 la distribución en relación con su actividad.

El número de fuentes de Ra-226 representa el 54 % de las fuentes detectadas, pero solo supone un 0,5 % en relación con la actividad detectada. Esto significa que las fuentes encontradas de Ra-226 son muchas, pero su actividad es muy pequeña y, por tanto, suelen ser fuentes de peligrosidad sumamente improbable.

Por el contrario, el número de fuentes de Cs-137 es en torno al 20 %, pero la proporción en cuanto a su actividad es del 59 %.

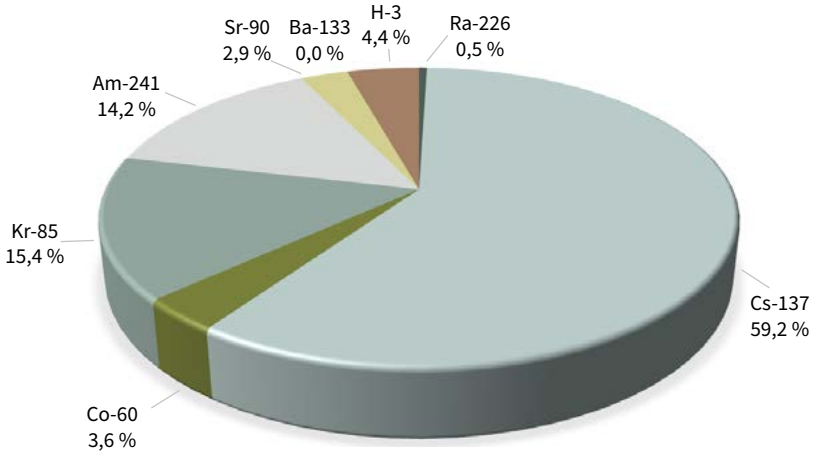


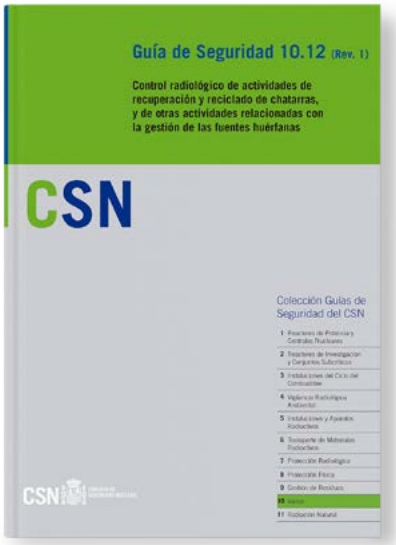
Figura 9. *Distribución de fuentes con relación a su actividad*

Tabla 3. Incidentes ocurridos después de la firma del protocolo

Fecha	Tipo de incidente	Isótopo/actividad	Residuos	Cat. OIEA	Escala INES
07/12/2001	Fusión fuente	Cs-137 (100 GBq)	375 m^3 (550 tm)	3	2
11/08/2003	Fragmentación fuente	Cs-137 (7.5 GBq)	73,5 m^3 (52 tm)	4	1
15/09/2003	Fusión fuente	Cs-137 (1,75 GBq)	75 m^3 (80 tm)	4	1
24/03/2004	Fusión fuente	Cs-137 (3 GBq)	69 m^3 (76 tm)	4	1
31/05/2005	Fusión fuente	Cs-137 (< 10 Bq/g)	-	-	
22/03/2007	Fusión fuente	Cs-137 (0,5 GBq)	25 m^3 (27 tm)	5	1
11/04/2007	Fusión fuente	Ir-192 (< 1 Bq/g)	-	-	
11/06/2010	Fusión fuente	Cs-137 (< 10 Bq/g)	-	-	
26/01/2011	Fusión fuente	Am-241 (< 1 Bq/g)	-	-	
27/10/2011	Fusión fuente	Cs-137 (26,5 GBq)	115 m^3 (116 tm)	4	1
05/11/2011	Fusión fuente	Cs-137 (21,2 GBq)	149 m^3 (175 tm)	4	1
17/08/2020	Fusión fuente	Cs-137 (89,7 MBq)	4 m^3 (4.8 tm)	5	1
28/02/2022	Fusión fuente	Am-241 ≈ 1 Bq/g	-	-	
08/06/2023	Fusión fuente	Cs-137 (1.22 GBq)	115 tm	4	1
13/09/2023	Fusión fuente	Cs-137 (45 MBq)	2 tm	5	1

Durante los veinticinco años reflejados en este estudio, tan solo en una ocasión se ha detectado una fuente de categoría 3, considerada como peligrosa: Cs-137, con una actividad de 0,126 TBq (3.4 Ci), que procedía de Colombia y fue detectada en 2007 en una instalación destinada a la recuperación de material metálico. Esta fuente es responsable del 30 % de la actividad total detectada en todas las instalaciones. Cabe reseñar que se han detectado 341 fuentes radiactivas. En la mayoría de los casos eran de categoría 4 o 5, de acuerdo con la clasificación del OIEA[20]. De todas las fuentes detectadas, en solo quince ocasiones se produjo la fusión o fragmentación de esta. Esto supone que el protocolo tiene una eficiencia superior al 95 % para evitar la fusión de fuentes.

En relación con los países de procedencia de las fuentes, hay que destacar que veintiuna fuentes de Am-241 son de procedencia nacional: el 50 % son de categoría 4 y el otro 50 % de categoría 5. En general, la mayor proporción de fuentes radiactivas son de Ra-226, si bien, en España, esta proporción (52,9 %) es menor que en el caso de Francia (89,2 %), Rusia (61,5 %) o Reino Unido (68,2 %).



Guía de Seguridad 10.12 (CSN, 2023)

El protocolo tiene una eficiencia superior al 95 % para evitar fusión de fuentes

Incidentes

La tabla 3 muestra los incidentes ocurridos después de la firma del protocolo. Como puede se puede observar, el riesgo cero no existe, pero el protocolo demuestra una eficacia superior al 95 % para evitar la fusión o fragmentación de una fuente radiactiva.

Conclusiones

El Protocolo de Colaboración sobre la Vigilancia Radiológica de Materiales Metálicos surgió en 1999 como consecuencia de la fusión de una fuente radiactiva en un horno de una acería española. Desde la firma se han adscrito 262 empresas, de las que actualmente están dadas de alta 228 que pertenecen principalmente al sector de la recuperación, y se han registrado 2361 detecciones. En 1995 se constató que dicho material tenía niveles superiores a los valores de desclasificación indicados en el Reglamento de instalaciones nucleares y radiactivas, y otras actividades relacionadas con la exposición a las radiaciones ionizantes.

Con respecto al tipo de material detectado, el 43 % corresponde a materiales con isótopos naturales (NORM), seguido de un 17 % de fuentes radiactivas. Otros tipos de materiales detectados han sido: indicadores luminiscentes (12 %), productos con torio (9 %), pararrayos radiactivos (7 %), piezas con contaminación artificial (5 %), piezas de uranio (4 %) y detectores iónicos de humos (3 %).

Cabe reseñar que se han detectado 341 fuentes radiactivas. En la mayoría de los casos eran de categoría 4 o 5, de acuerdo con la clasificación del OIEA. Tan solo una vez se detectó una fuente de categoría 3 (peligrosa). En términos de actividad detectada, esa fuente de categoría 3 supone casi el 30 % del total. De las 341 fuentes, en quince ocasiones se produjo fusión o fragmentación. Esto supone que el protocolo tiene una eficiencia superior al 95 % para evitar la fusión de fuentes.

Un aspecto a destacar es que las fuentes de Ra-226 representan el 54 % de fuentes detectadas, pero ese número solo representa un 0,5 % en cuanto a la actividad de dichas fuentes. Es decir, se detectan muchas fuentes de Ra-226 pero de muy poca actividad.

En cuanto a los países que han suministrado chatarra radiactiva, en primer lugar se encuentra España (46 %), un dato coherente, ya que el 50 % de la chatarra que se usa para la producción de acero es de origen nacional. Otros países son Francia (11 %), Rusia (10 %), Reino Unido (4 %) y Países Bajos (4%). El resto tiene una contribución inferior al 2 % y, además, un alto porcentaje de que las detecciones sean productos con NORM. Destaca también el alto porcentaje de aparición de fuentes frente al total de las detecciones procedentes de Reino Unido, aunque estas fuentes suelen ser de Ra-226 y categoría 5. ■

20 Clasificación de las fuentes radiactivas RS-G-1.9 (2009). Viena: Organismo Internacional de Energía Atómica

EVALUACIÓN DE LA SOLICITUD DE RENOVACIÓN DE LA AUTORIZACIÓN DE EXPLOTACIÓN DE LA CENTRAL NUCLEAR TRILLO

Asunción Barquín Dueña / Jefa de Proyecto de la central nuclear Trillo
(durante la evaluación de la solicitud de renovación de autorización de explotación)

Imagen de la central nuclear Trillo

El titular de la central nuclear Trillo presentó el 27 de marzo de 2023, ante el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), la solicitud de renovación de la autorización de explotación de la central por un periodo de diez años, a contar una vez expirase el plazo conferido en la anterior renovación, es decir, hasta el 16 de noviembre de 2034. Como soporte de su solicitud, el titular presentó la documentación requerida en la normativa vigente y en su anterior autorización de explotación, que incluye principalmente una Revisión Periódica de Seguridad (RPS) y, adicionalmente, la documentación asociada a la denominada Operación a Largo Plazo (OLP), dado que en el nuevo periodo de explotación para el que se solicita la autorización, en mayo de 2028, se cumplirán cuarenta años de la primera conexión de la central a la red.

La solicitud ha sido objeto de una evaluación pormenorizada por parte del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), con objeto de establecer las condiciones para garantizar la seguridad de la central, dando lugar finalmente a un informe aprobado por el Pleno del CSN el 23 de julio de 2024. El informe fue trasladado, como es preceptivo, al MITECO, que concedió a la central nuclear Trillo la renovación de la autorización de explotación por orden ministerial del 17 de noviembre de 2024. En este artículo se resume el proceso de evaluación llevado a cabo por el CSN y las condiciones establecidas en el informe preceptivo y, por ello, en la renovación de la autorización concedida por el ministerio.

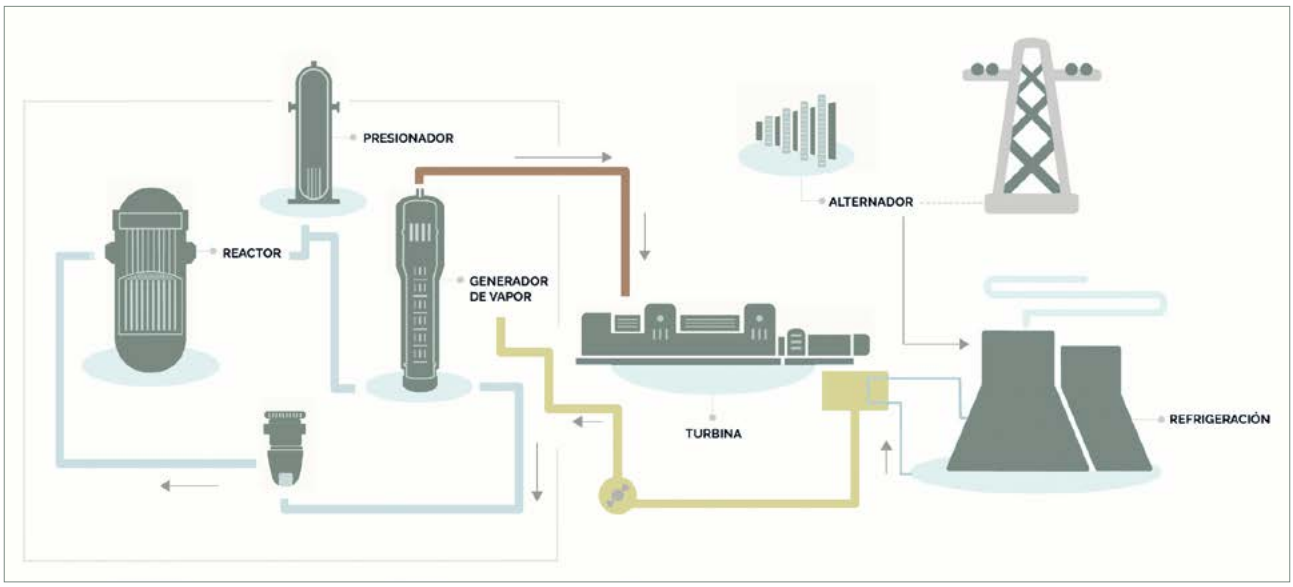


Figura 1. *Esquema de funcionamiento de la central nuclear Trillo*

La central nuclear Trillo (CNT) está situada en el término municipal de Trillo, en la provincia de Guadalajara. Su reactor es del tipo agua ligera a presión (*Presurized water reactor-PWR*), diseñado por la empresa alemana Siemens AG-KWU (Kraftwerk Union Atkiengessellschaft). Dispone de tres lazos de refrigeración del reactor, cada uno con un generador de vapor y un único presionador, y suministra una potencia térmica de 3010 MWt y una potencia eléctrica de 1077 MWe, utilizando combustible de uranio enriquecido con uranio-235.

La central opera en ciclos de doce meses de duración. En cada recarga se introducen en el núcleo del reactor unos cuarenta elementos de combustible nuevo (aproximadamente la cuarta parte del núcleo).

Trillo obtuvo la autorización de construcción en agosto de 1979 y la de puesta en marcha en diciembre de 1987. El 23 de mayo de 1988 se produjo la primera conexión a la red eléctrica nacional.

De acuerdo con lo establecido en el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas (RINR), las centrales españolas disponen de una autorización de explotación (AE), concedida por el ministerio competente, en la que se establecen las condiciones de operación. Las AE se conceden normalmente por diez años y se renuevan periódicamente por otro periodo de diez años también.

Desde la obtención de la primera autorización en 1988, la central ha obtenido varias renovaciones de sus permisos y autorizaciones de explotación. La AE vigente en el momento de solicitar la renovación objeto del presente artículo databa de 2014, con fecha de validez hasta el 17 de noviembre de 2024.

Desde el inicio de la explotación comercial, la central se ha ido actualizando a los estándares de seguridad de en cada momento, incorporando las mejoras requeridas por la nueva normativa, las instrucciones del CSN o las derivadas de su propia experiencia operativa o la de otras instalaciones.

Documentación

La documentación que el titular de la central debía remitir al CSN para solicitar una nueva autorización de explotación se encontraba recogida en la orden ministerial por la que se concedió la renovación de la autorización de 2014. Posteriormente, mediante sendas órdenes ministeriales, se le requirió la incorporación de la nueva sistemática para la realización de las RPS, recogida en la revisión 2 de la guía de seguridad del CSN, *GS 1.10 Revisiones periódicas de la seguridad de las centrales nucleares*, y el envío al CSN de documentos adicionales en el caso de que dicha renovación se solicitase por un período superior a la vida de diseño de la central (cuarenta años), es decir, que conllevase la entrada en OLP.

En este sentido, presentó la siguiente documentación como soporte de la solicitud:

1) Informe de la Revisión Periódica de Seguridad.

2) Últimas revisiones de los documentos oficiales de explotación.

3) Revisión del estudio probabilista de seguridad.

4) Informes de IPEEE sísmico.

5) Informe integral sobre el estado del envejecimiento de estructuras, sistemas y componentes (ESC) de seguridad.

6) Documentación asociada a la operación a largo plazo.

- Plan integrado de evaluación y gestión del envejecimiento (PIEGE).
- Estudio de impacto radiológico asociado a la operación a largo plazo (EIR).
- Propuesta de revisión del Plan de Gestión de Residuos Radiactivos y del Combustible Gastado (PGRRCG) correspondiente a la operación a largo plazo.

Evaluación del CSN

La documentación presentada fue evaluada por el CSN para la emisión de un informe, que se resume a continuación:

Revisión Periódica de la Seguridad

El Reglamento sobre Seguridad Nuclear (RSN) y la Instrucción del Consejo IS 26 sobre requisitos básicos de seguridad nuclear aplicables a las instalaciones nucleares requieren a los titulares de las instalaciones la realización de una RPS cada diez años como máximo.

El objetivo de la RPS es realizar una valoración global del comportamiento de la instalación durante el periodo analizado, mediante un análisis sistemático de todos los aspectos de seguridad nuclear y protección radiológica. La *GS 1.10 Rev. 2* establece los objetivos, el alcance, el contenido, los plazos de presentación y la forma de documentar las RPS de las centrales nucleares en operación, en cumplimiento de la IS 26. Además, incluye aspectos específicos, como el envejecimiento y obsolescencia de los equipos, la posible OPL de las instalaciones más allá de la vida inicialmente prevista y las lecciones aprendidas del accidente de Fukushima.

Guía de Seguridad 1.10 Revisiones periódicas de la seguridad en centrales nucleares (CSN)

Tal y como requiere la *GS 1.10*, Trillo solicitó antes de la realización de su RPS la apreciación favorable del denominado «documento base», que contiene el plan para la elaboración de la RPS que fue apreciado favorablemente por el CSN en junio de 2022.

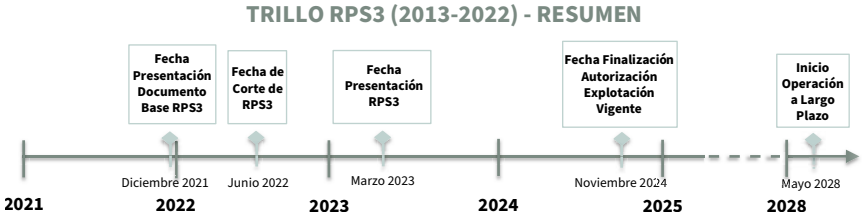


Figura 2. *Resumen de la tercera RPS de la central nuclear Trillo*

El periodo de análisis cubierto por la RPS, según lo requerido en la *G.S 1.10*, se extiende desde el 1 de enero de 2013 hasta el 30 de junio de 2022. La revisión comprende la evaluación de quince factores de seguridad, cuyos resultados son valorados y priorizados desde el punto de vista de la seguridad, para identificar modificaciones o mejoras razonablemente factibles que permitan mantener o aumentar la seguridad de la central, asegurando que se mantiene en un nivel elevado hasta la siguiente RPS o hasta el final de su operación comercial.

La figura 4 recoge de forma esquemática los principales hitos de la redacción de la RPS.

Los quince factores de seguridad se pueden agrupar en los siguientes tipos:

- Relacionados con el diseño y la operación la central.
- Relacionados con los análisis de seguridad.
- Relacionados con el funcionamiento y la experiencia operativa.
- Relacionados con la organización y los factores humanos.
- Relacionados con el impacto al medioambiente.

Como resultado de la revisión de los factores de seguridad, siguiendo la *GS 1.10*, se pueden identificar:

- *Fortalezas:* prácticas que han mejorado significativamente durante el periodo de la RPS y son comparables con las mejores prácticas establecidas en normas, códigos y guías actuales.
- *PDM o posibilidades de mejora*: con base en la seguridad se clasifican en importancia alta, media, baja y muy baja. El titular debe establecer acciones cuya prioridad esté basada en la importancia para la seguridad de la PDM.

La central nuclear Trillo identificó en su RPS 43 fortalezas, 46 PDM y 67 acciones para su resolución, de las que destaca:

- No se identificó ninguna PDM de importancia alta para la seguridad.
- Alrededor del 80 % de las PDM identificadas eran de importancia baja o muy baja.
- Las de importancia media (nueve en total) estaban asociadas en su mayor parte con el factor de seguridad 2: «condiciones actuales de las estructuras, sistemas y componentes importantes para la seguridad», es decir, relacionadas con mejoras en la condición y fiabilidad de ESC importantes para la seguridad.
- Alrededor del 37 % de las PDM identificadas estaban relacionadas con la mejora de los procesos de planta, para incrementar su efectividad y garantizar el cumplimiento pleno de los requisitos asociados y su adaptación a las mejoras prácticas.
- El número de PDM asociadas a aspectos de recuperación y mejora de márgenes era muy reducido.

Para la evaluación del documento de la RPS, el CSN elaboró una guía en la que se concretó la participación de diferentes áreas especialistas del órgano regulador. En ocasiones, fue necesario solicitar información adicional o mantener reuniones técnicas entre los técnicos del CSN y los representantes del titular con objeto de aclarar algunos puntos.

Como consecuencia de la evaluación del CSN, Trillo ha adquirido por escrito una serie de compromisos de actuación –además de las acciones derivadas de su propio análisis de la RPS–, relativos a los distintos factores de seguridad,

que se pueden agrupar en los siguientes tipos:

- Relacionados con el adelanto de los plazos de implantación propuestos en las acciones de la RPS.
- Asociados a normativa o su incorporación en las bases de licencia.
- Asociados a la revisión o elaboración de procedimientos o procesos.
- Asociados a la elaboración/revisión de cálculos, análisis o estudios.
- Asociados a actividades de mantenimiento o pruebas.
- Asociados a modificaciones de diseño.
- Documentales, principalmente asociados a aspectos a incluir en la revisión 1 de la RPS.
- Compromisos que no encajan en ninguno de los grupos anteriores, principalmente relativos a la realización y envío de información al CSN.

Análisis del estado de envejecimiento de los componentes, sistemas y estructuras de seguridad de la central

El titular también presentó como soporte de su solicitud un informe integral sobre el estado del envejecimiento de estructuras, sistemas y componentes (ESC) de seguridad.

El objetivo era complementar la información aportada en cuanto al estado de las ESC, incluyendo un análisis específico del envejecimiento de los componentes y de la integridad de las estructuras de los sistemas importante para la seguridad, para el próximo periodo de explotación.

Para la elaboración de este informe integrado, el titular tuvo en cuenta los resultados de una serie de programas ya existentes en la central: plan de gestión de vida, regla de mantenimiento, programa de mantenimiento de la calificación ambiental de equipos, programa de inspección en servicio, plan de fiabilidad de equipos, procesos de gestión de la obsolescencia, programa de mantenimiento preventivo y otros programas, como el de diagnosis y mantenimiento de válvulas motorizadas.

La evaluación de este análisis fue realizada por el área de Gestión del Envejecimiento y Mantenimiento (GEMA) del CSN, que alcanzó las conclusiones siguientes:

- Los programas y actividades existentes en CNT son suficientes y garantizan razonablemente la adecuada identificación, vigilancia y evaluación de problemas de envejecimiento.
- Los resultados del análisis permiten concluir que las ESC analizadas presentan un buen estado.
- No se han detectado mecanismos de envejecimiento relevantes y las desviaciones detectadas han sido abordadas por CNT para corregir la condición.
- Se propone la actualización y envío al CSN del informe integral, con una frecuencia de tres años, recogiendo el análisis de los aspectos relevantes en el periodo anterior de tres años (tres ciclos y tres paradas para recarga).

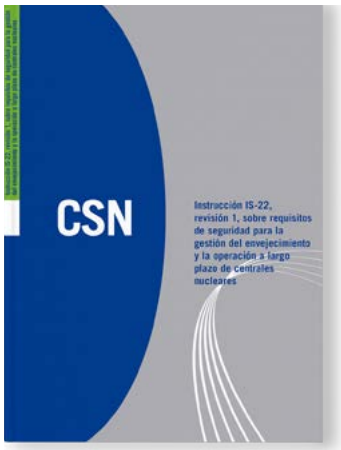
Documentación asociada a la OLP

Los principales documentos presentados por el titular en relación con la OLP y objeto de evaluación por parte del CSN han sido los siguientes:

1. PLAN INTEGRADO DE EVALUACIÓN Y GESTIÓN DEL ENVEJECIMIENTO (PIEGE)

La Instrucción del CSN IS-22 «Requisitos de seguridad para la gestión del envejecimiento y la operación a largo plazo de centrales nucleares» requiere que, en caso de que una central solicite la OLP, es decir, más allá de la vida de diseño original de la instalación, en la primera solicitud de renovación de autorización de explotación por un periodo que supere su vida de diseño, el titular debe incluir un PIEGE, constituido por una serie de estudios de gestión del envejecimiento que permitan garantizar la funcionalidad de los elementos importantes para la seguridad en el nuevo periodo de operación. Estos son los mismos que se deben incluir en el Plan de Gestión de Vida (PGV). Por ese motivo, el PIEGE puede considerarse como una extensión del PGV en la fase de operación a largo plazo, posterior a la de diseño inicial de la central.

La evaluación global del PIEGE fue asignada también al área GEMA,



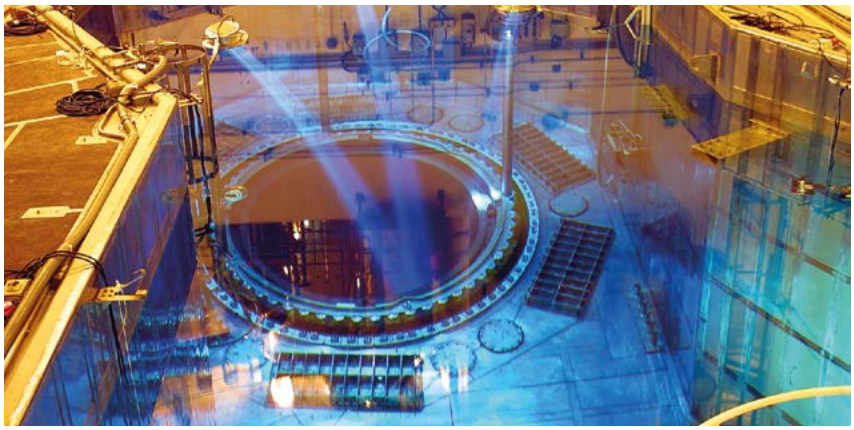
Instrucción IS-22

aunque varios apartados específicos fueron evaluados por el área de Ingeniería Mecánica y Estructural (IMES). La evaluación concluyó que tanto el proceso y metodología de determinación del alcance y selección de ESC como la metodología y resultados de la revisión de la gestión del envejecimiento eran aceptables

Con respecto a los Programas de Gestión del Envejecimiento (PGE), en la fecha de la evaluación, la central nuclear Trillo disponía de 39 PGE para gestión de los efectos de envejecimiento y había emitido 94 informes de seguimiento de los programas de gestión del envejecimiento (IMPGE). Por tanto, la fase de implantación se encontraba muy avanzada, considerando la fecha de entrada en OLP. La aplicación de los PGE proporciona una seguridad razonable de que los efectos de envejecimiento están adecuadamente gestionados, de forma que los sistemas y componentes dentro del alcance cumplirán sus funciones propias. No obstante, la evaluación destacó que las actividades definidas en los PGE debían estar completadas antes del inicio de la OLP.

En relación con los Análisis de Envejecimiento en Función del Tiempo (AEFT), la central nuclear Trillo identificó 36 AEFT, de acuerdo con los criterios de la IS-22, y su resolución se consideró correcta.

Los AEFT relacionados con la fragilización neutrónica de la vasija del reactor estaban pendientes de resolución, si bien la central asumió el compromiso de presentar la resolución completa tres años antes de la entrada en OLP.



Cavidad del reactor de la central nuclear Trillo

2. PROPUESTA DE REVISIÓN DEL PGRRCG

El PGRRCG tiene por objeto recoger los criterios y métodos que aseguren que la gestión de los residuos radiactivos que se generan en la instalación sea segura y optimizada, El titular presentó, junto a la solicitud de renovación, una propuesta de revisión del plan para tener en cuenta los residuos que se generarán durante la fase de OLP.

La evaluación de este documento fue realizada por las áreas del CSN responsables de los temas relativos a los residuos, tanto de alta (ARAA) como de baja y media actividad (ARBM) y concluyeron que la última revisión del plan podía ser objeto de informe favorable por parte del CSN. Así, el CSN informó favorablemente la propuesta de cambio al PGRRCG asociado a la OLP y el MITECO, por resolución de 19 de septiembre de 2024, aprobó la propuesta.

3. EVALUACIÓN DEL ESTUDIO DEL IMPACTO RADIOLÓGICO ASOCIADO A LA OLP

Junto con la solicitud de renovación de autorización de explotación, el titular presentó el estudio de impacto radiológico asociado a la OLP de Trillo, que concreta el cálculo de las dosis radiológicas que puede recibir el individuo más expuesto, así como el conjunto de la población en el entorno de la central.

El cálculo de dosis objeto del EIR se definió con base a los siguientes ámbitos:

- Espacial: el EIR se circunscribe al radio de 30 km en torno a la central, zona de influencia considerada en los programas de vigilancia radiológica ambiental.
- Temporal: la proyección futura de dosis abarca el periodo de OLP, con un horizonte de operación hasta 2048.

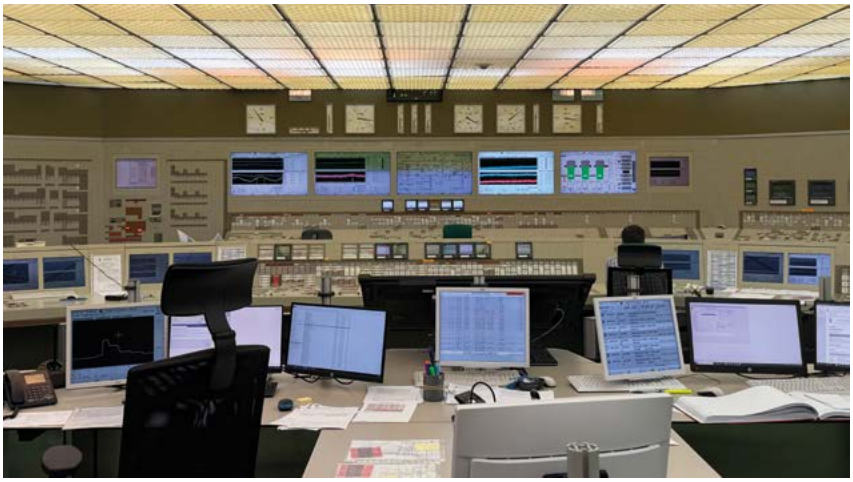
Los análisis del titular concluyeron que los valores de dosis derivados de la emisión de efluentes radiactivos líquidos y gaseosos durante la operación normal de Trillo en el periodo del estudio son inocuos e inferiores a los límites establecidos legalmente, sin necesidad de tomar medidas adicionales durante el nuevo periodo de operación.

Las áreas de Evaluación de Impacto Radiológico (AEIR) y de Vigilancia Radiológica Ambiental (AVRA) del CSN, encargadas de la valoración, consideraron que la revisión 4 del EIR era aceptable.

Además del análisis de la documentación presentada por el titular como soporte de su solicitud, el CSN realizó una evaluación del cumplimiento de las condiciones sobre seguridad nuclear y protección radiológica, y de las Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC) asociadas a las condiciones de la anterior renovación de la autorización de explotación de 2014. También verificó el cumplimiento con las ITC post-Fukushima y con el resto de instrucciones técnicas complementarias emitidas con posterioridad a la renovación de la AE.

La evaluación concluyó que los límites y condiciones, así como las acciones requeridas en las ITC asociadas a la autorización de explotación vigente habían sido cumplidas, al no constar ningún incumplimiento de los límites y condiciones asociados a la AE o de los requisitos de las ITC emitidas por el CSN para la central durante el periodo de aplicación de la autorización de explotación.

Por último, el CSN realizó también un análisis de todas las ITC e instrucciones técnicas emitidas por el Consejo para la central nuclear Trillo, con objeto de establecer cuáles debían continuar vigentes durante el siguiente periodo de explotación que se iba a autorizar y cuáles se podían anular. El resultado de esta evaluación quedó plasmado en una nueva ITC a la central nuclear Trillo, por la que se anulan ITC e instrucciones técnicas emitidas anteriormente, las



Sala de control de la central nuclear Trillo

Vista panorámica de la central nuclear Trillo

cuales dejan de estar vigentes a partir de la emisión de la ITC.

Conclusiones finales: informe, límites y condiciones

A la vista de los informes técnicos, las conclusiones de la evaluación y el análisis y valoración final del Pleno del Consejo, el CSN acordó informar favorablemente la renovación de la autorización de explotación de la central nuclear Trillo por el periodo de diez años solicitado (17 de noviembre de 2024 hasta 16 de noviembre de 2034)[1].

La propuesta del CSN sobre la nueva autorización incluye los límites y condiciones sobre seguridad nuclear y protección radiológica. Concretamente, se establecen nueve condiciones, las seis primeras globales y tres específicas, relacionadas con:

- La empresa titular, sus facultades y el marco técnico de operación de la central.
- Los documentos oficiales de explotación y requisitos para sus modificaciones.
- Las obligaciones de información al CSN y a la Dirección General de Planificación y Coordinación Energética del MITECO.
- Actuaciones derivadas de la Revisión Periódica de Seguridad, el PIEGE y el resto de documentación presentada con la solicitud: se requiere el cumplimiento de todas las acciones propuestas en la RPS y de todas las acciones reflejadas en las cartas de compromisos del titular, y que cualquier cambio posterior requerirá la apreciación favorable del CSN.
- Análisis de inundaciones internas y aspersión.
- Gestión del envejecimiento y la operación a largo plazo.

Los límites y condiciones se complementan con una serie de ITC emitidas por el CSN asociadas a las condiciones de la nueva autorización de explotación, en las que se requiere al titular la realización de otra serie de actuaciones de vigilancia, mejoras o modificaciones identificadas en el transcurso de la evaluación del CSN.

En total se emitieron cinco ITC asociadas a las condiciones de la autorización.

- ITC asociada a la condición 3: incluye requisitos para modificar los DOE.
- ITC asociada a la condición 4: especifica el contenido de los informes periódicos.
- ITC asociada a la condición 7: relativa al cumplimiento con las acciones de la RPS y resto de compromisos del titular.

  Entre las acciones incluidas en esta ITC destacan las siguientes:

  - Desarrollo e implantación de planes de acción para evitar el desprendimiento de tuberculaciones, limos y otros ensuciamientos en los cambiadores de calor refrigerados por el sistema de agua de refrigeración esencial (VE).
  - Analizar posibles mejoras para dotar al sistema de filtración de sala de control (UV27) de una alternativa adicional de suministro eléctrico.
  - Establecer una prueba periódica de funcionamiento de las unidades enfriadoras del sistema de agua enfriada esencial (UF11/21/31/41 D501).
  - Desarrollar un programa de pruebas de setenta y dos horas cada ocho años y tras cada revisión general (W6) para los generadores diésel de salvaguardia y de emergencia en cumplimiento con la KTA 3702 (2014).
  - Implantar la modificación de diseño 4-MDR-04102-00/01 «Modificaciones necesarias para el cambio de ubicación y modelo de los instrumentos de temperatura GYx1/x2 T422/3/9» en los generadores diésel de salvaguardia.
  - Modificar el Manual de Prueba de Bombas relacionadas con la seguridad y procedimientos que lo desarrollan por comparación con las pruebas requeridas en el código ASME OM.
- ITC asociada a la condición 8: incluye requisitos relativos a los análisis de inundaciones internas y aspersión.
- ITC asociada a la condición 9: con acciones relacionadas con la gestión del envejecimiento y OLP.

Tras analizar el informe preceptivo presentado por el CSN como resultado de su evaluación, el MITECO, por orden TED/1269/2024 de 11 de noviembre de 2024, concedió a la central nuclear Trillo la renovación de la autorización de explotación, con los límites y condiciones propuestos por el CSN. ■

1 El contenido de las ITC y el informe técnico que lo soporta son documentos públicos a los que se puede acceder visitando la página web del CSN (www.csn.es) y buscando los acuerdos del Pleno del CSN del 20 de noviembre de 2024 (ITC). La propuesta de dictamen técnico elaborada por el cuerpo técnico del CSN también es pública y se puede encontrar en los documentos del Pleno de 20 de noviembre de 2024 (PDT).

Del uranio al ultramarino: la ciencia que da color al arte

Pinturas rupestres en Santa Cruz, Argentina, para las que se utilizaron pigmentos ocres

Ciencia y arte han caminado de la mano desde los albores de la humanidad. Los pigmentos que dieron vida a los bisontes de Altamira, las proporciones matemáticas que inspiraron a Leonardo o las imágenes cósmicas captadas por los telescopios son pruebas de un mismo impulso creativo: comprender el mundo y transformarlo en belleza.

Texto: **Isabel Alonso**

Hay piedras que, al tocarlas, dejan una fina pátina de color sobre la piel: son ocres, mezcla de arcilla y óxido de hierro o manganeso. Conocidos desde la prehistoria, sus tonos rojizos y amarillentos dan vida a los bisontes de Altamira, los caballos de Lascaux y las manos de Santa Cruz, en Argentina, pero también a los jabalíes de Célebes, en Indonesia, con una antigüedad de más de 45 000 años, o a las manchas y puntos de Ardales, en Málaga, que podrían remontarse a los neandertales.

¿Cuándo surgió entonces el arte? Datar las primeras muestras no es tarea sencilla, aunque la ciencia, especialmente la nuclear, puede proporcionar una respuesta aproximada. A lo largo de miles de años, el agua se ha filtrado en cuevas y ha creado depósitos de carbonato de calcio sobre las pinturas. Estas formaciones guardan en su interior uranio que, con el paso del tiempo y a ritmo constante, se desintegra en torio. Teniendo en cuenta la cantidad relativa de ambos elementos, mediante la datación uranio-torio se puede calcular de forma precisa el tiempo de cada proceso y, por ende, la edad mínima de las pinturas rupestres que se encuentran bajo la costra calcítica.

Desde aquellos primeros «artistas», la paleta de colores disponibles no

Estatua de la Libertad, en Nueva York. Hecha de cobre, su color verdoso se debe a la formación del cardenillo por la oxidación del metal

ha dejado de crecer. El color surge con la luz. Cada rayo de luz blanca encierra todas las longitudes de onda del espectro visible, desde las que poseen mayor frecuencia y energía, como el violeta y el azul, hasta las que tienen menos, como los rojos. Cada material absorbe y refleja diferentes longitudes de onda, que determinan su tonalidad, y puede variar según el tipo de luz que reciba.

Mediante la datación uranio-torio se puede calcular la edad mínima de las pinturas rupestres

Química tras los colores

Los primeros procesos que convirtieron la materia prima en pigmentos eran sencillos y consistían en triturar el mineral. No obstante, para conseguir algunos colores había que calcinarlos –como la siena tostada o el negro de viña– o tratarlos con ácidos. Es el caso de la cerusa o albayalde, carbonato básico de plomo que en época romana se fabricaba a partir de láminas de dicho metal, suspendidas sobre vapores de vinagre, y que fue utilizado como maquillaje hasta el siglo XIX. También del verdigrís o cardenillo, una pátina turquesa que se forma sobre el cobre o sus aleaciones.

Ya en la Antigüedad, autores como Plinio el Viejo advertían de que algunos compuestos reaccionaban al aplicarlos sobre la cal viva de los muros o se degradaban con las condiciones ambientales; así, el oropimente –trisulfuro de arsénico– se desaconsejaba en los frescos, y el cinabrio –sulfuro de mercurio– se usaba solo en superficies no expuestas a luz o calor, porque se oscurecía. Tampoco los pigmentos orgánicos, como el extraído de diferentes especies del género *Murex* –que proporcionaba el famoso púrpura de Tiro–, podían usarse directamente sobre la cal.

Estas limitaciones fomentaron la búsqueda de otras fórmulas con menos inconvenientes: el azul de Prusia, obtenido por casualidad por Heinrich Diesbach en 1704; el verde cobalto, creado en 1780 por el químico sueco Sven Rinmann; el amarillo de cadmio, descubierto en 1817 por Friedrich Stromeyer; el blanco titanio, que empezó a utilizarse a finales del siglo XIX, o el

En busca del azul

Lapislázuli

Uno de los colores más difíciles de conseguir en la naturaleza es el azul, sobre todo si se pretende que sea químicamente estable. Minerales como la azurita proporcionan un pigmento azul brillante y profundo, pero tiene el inconveniente de que, con el tiempo y la humedad, se convierte en malaquita.

El azul del lapislázuli es estable, pero su producción requiere procedimientos complejos, ya que es necesario purificarlo. Extraído ya en tiempos de Tutankamón de las montañas de Afganistán, el lapislázuli es un silicato de alúmina mezclado con sulfato de cal y sosa que contiene pirita. Los trozos más puros se reservaban desde la Antigüedad para crear gemas, mientras que con el resto se elaboraba el azul ultramarino. Muy apreciado en el arte europeo, se utilizaba en las obras más importantes y su precio llegó a superar al del oro, por lo que se buscó la forma de crearlo de manera sintética. Como sucedió con muchos otros colores, el logro no llegó hasta el siglo XIX, aunque no fue el primer pigmento artificial que elaboró la humanidad.

Cinco mil años atrás, los egipcios mezclaron arena del desierto, rica en carbonato de calcio, con flor de sal y cobre, que más tarde sustituirían por bronce. La mezcla era finalmente triturada y compactada para cocerla después a más de 850 °C. El resultado fue un azul brillante más barato y fácil de hacer que el ultramarino y mucho más estable que la azurita: el azul egipcio. Muy usado en la Antigüedad clásica, tiene la peculiaridad de ser un fluorocromo y emitir luz en el infrarrojo cercano del espectro electromagnético, por lo que resulta útil en aplicaciones ópticas y tintas de seguridad, entre otras. ■

La Escuela de Atenas

reciente azul YInMn, que se descubrió en 2009. No obstante, no todas las nuevas fórmulas estaban exentas de problemas, como el verde de París, compuesto por acetoarsenito de cobre y muy tóxico, aunque utilizado hasta principios del siglo XX para teñir ropa, elaborar papeles pintados o como insecticida.

Entre números y pinceles

Los artistas siempre han buscado en el entorno inspiración para sus obras. El mundo natural y sus formas ocupan un papel fundamental en muchos cuadros y, como decía Galileo, la naturaleza «está escrita en lenguaje matemático». Esto se manifiesta en elementos tan diversos como las hojas de los árboles, las conchas de ciertos moluscos, los cristales minerales o las espirales de los girasoles. Entre los patrones que se repiten en el mundo natural destaca el número áureo.

Este número irracional, con valor de en torno a 1,618 e infinitos decimales, representa la relación entre dos segmentos de una recta, de modo que $(a+b)/a=a/b$. Considerado sinónimo de armonía en la Antigua Grecia y denominado «divina proporción» en el Renacimiento, el número áureo aparece como cociente al dividir cada cifra de la sucesión de Fibonacci por la inmediatamente anterior. Esta relación matemática no solo se expresa en números, sino también en formas geométricas como la espiral áurea, que se genera a partir de una sucesión de rectángulos áureos –aquellos cuya proporción entre lados responde al número áureo– y se aproxima a la curva logarítmica que también se observa en elementos naturales como los girasoles o la filotaxis.

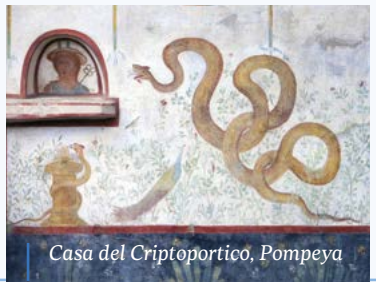
Artistas como Leonardo da Vinci o Dalí han aplicado este número en la composición de sus obras junto con otras formas geométricas. Dalí, en concreto, en su pintura *La Última Cena* (1955) no solo emplea la proporción áurea en las dimensiones del lienzo y la disposición de las figuras, sino que también incorpora un dodecaedro que enmarca la escena. Círculos, triángulos o cuadrados son algunos de los polígonos a los que los pintores han recurrido para estructurar, equilibrar y dotar de simbolismo a sus trabajos, pero también son protagonistas de obras como *Composición en rojo, azul y amarillo*, de Piet Mondrian.

Además, la geometría se ha utilizado para aplicar la perspectiva y organizar el espacio tridimensional en el lienzo. Un caso paradigmático es *La Flagelación de Cristo*, de Piero della Francesca, que utiliza la perspectiva lineal y las formas arquitectónicas geométricas para situar la escena. Otro ejemplo más es el de Rafael Sanzio, que recurre a elementos geométricos, como círculos, semicírculos y cuadrados, visibles en los pavimentos y arcos de *La Escuela de Atenas*, para construir un espacio simétrico y profundo, cuyo punto de fuga central

Láseres sobre Pompeya

Conocer la composición química de las pinturas sin tener que recurrir a tomar muestras supuso un gran avance en el conocimiento y la conservación de obras y frescos como los de Pompeya. Para ello, uno de los métodos utilizados es la espectroscopía Raman.

La técnica consiste en interactuar un haz de radiación electromagnética con un sistema para conocer sus características. Se basa en el efecto Raman, descubierto en 1928: una forma de dispersión inelástica de la luz en la que, cuando un haz láser incide sobre una muestra, la mayoría de los fotones se dispersan sin cambios, pero una pequeña fracción lo hace modificando su energía. Ese cambio genera un espectro vibracional único para cada compuesto químico, que permite identificar la composición de los materiales, diagnosticar procesos de degradación y planificar intervenciones de conservación sin alterar las obras originales. ■



Casa del Criptoportico, Pompeya

dirige la mirada hacia las figuras de Platón y Aristóteles.

La ciencia a través del arte

El ser humano siempre ha mirado al cielo. Estrellas, planetas y constelaciones han provocado curiosidad desde el inicio de los tiempos. Por ello, las representaciones del firmamento son abundantes en el arte. Una de las más impresionantes que se conservan en la península es *El cielo de Salamanca*. Pintada en torno a 1480 por Fernando Gallego sobre la bóveda que cubría la biblioteca de las Escuelas Mayores de la Universidad y de la que solo se conserva un tercio: «por la descripción que hizo Diego Pérez de Mesa en 1590, sabemos que la bóveda original contenía las 48 constelaciones ptolemaicas, formadas por las doce constelaciones zodiacales que definen la eclíptica, junto con las veintiuna constelaciones boreales y las quince australes. La presencia del Sol y Mercurio permiten inferir que la bóveda original también contenía el resto de los planetas conocidos en ese momento», explica Carlos Tejero, doctor y profesor del Departamento de Matemáticas de la Universidad de Salamanca, lo que la convierte en un planetario cuyo objetivo principal era la enseñanza de la astronomía.

Sin embargo, no es la única ciencia que aparece representada en el arte. Uno de los cuadros más famosos de Rembrandt es *La lección de anatomía del Dr. Nicolaes Tulp*, de 1632, donde se lleva a cabo una disección pública y se muestra la musculatura del brazo izquierdo, que también se puede ver, aunque en forma de boceto, en el papel que sujeta uno de los asistentes.

Científicos –como Lavoisier y su esposa, retratados por Jacques-Louis David– y experimentos también aparecen en lienzos, representando los avances de cada época. Algunos ejemplos son el *Experimento con un pájaro en una bomba de aire* (1768), de Wright of Derby, o el retrato de Pasteur pintado por Albert Edelfelt en 1885.

El arte que crea la ciencia

La relación entre ciencia y arte no es unidireccional: aunque el arte ha servido durante siglos para repre-

Científicos y experimentos aparecen en los lienzos representado los avances de cada época

Lección de anatomía del Dr. Nicolaes Tulp

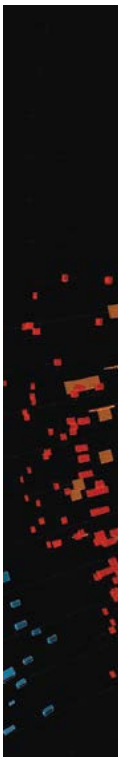
Gallery of the Louvre, realizado por Morse, inventor del telégrafo y del código al que da nombre

Científicos y artistas

El arte es inherente al ser humano, por lo que no es raro encontrar científicos que lo han integrado en su día a día.

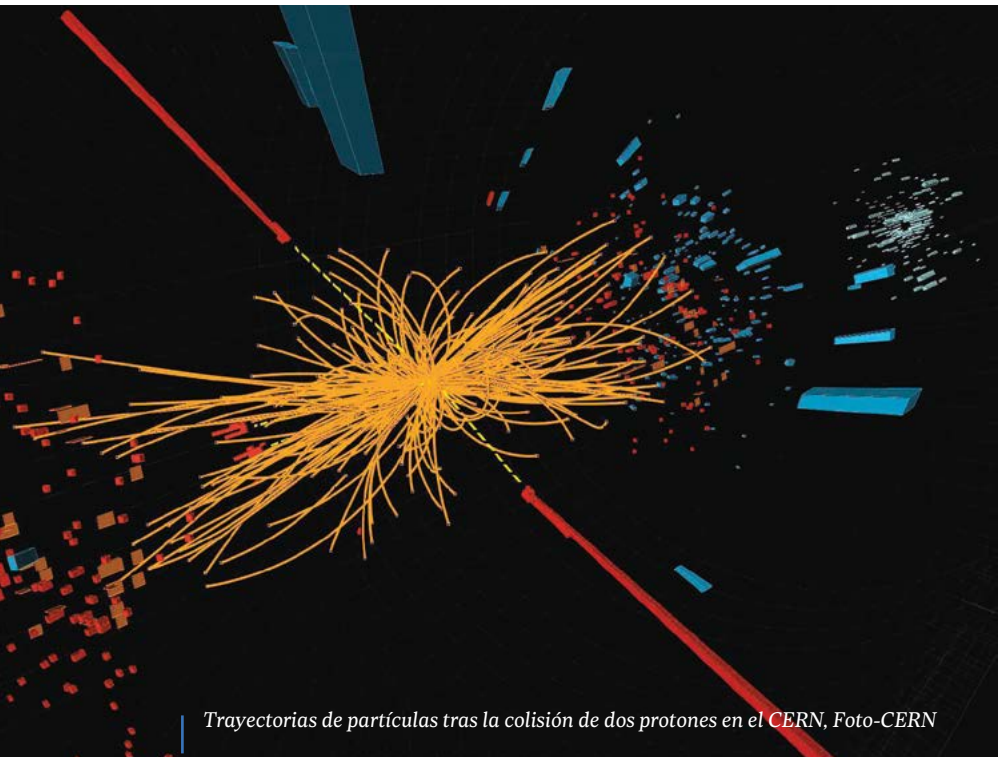
Leonardo da Vinci es el polímata u hombre del Renacimiento por excelencia. Inventor, escritor y científico, entre otras cosas, combinó su insaciable curiosidad científica con un talento artístico extraordinario, con cuadros como *La dama del armiño*, *La última cena* o *La Gioconda*, su obra más conocida.

El físico y químico Louis Pasteur practicó la pintura en su tiempo libre, mientras que el inventor del telégrafo, Samuel F. B. Morse, fue un pintor académico reconocido antes de dedicarse a la ingeniería, con obras como *Gallery of the Louvre*. También el médico e investigador portugués Abel Salazar compaginó su labor docente y de laboratorio con una prolífica producción artística y, en España, destacan figuras como Santiago Ramón y Cajal, cuyo legado incluye dibujos de gran relevancia científica. ■



El Cielo de Salamanca. Foto Santiago Santo

Los Pilares de la Creación, fotografía capturada por el telescopio espacial Hubble, NASA



Trayectorias de partículas tras la colisión de dos protones en el CERN. Foto-CERN

sentar el conocimiento científico, la ciencia también genera imágenes y formas que traspasan su propósito inicial para convertirse en arte.

Desde las grandes imágenes de galaxias lejanas hasta el mundo microscópico, la ciencia muestra sus propias obras. En 1995, el telescopio Hubble fotografió *Los Pilares de la Creación*, en la Nebulosa del Águila, columnas de gas y polvo interestelar donde nacen nuevas estrellas. Los compuestos de la nube aparecen en diferentes colores: verde para el hidrógeno, azul para el oxígeno y rojo para el azufre. En 2014, se volvieron a fotografiar con mayor resolución y, en 2022, fue el satélite James Webb el que capturó una nueva imagen con un nivel de detalle sin precedentes.

También el mundo microscópico produce arte, como se aprecia en las imágenes reticulares de conjuntos neuronales o en los cristales multicolores que forma la vitamina C y que se pueden apreciar bajo la luz polarizada.

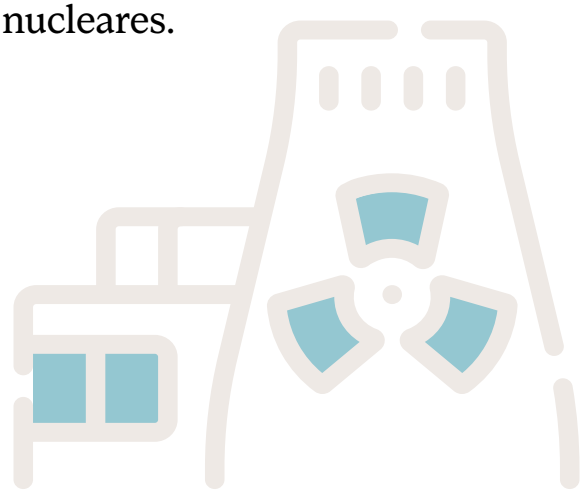
En el ámbito matemático, las imágenes de fractales revelan patrones infinitos que combinan complejidad y armonía. El más célebre es el conjunto de Mandelbrot que, cuando se representa en el plano complejo, se colorean de negro los puntos que pertenecen al conjunto (sucesión acotada) y con distintos colores aquellos que no pertenecen (sucesión divergente), según la velocidad con la que se alejan hacia el infinito. Las representaciones visuales del conjunto de Mandelbrot se generan mediante algoritmos informáticos que calculan la iteración para cada punto de una malla en el plano complejo, lo que da lugar a una imagen con gran detalle geométrico utilizada tanto en investigación matemática como en gráficos artísticos.

La física de partículas también produce arte: las trayectorias de las partículas generadas tras las colisiones que se producen en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN forman imágenes de cada evento, líneas de colores diferentes según la partícula que crean patrones intricados, en una fusión entre la ciencia y el arte que lleva viva desde los albores del tiempo. ■

NUEVA IS-48 EXPERIENCIA OPERATIVA

Texto: **José Antonio Rodríguez Díaz,** jefe de Área de Experiencia Operativa y Normativa (AEON)

El 1 de mayo de 2025 se publicó en el BOE la instrucción del Consejo de Seguridad Nuclear IS-48, de 9 de abril de 2025, por la que se establecen los criterios que deben cumplir los programas de experiencia operativa de las centrales nucleares.



De acuerdo con los estándares de seguridad (Safety Standards) del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) recogidos en el OIEA SSG-50, la experiencia operativa (EO) es información pertinente para el diseño, construcción, puesta en servicio, operación y desmantelamiento seguros de una instalación nuclear. La EO incluye, por ejemplo, eventos notificables y no notificables (incluidos los de bajo nivel), registros operativos, cuasi accidentes, buenas prácticas y toda otra información relacionada con la instalación nuclear. Los problemas relacionados con artículos o piezas no conformes, falsificadas, fraudulentas o sospechosas también deben identificarse e informar dentro del sistema EO.

La EO es una valiosa fuente de información para conocer y mejorar la seguridad y confiabilidad de las instalaciones nucleares.

Es importante aprender de la EO propia, pero también de la ajena, para prevenir sucesos que podrían afectar a la seguridad de las plantas.

Las lecciones extraídas de los análisis de la EO deben estar disponibles fácilmente para su aprovechamiento en los procesos de las plantas, especialmente en la preparación previa de trabajos, como pruebas de equipos y sistemas, mantenimiento, operaciones complejas, formación y cualquier otro que se pueda beneficiar de las lecciones aprendidas en la experiencia previa en trabajos similares.

LA IS-48 ESTABLECE LA SISTEMÁTICA DE ANÁLISIS DE EO, DIVIDIDA EN VARIAS FASES:

Fuentes de información

Además del análisis de los sucesos propios, los titulares analizan los sucesos de las demás centrales nucleares españolas, los emitidos por el país de origen del proyecto y los requeridos por el CSN.

Cribado

Todos sucesos e incidencias la EO propia se consideran directamente aplicables. En el caso de la EO ajena, el titular debe determinar si los sucesos obtenidos de las fuentes indicadas son de aplicación, es decir, si se pueden reproducir en su instalación, identificando similitudes como la tecnología, los componentes, los fabricantes, procesos similares y otros.

Análisis

Aquellos sucesos que se criben como aplicables serán objeto de investigación y evaluación para determinar si es necesario tomar acciones correctivas en la instalación con el fin de evitar la repetición del suceso si se produjo en la propia instalación, o que ocurra un suceso similar si se produjo en otra instalación.

Acciones correctivas

Analizado el suceso, se implantarán las acciones correctivas determinadas, en plazos coherentes con la importancia que se derive de la seguridad. Entre otras, pueden ser:

a) Modificaciones en la planta.

b) Cambios en procedimientos.

c) Formación.

Evaluación de la efectividad

Debe comprobarse que las acciones correctivas han sido efectivas y que las causas de los sucesos han sido resueltas. En caso contrario, hay que volver al punto 3 y reanalizar los sucesos.

El programa de análisis de experiencia operativa puede identificar las causas de los sucesos, permitiendo que se corrijan, para minimizar la probabilidad de repetición. También trata de evitar sucesos similares a los de otras instalaciones analizadas. Para ello, pueden llevarse a cabo actividades de modificaciones en planta, cambios en la forma de ejecución de trabajos y formación.

ES UN PROCESO CIRCULAR

Los resultados de la evaluación de la efectividad de las acciones correctivas sirven de entrada a la fase de análisis de los sucesos si no han sido eficientes o no se han tomado todas las requeridas, para mejorar, en última instancia, la seguridad de la instalación.

Caracterización, exhalación y remediación de radón en materiales de construcción (EXRADON)

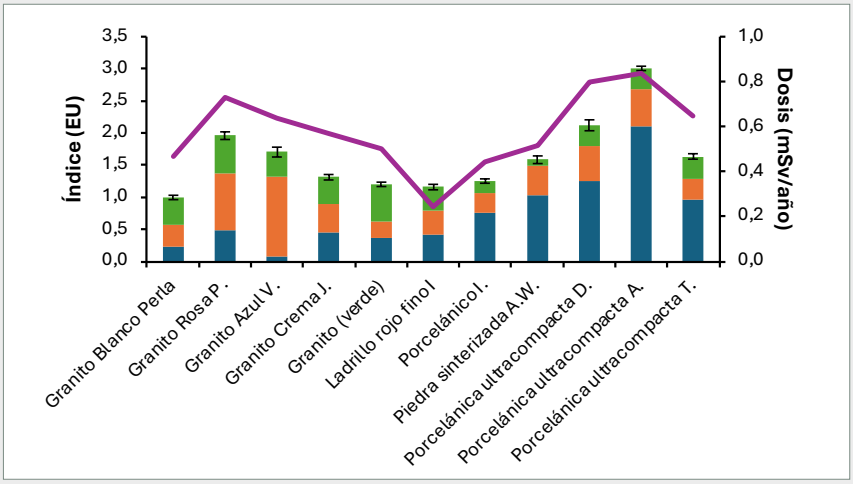
Marina Sáez, Aina Noverques, Beatriz Ruvira, Beatriz García Fayos, María Sancho, Belén Juste, Sebastián Martorell y Gumersindo Verdú
Universitat Politècnica de València

El radón es un enemigo invisible: un gas radiactivo, incoloro e inodoro, responsable de miles de casos de cáncer de pulmón cada año en Europa. Su origen está en suelos y materiales de construcción, desde donde penetra silenciosamente en hogares y lugares de trabajo. Tras el tabaco, constituye la segunda causa de cáncer de pulmón, que lo convierte en un problema de salud pública de primer orden (OMS, 2015). La Unión Europea ha respondido a este desafío con la Directiva 2013/59/Euratom, y España ha reforzado recientemente su marco regulador mediante el Real Decreto 1217/2024.

En este contexto se desarrolla el proyecto EXRADON (Caracterización, Exhalación y Remediación de Radón en Materiales de Construcción), financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y realizado por la Universitat Politècnica de València (2022-2024). Su finalidad es proteger la salud de la población, reduciendo la exhalación de radón de los materiales de construcción más utilizados en España.

Caracterización radiológica del material de construcción

La Directiva 2013/59/EURATOM, traspuesta a la legislación española en el RD 1029/2022, limita la exposición externa en recintos cerrados debida a la radiación gamma emitida por los materiales de construcción a 1 mSv/año. De esta manera, se analizaron 56 materiales de construcción mediante espectrometría gamma. Las actividades de ^{226}Ra y ^{232}Th se estimaron a través de sus descendientes en equilibrio secular: ^{214}Pb (351,92 keV) y ^{228}Ac (911,07 keV) respectivamente. La actividad de ^{40}K se estimó a través de su pico (1460,75 keV). Tras ello, se evaluó la contribución de cada isótopo en la dosis externa. Para las muestras con un índice mayor a 1, también se evaluó la dosis anual producida, teniendo en cuenta la densidad, espesor y uso previsto del material.



Índice de concentración de actividad (con las contribuciones de ■ ^{226}Ra, ■ ^{232}Th y ■ ^{40}K) y dosis anual producida (—) para materiales de construcción con I > 1.

La caracterización radiológica de estos materiales pone de manifiesto que las actividades de ^{226}Ra, ^{232}Th y ^{40}K son muy variables y son más altas en materiales con silicatos de circonio o arcillas. El mármol, terrazo y pladur presentan actividades muy bajas. Entre los materiales estructurales, los ladrillos presentan actividades superiores al hormigón, posiblemente por su composición arcillosa. En los materiales superficiales, el cuarzo sintético presenta actividades menores al resto.

En cuanto al índice de concentración de actividad, los mármoles, el hormigón, el pladur y el terrazo presentan índices bajos (I<0,4); las baldosas cerámicas están por debajo del límite (I=0,6-0,9), y el granito y los ladrillos presentan índices próximos/superiores a 1. Excepto el cuarzo sintético (I<0,2), los nuevos materiales presentan índices variables que a veces superan el límite. Para las muestras con un índice mayor a 1, también se evaluó la dosis anual producida y en todos los casos se obtuvieron dosis inferiores a 1 mSv/año. Por tanto, estos materiales podrían utilizarse desde el punto de vista de la protección radiológica.

De la caracterización experimental a una base de datos de referencia

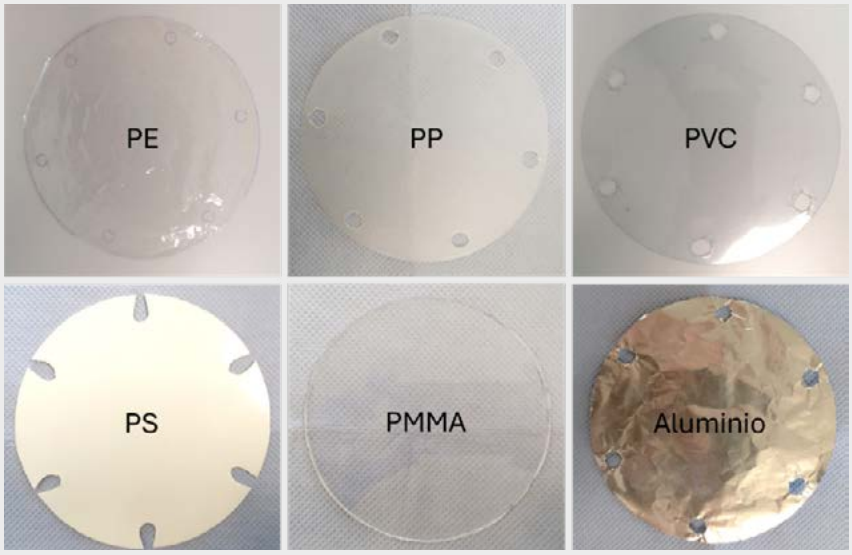
Se emplearon tres técnicas para medir y modelizar la exhalación de radón de materiales de construcción:

- *Detectores pasivos de electretes,* con ensayos de 3 días en cámara cerrada y cálculo de la exhalación mediante modelos derivados de Kotrappa & Stieff (2008).
- *Detectores de trazas sólidas,* también en cámara cerrada, con posterior revelado y análisis microscópico.
- *Detector en continuo RAD-7,* en circuito cerrado durante 14 días, aplicando tres modelos de ajuste: integrado, simplificado y pendiente en 24 horas, que permiten reducir significativamente los tiempos de ensayo.

Los resultados comparativos en tres granitos de alta actividad (Rosa P., Crema J. y Azul V.) mostraron que las metodologías ofrecen valores coherentes en un rango próximo, lo que confirma la validez de los métodos aplicados.

Se ha elaborado una base de datos de referencia con tasas de exhalación de

Jarra con el material de construcción y los detectores de radón de electrete y trazas. (fuente: elaboración propia)



Materiales poliméricos y aluminio utilizados para los ensayos multicapa

radón de más de cincuenta materiales de construcción. En conjunto, la simple caracterización radiológica no basta para predecir la contribución de un material a la concentración de radón en interiores, sino que es necesario medir su exhalación efectiva.

Técnicas de remediación de exhalación de radón

En el marco de este proyecto, se investigaron técnicas de remediación o tratamientos que permitan reducir la exhalación de radón de un material y que puedan aplicarse en la práctica.

Los materiales seleccionados fueron polímeros, materiales residuales laminados o multicapa difíciles de reciclar y materiales cubrientes (pinturas) aplicados sobre soportes neutros disponibles comercialmente.

El estudio de la eficacia se basó en realizar una caracterización microscópica mediante SEM-EDX, determinar experimentalmente el coeficiente de difusión de radón mediante una particularización del ensayo de la norma ISO/TS 11665-13, y calcular la longitud de difusión de radón y su porcentaje de reducción de concentración de radón.

De estos ensayos se concluyó que la configuración multicapa y aluminio es muy eficaz para reducir la concentración de radón. Además, la adición de aluminio entre algunas de esas capas es esencial para limitar todavía más el paso del radón.

En el caso de los materiales cubrientes se seleccionó una pintura comercial base vinílica, así como distintos soportes sobre el que aplicarla. Los valores de difusión obtenidos fueron elevados, lo que indica la necesidad de estudiar la aplicación de mejoras en la metodología de aplicación de la pintura y en el número de capas para mejorar los resultados.

Adicionalmente, se diseñó, construyó y puso en marcha una celda cúbica de ensayo estanca para simular un espacio interior en el que poder estudiar la eficacia de estos materiales adheridos sobre los materiales de construcción que exhalan radón.

De la exhalación a la exposición

En este proyecto, también se estimó la dosis recibida por la posible inhalación de radón en la estancia de una vivienda, a partir de la exhalación de distintos materiales de construcción. Para ello se desarrolló un modelo de concentración en interiores aplicado a uno de los casos más desfavorables: un cuarto de baño recubierto con granitos de alta exhalación (Rosa P. y Crema J.) y porcelánico.

El modelo combina las tasas de exhalación medidas en laboratorio con el volumen del espacio y distintas tasas de ventilación, calculando la concentración de radón resultante y la dosis anual efectiva recibida.

Los resultados muestran que:

- Sin ventilación, la concentración supera los 800 Bq/m³, alcanzando dosis de 2,35 mSv/año, muy por encima del límite recomendado de 1 mSv/año para el público.
- La dosis desciende rápidamente al aumentar la ventilación. Una tasa mínima de 0,02 renovaciones/hora es suficiente para mantener la dosis por debajo de 1 mSv/año.
- Los granitos estudiados presentan exhalaciones elevadas y contribuyen a la acumulación de radón en interiores.

En conclusión, la ventilación es el factor determinante para controlar la exposición en espacios cerrados, aunque la elección de materiales de construcción también resulta crítica. El modelo desarrollado constituye una herramienta práctica para evaluar escenarios de riesgo, definir medidas de mitigación y verificar el cumplimiento normativo en edificación.

El complejo de Seibersdorf cuenta con ocho laboratorios de aplicaciones nucleares

Laboratorios de Seibersdorf del OIEA

Complejo multidisciplinar para la aplicación de técnicas y seguridad nuclear

Texto: **Pablo Santamarta** | Fotos: **Dean Calma / OIEA**

El complejo de laboratorios de Seibersdorf forma parte del Departamento de Ciencias y Aplicaciones Nucleares del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y, desde su apertura en 1962, ha dado soporte técnico a los Estados miembros en el uso pacífico y de no proliferación de tecnología nuclear. Situado a las afueras de Viena, presta servicios analíticos y de calibrado, coordina ensayos colaborativos entre laboratorios y desarrolla metodologías y programas de entrenamiento. La evolución de las necesidades en el ámbito nuclear ha motivado la reciente renovación de sus instalaciones a través de la iniciativa «ReNuAL», y la ampliación del complejo para mejorar su respuesta a los retos futuros.

El complejo Seibersdorf integra un total de ocho laboratorios con capacidades multidisciplinares, que abarcan diversas áreas, como la alimentación y la agricultura, mediante la aplicación de técnicas nucleares para la seguridad alimentaria y el control de plagas; la salud humana, a través de la dosimetría y el uso de radioisótopos en aplicaciones médicas; la vigilancia medioambiental, enfocada en la detección y el análisis isotópico de contaminantes; la instrumentación analítica, con fines metrológicos; la protección radiológica y la seguridad física de materiales nucleares o radiactivos. Esta convergencia de disciplinas permite al complejo de Seibersdorf ofrecer soluciones integrales

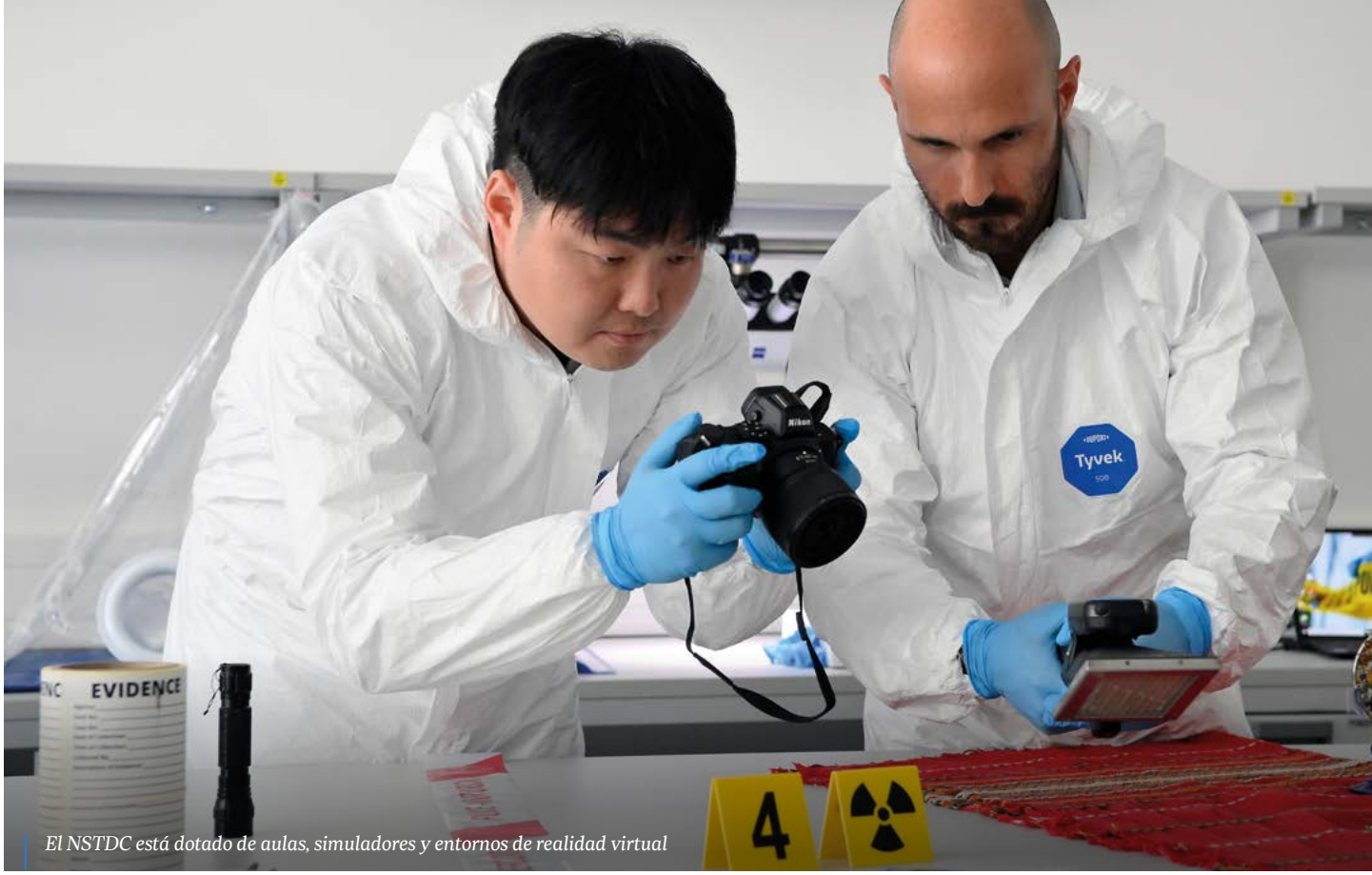
Simulador de monitorización para prácticas de seguridad nuclear

En su primer año de funcionamiento, se celebraron cincuenta eventos de formación con más de setecientos participantes

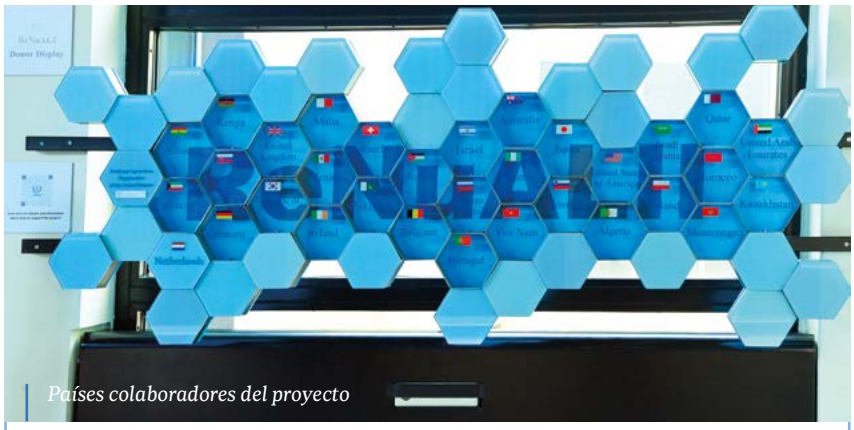
que combinan técnicas avanzadas, instrumentación de precisión y formación especializada.

Centro de Capacitación y Demostración

Resultado de la renovación y ampliación del complejo de laboratorios es el Centro de Capacitación y Demostración en Materia de Seguridad Nuclear (NSTDC, por sus siglas en inglés). Las instalaciones, inauguradas en octubre de 2023, han sido proyectadas específicamente para la seguridad nuclear. Su objetivo es colaborar con los Estados miembros para establecer y reforzar programas nacionales de protección física, con el fin de prevenir, identificar y responder a actos hostiles o incidentes que impliquen materiales nucleares o infraestructuras críticas. Para ello, el NSTDC combina formaciones prácticas, demostraciones *in situ* y ejercicios de cooperación técnica a gran escala. El centro está dotado de equipos avanzados y entornos de demostración que reproducen con fidelidad instalaciones reales de centrales, laboratorios, almacenes de combustible y unidades médicas, entre otras, y permite un entrenamiento en condiciones controladas de un promedio de mil participantes anuales. En su primer año de funcionamiento, celebró cincuenta eventos de formación con más de setecientos participantes.



El NSTDC está dotado de aulas, simuladores y entornos de realidad virtual


Países colaboradores del proyecto

Iniciativa «ReNuAL2»

En septiembre de 2020, el director general del OIEA, Rafael Mariano Grossi, anunció la última fase de la iniciativa de modernización de los Laboratorios de Aplicaciones Nucleares de Seibersdorf, conocida como ReNuAL2. Este esfuerzo reconoce la importancia de todos los laboratorios para ayudar a los Estados miembros a afrontar retos de desarrollo actuales y emergentes. En 2024 se completó la renovación del Laboratorio de Dosimetría, la construcción de nuevos invernaderos y de un edificio destinado a tres laboratorios que no habían sido modernizados en la fase anterior. Su puesta en marcha, a principios de 2025, marcó la conclusión de la iniciativa ReNuAL. En total, 52 Estados miembros y otros donantes aportaron cerca de 69 millones de euros en fondos extrapresupuestarios, además de contribuciones en especie y expertos colaboradores sin coste. Casi la mitad de estos países son naciones en desarrollo, lo que subraya el firme apoyo global al trabajo y modernización de las instalaciones. ■

Entre las áreas de formación impartidas se encuentra la protección física de materiales e infraestructuras críticas, la detección y respuesta ante actos malintencionados, la investigación forense nuclear, la seguridad informática y la preparación para eventos públicos donde han de aplicarse medidas cautelares de seguridad nuclear.

El centro dispone de simuladores y entornos de realidad virtual que facilitan la formación de los participantes a través de ejercicios prácticos. Un ejemplo destacado de la singular infraestructura del NSTDC es el Centro de Control de Demostraciones (DCC), dotado de un simulador de estación central de alarmas (CAS), réplica de las que habitualmente se encuentran en centrales nucleares. El edificio multipropósito cuenta, además, con una sala de demostración de protección física, donde los participantes pueden configurar, manipular y controlar diversos componentes de protección como sistemas de acceso y cámaras de vigilancia. La seguridad durante el transporte y manejo de fuentes radiactivas constituye un aspecto de máxima importancia, tanto si se trata de un traslado interhospitalario, de investigación o de

El centro dispone de un laboratorio de demostración de criminalística nuclear con microscopios, una caja de guantes y otros equipos pertinentes

> *Cada uno de los veintitrés cursos y talleres está diseñado para ser adaptable y responder a las necesidades formativas de los Estados miembros y cuentan con diferentes niveles de preparación*

una operación de repatriación, en la cual es vital garantizar el resguardo y la integridad de los materiales.

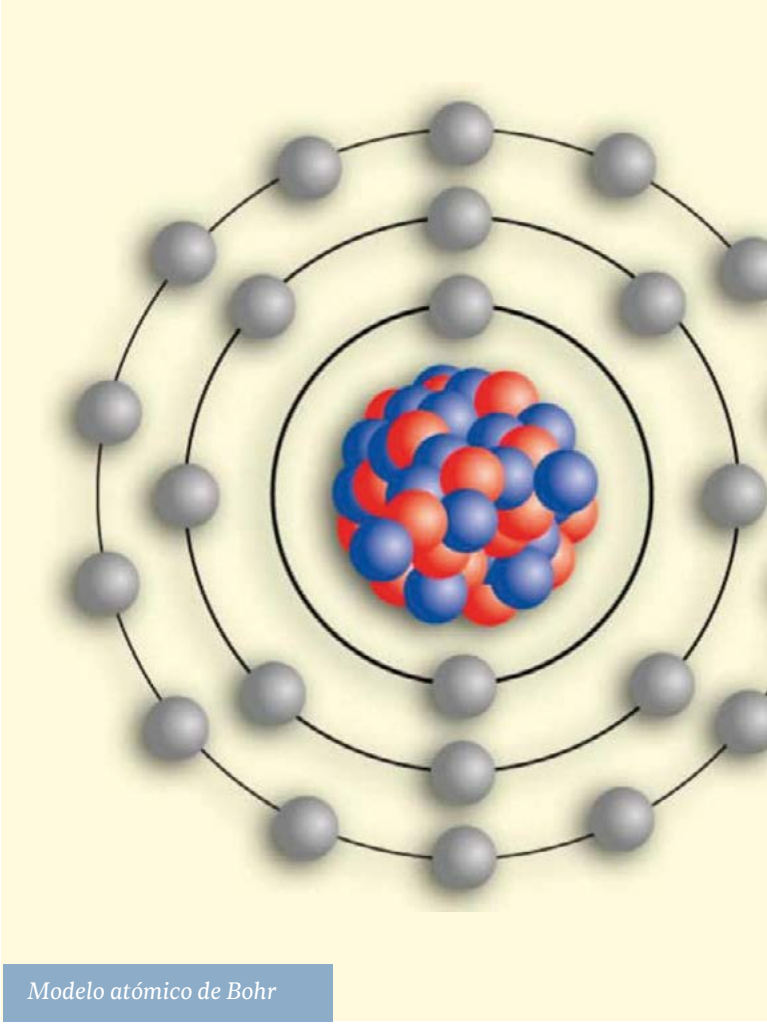
Cada uno de los veintitrés cursos y talleres está diseñado para ser adaptable y responder a las necesidades formativas de los Estados miembros y cuentan con diferentes niveles de preparación, desde la introducción a principios de seguridad física a análisis de vulnerabilidades o ejercicios de respuesta y gestión de incidentes. Este catálogo de cursos permite a las autoridades elegir y ajustar los contenidos a su contexto operativo, lo que facilita la aplicación y traslado de técnicas a los distintos campos de trabajo de operadores y fuerzas de seguridad. Gracias a la coordinación entre los Estados miembros y el OIEA, el plan formativo del NSTDC incluye visitas organizadas en sesiones prácticas cortas para distintos grupos profesionales, en las que se presencian demostraciones y se realizan ejercicios bajo supervisión de expertos del organismo. Las visitas proporcionan una rápida familiarización con los procedimientos técnicos, protocolos y herramientas que, de otra manera, exigirían cursos de mayor extensión o la adquisición de recursos costosos.

El programa de formación incorpora nuevos contenidos en ámbitos de alta demanda, como la seguridad informática –la protección de sistemas de control y redes ante ciberataques–, la investigación forense nuclear –metodología para el análisis de incidentes o trazas de material–, o la planificación de eventos públicos a gran escala que involucren riesgos o peligros radiológicos. Además, el OIEA integra en su programación directrices, publicaciones y marcos de referencia internacionales para la buena práctica operativa. Esta colaboración ha demostrado tener un impacto directo en la mejora de las capacidades de los organismos nacionales en el campo de la seguridad nuclear, dado que ha permitido a las autoridades responsables diseñar planes de protección mejor adaptados, seleccionar tecnologías según los criterios técnicos requeridos y facilitar la cooperación interinstitucional.

El NSTDC funciona como banco de pruebas para soluciones emergentes, lo que favorece la adopción informada de nuevas herramientas de análisis y prevención. La dimensión cooperativa –el intercambio entre participantes de distintas organizaciones y países del globo– contribuye a la estandarización de procedimientos y regulaciones, tanto a nivel nacional como internacional.

En 2021, el OIEA creó, además, el grupo «Amigos del NSTDC» con el propósito de coordinar apoyos y recursos, así como la movilización y concienciación acerca del proyecto, dado que gran parte de su sustento operativo depende de contribuciones de Estados miembros y donantes. ■

Niels Bohr



Modelo atómico de Bohr

Niels Bohr: del átomo cuántico a la política de un mundo abierto

Niels Bohr (1885-1962) encarna como pocos la paradoja de la modernidad: un hombre capaz de imaginar átomos cuánticos y, al mismo tiempo, advertir sobre las sombras de la política mundial. Sus teorías sobre la estructura del átomo y la dinámica del núcleo transformaron para siempre la física, pero su legado más profundo tal vez resida en haber demostrado que la ciencia no se escribe en el vacío, sino en el diálogo incesante con la cultura, la ética y la política. En él convergen la precisión del cálculo, la pasión por la discusión y una rara conciencia histórica que lo convierte, todavía hoy, en un referente de cómo el conocimiento científico puede iluminar –y también interpelar– el destino de la humanidad.

Texto: **Desiré Alija**

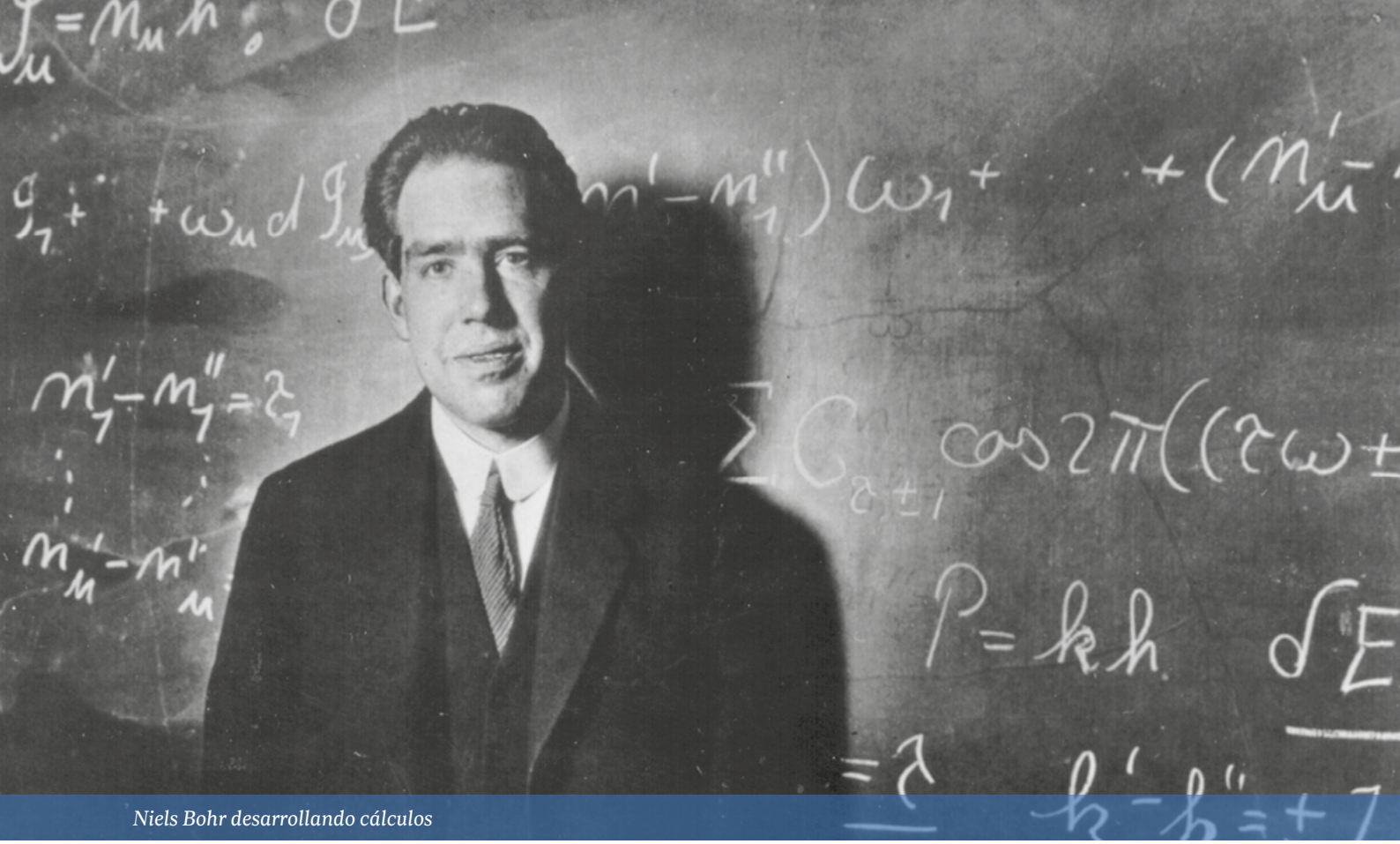
Hijo de Christian Bohr –fisiólogo de renombre en la Universidad de Copenhague– y de Ellen Adler –miembro de una familia judía culta y comprometida con la vida cívica danesa–, Bohr creció en un ambiente que conjugaba ciencias y humanidades. En 1908, aún estudiante, obtuvo un premio de la Real Academia Danesa de Ciencias por un trabajo sobre la tensión superficial en chorros líquidos, una muestra temprana de ingenio. En 1911, defendió su tesis doctoral sobre la teoría electrónica de los metales y, ese mismo año, viajó a Cambridge para trabajar con J. J. Thomson. El contacto resultó tibio y pronto se

Ceremonia de Honores en la Universidad de Cambridge, el 12 de junio de 1923

Niels Bohr y Albert Einstein, debatiendo sobre física cuántica en diciembre de 1925 en casa del físico Paul Ehrenfest, en Leiden. En aquel entonces eran conocidos los debates que sostuvo Bohr con el físico Einstein con respecto a las leyes de la relatividad y la física cuántica. Pese a sus diferencias, Einstein afirmó que Bohr era uno de los más grandes investigadores científicos por aquel entonces.

El espectro del hidrógeno, hasta entonces un jeroglífico de líneas inexplicables, quedaba por fin descifrado. La teoría le valió el Premio Nobel de Física, en 1922, por sus investigaciones sobre la estructura del átomo y la radiación que emana de él.

trasladó a Mánchester, donde Ernest Rutherford acababa de descubrir el núcleo atómico. Fue allí donde Bohr comprendió que, si los electrones orbitaban en torno a un núcleo positivo, la física clásica no



Niels Bohr desarrollando cálculos

bastaba para explicar ni la estabilidad ni los espectros de emisión.

En 1913, publicó en *The Philosophical Magazine* la célebre trilogía «On the Constitution of Atoms and Molecules», que proponía un modelo revolucionario: los electrones solo podían ocupar órbitas discretas y la radiación se emitía o absorbía en saltos entre ellas, con energías proporcionales a la constante de Planck. El espectro del hidrógeno, hasta entonces un jeroglífico de líneas inexplicables, quedaba por fin descifrado. La teoría, fecunda y precisa, le valió el Premio Nobel de Física, en 1922, por sus investigaciones sobre la estructura del átomo y la radiación que emana de él. A la vez, formuló el principio de correspondencia, brújula metodológica que garantizaba la coherencia de la nueva física con la antigua en sus límites de validez.

Instituto de Física Teórica de Copenhague

Convencido de que la buena teoría se alimenta de un entorno fértil, Bohr impulsó la creación del Instituto de Física Teórica de Copenhague, inaugurado en 1921. Allí se formaron Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Léon Rosenfeld, George de Hevesy y Oskar Klein, entre otros, convirtiéndose durante las décadas de los veinte y los treinta en un ágora austera, pero vibrante, de discusión científica. En 1922-1923, Dirk Coster y George de Hevesy confirmaron en esos mismos laboratorios la predicción de Bohr sobre el elemento 72, el hafnio, demostrando la fecundidad de su esquema electrónico.

Décadas más tarde, visitantes privilegiados del Instituto recordaban el asombro de adentrarse en sus archivos históricos, guiados por Ben Mottelson –premio nobel junto a Aage Bohr–, y descubrir allí ejemplares olvidados de *Sources of Quantum Mechanics*, antología publicada en 1967 por el matemático-historiador B. L. van der Waerden. El volumen reunía quince artículos fundacionales de los años 1924-1926, firmados por Max Born, Pascual Jordan, Werner Heisenberg, Paul Dirac y Wolfgang Pauli, entre otros, verdaderos ladrillos de los cimientos de la mecánica cuántica.

Principio de complementariedad

En septiembre de 1927, durante el congreso del segundo centenario de Volta en Como, Bohr expuso su principio de complementariedad: la idea de que fenómenos como la dualidad onda/partícula exigen marcos conceptuales incompatibles, pero igualmente indispensables, cuya aplicación depende de las condiciones experimentales. Al año siguiente, desarrolló esta tesis en un artículo clásico en *Nature*. Las discusiones con Albert Einstein, que se prolongaron en los congresos Solvay, simbolizan la tensión intelectual.

Einstein, escéptico, buscaba señalar los límites de la nueva física con experimentos imaginarios; Bohr respondía con contraejemplos que mostraban la solidez del marco cuántico. El experimento de «la caja de Einstein» se presentó en 1930 y Bohr lo refutó ese mismo año, en el propio congreso. Sea como fuere, ambos hitos consolidaron ese periodo como decisivo para el auge de la mecánica cuántica.

En esos mismos años, el clima cultural de la República de Weimar impregnaba Europa. El arte de Otto Dix o Bertolt Brecht, el cine de Fritz Lang o la literatura de Thomas Mann reflejaban un mundo convulso, marcado por la inflación, la

Niels Bohr, James Franck, Albert Einstein e Isidor Isaac Rabi, en el proyecto Manhattan

inestabilidad política y el ascenso de extremismos. Paul Forman propuso que la mecánica cuántica, en su audacia conceptual, estuvo influida por ese ambiente. La tesis ha sido discutida, pero es indudable que ciencia y cultura compartieron una misma atmósfera de paradoja, crisis y creatividad.

Noción de «núcleo compuesto»

A mediados de los años treinta, Bohr trasladó su atención al núcleo atómico. Introdujo la noción de «núcleo compuesto»: al capturar un neutrón, el núcleo forma un estado excitado que redistribuye su energía antes de emitir partículas o radiación. En 1939, junto con John A. Wheeler, elaboró el modelo de la gota líquida, que comparaba el núcleo con una gota deformable capaz de dividirse en dos fragmentos. El descubrimiento de la fisión del uranio por Otto Hahn y Fritz Strassmann, interpretado por Lise Meitner y Otto Frisch, encontró en este modelo la explicación que necesitaba. Ese mismo año, Bohr identificó que la fisión inducida por neutrones lentos dependía casi exclusivamente del isótopo U-235, hallazgo de trascendencia práctica que prefiguraba la necesidad de separar isótopos para lograr una reacción en cadena.

La invasión alemana de Dinamarca, en 1943, convirtió el Instituto de Copenhague en un lugar vulnerable. Ante el riesgo de arresto, Bohr logró escapar por mar a Suecia y, poco después, volar a Reino Unido y Estados Unidos. En Los Álamos trabajó bajo el alias «Nicholas Baker», acompañado de su hijo Aage, rebautizado como «James Baker». Su papel en el Proyecto Manhattan no fue el de un ingeniero de detalle,

CONCEPTOS CLAVE

- **Complementariedad:** principio introducido por Bohr (1927-1928) según el cual ciertos aspectos de un fenómeno cuántico (onda/partícula) son descripciones excluyentes, pero necesarias, que se manifiestan según el dispositivo experimental. Exige especificar siempre las condiciones de observación.
- **Principio de correspondencia:** criterio metodológico (1923) que obliga a que la teoría nueva reproduzca los resultados de la anterior en su dominio de validez (p. ej., la cuántica debe coincidir con la clásica para números cuánticos grandes).
- **Núcleo compuesto:** idea de que, tras captar un neutrón, el núcleo forma un estado excitado que redistribuye su energía antes de desintegrarse (mediados de los años treinta).
- **Modelo de la gota líquida**: analogía entre el núcleo y una gota (Bohr y Wheeler, 1939) que puede deformarse y dividirse; marco para entender la fisión.
- **Isótopos y fisión térmica:** reconocimiento (Bohr, 1939) de que el U-235 –y no el U-238– es el principal responsable de la fisión inducida por neutrones lentos en el uranio natural.

Complementariedad

Por muy lejos que los fenómenos trasciendan el ámbito de la explicación clásica, el relato de la evidencia debe expresarse en términos clásicos

«The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory», *Nature* 121, 1928.

Contraria sunt complementa (Los contrarios son complementarios).

Lema personal adoptado por Bohr en 1947, al recibir la Orden del Elefante.

Conocimiento y límites

La física no se ocupa de cómo es la naturaleza, sino de lo que podemos decir acerca de la naturaleza

Declaración repetida en los congresos Solvay (1927-1930).

Mundo abierto y cooperación nuclear

La situación del mundo requiere, de manera urgente, que las naciones del mundo lleguen a acuerdos para mantener la seguridad a través de la confianza mutua, y no del secreto.

Carta abierta a las Naciones Unidas, 9 de junio de 1950.

Espíritu científico

Cada valiosa contribución al progreso del conocimiento tiene su origen en la paradoja

Atomic Physics and Human Knowledge, 1958.

Niels Bohr frente a su Instituto de Física Teórica en 1957. En 1965, con motivo del 80 aniversario de su nacimiento, pasó a llamarse oficialmente Instituto Niels Bohr

sino el de un consejero con gran autoridad conceptual, que analizaba supuestos, advertía sobre riesgos de enfoque y aportaba la perspectiva de quien veía más allá de la urgencia bélica. La experiencia, sin embargo, lo marcó profundamente: simbolizaba la entrada de la física en la era de la Megaciencia, en la que los descubrimientos fundamentales podían decidir el destino de naciones enteras.

Tras la guerra, Bohr se convirtió en un referente moral e intelectual. En 1950, publicó su *Carta abierta a las Naciones Unidas,* donde defendía que la seguridad no podía basarse en el secreto nuclear, sino en la cooperación internacional y en acuerdos verificables. Su ideario cristalizó en instituciones: el establecimiento de investigación nuclear de Risø, inaugurado en 1958, y el CERN, cuyo grupo teórico provisional se alojó en su Instituto de Copenhague entre 1952 y 1957. En 1947, recibió la Orden del Elefante, la más alta distinción danesa y diseñó un escudo heráldico con el símbolo del yin-yang y el lema *Contraria sunt complementa,* asociado a la Orden. Era la síntesis visual de una vida consagrada a reconciliar contrarios.

Bohr murió en Copenhague el 18 de noviembre de 1962, pero su huella permanece. Su legado atraviesa tres planos inseparables: el científico, con el modelo atómico, la complementariedad y la teoría de la fisión; el institucional, con el Instituto de Copenhague, Risø y el CERN como símbolos de la cooperación internacional; y el ético, con su defensa de un «mundo abierto» frente a la tentación del secreto y la desconfianza.

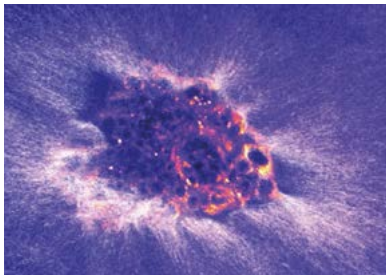
Un siglo después, cuando la mecánica cuántica sostiene tecnologías tan revolucionarias como la computación cuántica, las telecomunicaciones avanzadas o la biotecnología, la voz de Bohr se mantiene actual. Fue un físico que hizo de la paradoja un método de conocimiento y supo ver que la ciencia, lejos de ser un refugio aséptico, está llamada a participar en la responsabilidad histórica.

WISPIT 2b: el nacimiento de un nuevo mundo

La astronomía acaba de sumar un capítulo fascinante a su historia: la detección de WISPIT 2b, un planeta en formación con apenas cinco millones de años, que orbita una estrella joven semejante a nuestro Sol. En términos cósmicos, se trata de un recién nacido, aún en proceso de acumular gas para tejer la urdimbre de su atmósfera. Los astrónomos lo describen como un gigante gaseoso de dimensiones comparables a Júpiter, identificado en el desierto de Atacama gracias al Telescopio Muy Grande del Observatorio Europeo Austral. Su importancia radica en que constituye la primera evidencia indiscutible de un planeta gestándose en un disco con múltiples anillos y trasciende la mera estadística de exoplanetas conocidos –más de cinco mil–, al ofrecernos una ventana privilegiada hacia el propio origen del sistema solar y los procesos cósmicos que lo hicieron posible. ■

Primeras imágenes de la implantación de un embrión humano

Investigadores del Instituto de Bioingeniería de Cataluña (IBEC) han conseguido registrar por primera vez, en tiempo real y en tres dimensiones, el proceso de implantación de un embrión humano. El estudio constituye un auténtico hito científico, al iluminar uno de los episodios más enigmáticos y trascendentes del origen de la vida. El equipo ha diseñado una plataforma experimental capaz de recrear en el laboratorio las capas externas del útero, lo que ha permitido constatar cómo el embrión despliega una «fuerza considerable» para abrirse paso en el tejido uterino y afianzarse en él por completo. Una vez integrado, inicia un crecimiento radial y establece conexiones con los vasos sanguíneos maternos que garantizarán su desarrollo. Dado que el fallo en la implantación es responsable de hasta el 60 % de los abortos espontáneos, conocer estos mecanismos abre



nuevas perspectivas para mejorar las tasas de fertilidad y perfeccionar los procedimientos de reproducción asistida. ■

EFEMÉRIDES

Un siglo de Wilk–Peltier, el cometa que unió dos cielos

Entre el 13 y el 19 de noviembre de 1925, el firmamento ofreció a dos observadores separados por miles de kilómetros la misma revelación: un nuevo cometa, catalogado como C/1925 V1 (Wilk–Peltier). El polaco Antoni Wilk y el estadounidense Leslie C. Peltier –este último llamado a convertirse en figura señera de la astronomía *amateur*– identificaron de manera independiente un cuerpo celeste de naturaleza no periódica y trayectoria hiperbólica, destinado a no retornar jamás a nuestros cielos. La detección de este objeto pone de manifiesto el papel insustituible que desempeñaban los observadores individuales en la cartografía celeste de la época, cuando la observación visual seguía siendo pilar fundamental frente a los incipientes métodos fotográficos. Este hallazgo constituye, además, un paradigma de sincronía internacional en la investigación astronómica, anticipando la progresiva conformación de las redes globales de comunicación científica que transformarían el quehacer astronómico a lo largo del siglo XX. ■

LIBROS

Un dinosaurio en un pajar

Stephen Jay Gould despliega en este volumen su ingenio como uno de los más brillantes divulgadores científicos contemporáneos. Recorre temas tan dispares como la disputa sobre el verdadero inicio del milenio, las sombras de Frankenstein, la fortuna editorial de Edgar Allan Poe o el mito de la Tierra plana. Su estilo, a la vez riguroso e irónico, tiende puentes entre historia natural, cultura y literatura. En cada tema emerge una reflexión sobre la vida, el lugar del hombre en el cosmos y las falsas bases científicas de prejuicios como el racismo o la marginación de la mujer. El resultado es una obra crítica y amena que convierte el conocimiento en un ejercicio de deleite intelectual. ■

Gould, S. J. (2025)
Un dinosaurio en un pajar
Editorial Crítica, 488 pp.

EN RED

El depredador de dinosaurios del Cretácico patagónico

La paleontología suma un nuevo hallazgo inédito: los restos fósiles del Kostensuchus atroz, un peirosáurido extinguido que habitó hace unos setenta millones de años en el Cretácico tardío. Este formidable reptil, de tres metros de longitud, 250 kilos y un cráneo de medio metro, se perfila como uno de los depredadores más formidables de su tiempo. Los fósiles, exhumados en la formación de El Chorrillo, en la Patagonia Argentina, indican que, aunque próximo a los cocodriliformes actuales, pertenecía a una línea evolutiva diferenciada, caracterizada por un cráneo alto, órbitas laterales y narinas frontales, rasgos que delatan hábitos terrestres. Sus patas erectas sugieren locomoción cursorial, ideal para emboscar presas como

el herbívoro Isasicursor. El hallazgo no solo amplía el conocimiento sobre la diversidad mesozoica, sino que confirma las conexiones biogeográficas entre Sudamérica y África cuando ambas formaban parte de Gondwana, en un paisaje por aquel entonces cálido y fértil, poblado por dinosaurios, tortugas y primeros mamíferos. ■

Más información: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0328561

Primer xenotrasplante de pulmón porcino a humano

Un equipo de la Universidad de Guangzhou en China ha alcanzado un hito inédito en la medicina traslacional: el primer trasplante de un pulmón de cerdo modificado genéticamente en un receptor humano en estado de muerte cerebral. El injerto se mantuvo viable durante nueve días, sin rechazo inmunitario inmediato ni infecciones severas, aunque mostró signos tempranos de daño pulmonar y rechazo mediado por anticuerpos en los días sucesivos. El paciente, de 39 años, conservó su pulmón derecho, mientras que el órgano implantado procedía de un cerdo modificado genéticamente con la técnica CRISPR, destinada a eliminar antígenos incompatibles. El trasplante pulmonar representa un desafío singular frente a riñones o hígados, debido a la extrema vulnerabilidad fisiológica de este órgano, sometido a alto flujo sanguíneo y exposición constante al aire. El ensayo acredita la posibilidad de mantener su funcionalidad bajo condiciones clínicas controladas, aunque sus resultados no son directamente extrapolables a pacientes vivos y requirieron un régimen de inmunosupresión intensiva. El procedimiento, todavía experimental, resalta la necesidad de perfeccionar las modificaciones genéticas, los protocolos inmunosupresores y las estrategias de preservación del injerto, y abre una nueva vía de investigación frente a la acuciante escasez global de órganos para trasplante. ■

Más información: https://www.nature.com/articles/s41591-025-03861-x

REDES

In a Nutshell

Uno de los canales de ciencia más influyentes de YouTube, con más de veinticuatro millones de suscriptores. Se caracteriza por sus animaciones minimalistas y coloridas, que explican temas complejos de física, biología, tecnología y filosofía con estilo accesible.

Hashem Al-Ghaili

Bajo el nombre de *Science Nature* y con más de 35 millones de seguidores, este biólogo molecular y comunicador científico se destaca por sus infografías y vídeos originales que combinan estética visual impactante con rigor divulgativo. Sus videos tienen más de veinte mil millones de visualizaciones y abarcan temáticas que van desde avances científicos hasta conceptos futuristas o especulativos.

@AstroKatie

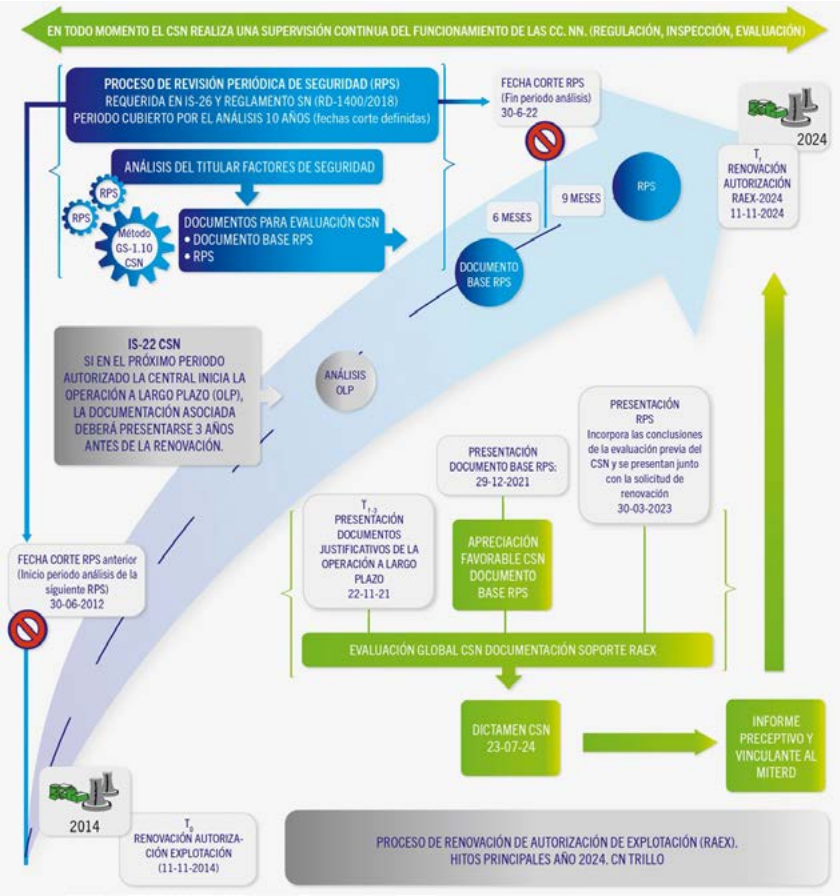
Katie Mack, cosmóloga teórica y profesora de astrofísica, combina publicaciones de investigación de alto nivel con divulgación inteligente y accesible. Es especialmente reconocida entre sus miles de seguidores por sus hilos informativos, su participación en debates científicos y por llevar ideas complejas al público de forma entretenida.

@becausesizematters

Científica especializada en materiales y nanotecnología, investigadora y una de las divulgadoras de habla hispana más seguidas en redes, Anna Morales se ha hecho popular en esta cuenta por explicar biología, química y física a través de Pokémon, conectando ciencia y cultura pop. Su estilo creativo, basado en ilustraciones y referencias lúdicas, acerca conceptos complejos a públicos jóvenes.

@dr.karanr

Karan Rajan, cirujano del NHS, divulgador y profesor universitario, acumula casi seis millones de seguidores en TikTok. En su contenido, combate mitos sanitarios y aclara desde remedios caseros absurdos hasta fenómenos fisiológicos, con estilo agudo, claro y accesible.



El CSN informa al Parlamento del correcto funcionamiento de las instalaciones reguladas en su informe anual de 2024

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) remitió al Congreso de los Diputados y al Senado su informe anual de actividades de 2024, en el que se recogen las principales actuaciones desarrolladas por el organismo regulador durante el pasado ejercicio. El documento confirma que todas las instalaciones nucleares y radiactivas funcionaron de forma segura, garantizando la protección radiológica de la población, de los trabajadores y del medio ambiente. Asimismo, la vigilancia radiológica ambiental, tanto en las áreas próximas a las instalaciones como en el resto del territorio nacional, se mantuvo en niveles adecuados, sin riesgo para las personas.

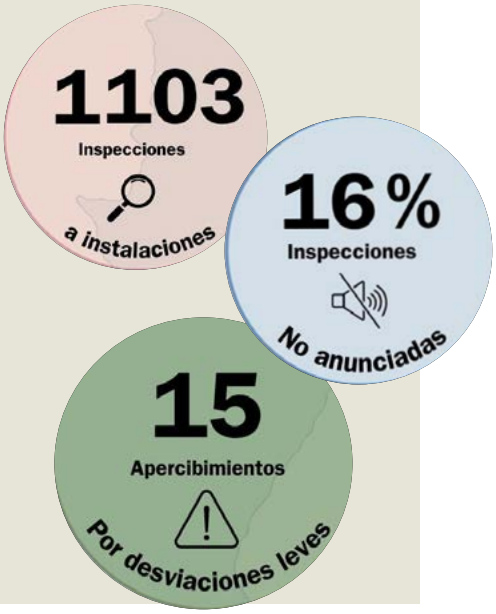
En el ámbito de la seguridad nuclear, la actuación más significativa del CSN fue la exhaustiva evaluación de la solicitud de renovación de la autorización de explotación de la central nuclear Trillo (Guadalajara) para un periodo de diez años. El proceso concluyó en julio de 2024 con el informe favorable, con condiciones, emitido por el Pleno del CSN.

El organismo también autorizó la ejecución y montaje de los almacenes temporales individualizados de las centrales de Vandellós II y Ascó (Tarragona), trabajó en la revisión entre pares sobre protección contra incendios establecida en la Directiva 14/87/Euratom, e informó favorablemente el nuevo Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas y otras actividades relacionadas con la exposición a radiaciones ionizantes (RINR). Asimismo, se conmemoró el 40.º aniversario del programa de Inspección Residente, pieza clave en el sistema de supervisión y seguridad de las centrales nucleares españolas.

Inspecciones a instalaciones radiactivas en 2024

El informe anual del CSN sobre los resultados del programa de inspecciones realizadas durante 2024 a instalaciones radiactivas y de radiodiagnóstico médico en España concluye que las instalaciones radiactivas en España operan de manera segura, conforme a la normativa vigente. Además, destaca que la identificación y corrección de desviaciones han permitido implementar mejoras continuas, reforzando la cultura de seguridad en estas instalaciones.

Durante el pasado año, el regulador llevó a cabo un total de 1103 inspecciones: 889 se realizaron a instalaciones radiactivas, abarcando tanto inspecciones de supervisión y control como de licenciamiento. El regulador también revisó 214 instalaciones de radiodiagnóstico. Estas acciones son esenciales para asegurar y garantizar que las instalaciones operen de manera segura y cumplan con toda la normativa y criterios reguladores. Los datos evidencian que el regulador realizó un 8,66 % más de las actuaciones programadas, ya que en la previsión anual de inspecciones se proyectaba realizar 1015.



El SISC categoriza 17 hallazgos de inspección en el primer trimestre de 2025

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) fue informado de los resultados del Sistema Integrado de Supervisión de Centrales (SISC) correspondientes al primer trimestre de 2025. Entre enero y marzo se realizaron 13 inspecciones a las centrales nucleares en operación. En este periodo se categorizaron 17 hallazgos de inspección clasificados de «muy baja importancia para la seguridad», por lo que fueron categorizados con código verde.

Una vez evaluados los resultados del programa de inspección junto a los parámetros o indicadores de funcionamiento de cada instalación, en el primer trimestre del año todos los reactores en operación se encontraban en la columna de «respuesta del titular» de la matriz de acción del SISC, salvo las dos unidades de la central nuclear Almaraz, que continúan en«respuesta reguladora» por los hallazgos categorizados como blancos en el segundo trimestre de 2024.

El CSN y Enusa refuerzan su colaboración

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) celebró el 8 de julio la reunión semestral del comité de enlace entre el organismo regulador y Enusa, Industrias Avanzadas. Un encuentro donde se revisaron los principales temas de interés común en los ámbitos del licenciamiento, las actividades mineras, el desmantelamiento de instalaciones y los proyectos de I+D+i en los que el regulador está implicado.

Entre otros temas, abordaron la evolución de los trabajos en los emplazamientos de Saelices el Chico (Salamanca), La Haba (Badajoz) y el proyecto PramuCYL (Programa de Restauración de las Antiguas Minas de Uranio de Castilla y León).

ACUERDOS DEL PLENO DEL CSN

Luz verde a la primera fase del Centro de protonterapia de Galicia

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) informó favorablemente la autorización de funcionamiento del Centro de protonterapia de Galicia, dependiente del Sistema Gallego de Salud, ubicado en el Hospital Clínico Universitario de Santiago de Compostela.

Acceso a todas las actas

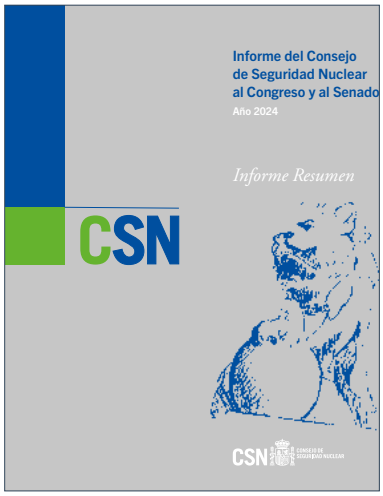
ITC sobre el cumplimiento de los condicionados de las instalaciones nucleares en operación

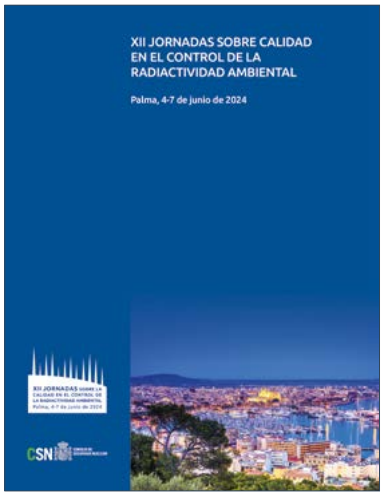
El Pleno del CSN acordó la emisión de una Instrucción Técnica Complementaria (ITC) a las instalaciones nucleares españolas en funcionamiento sobre el seguimiento y el cumplimiento de los condicionados y del resto de normativa emitida a cada instalación. De esta forma, requiere a los titulares de las centrales nucleares Almaraz I y II, Ascó I y II, Cofrentes, Trillo y Vandellós II, así como al de la fábrica de elementos combustibles de Juzbado, la remisión de un informe anual que incluya, para cada requisito establecido, el estado de situación y las acciones ejecutadas para alcanzar su cumplimiento.

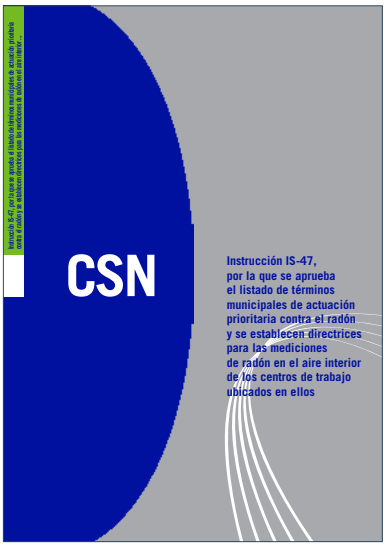
El CSN y el consorcio IFMIF-DONES acuerdan una hoja de ruta para el licenciamiento de la instalación

El CSN celebró la reunión del comité de enlace con representantes del proyecto de la Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión y Fuente de Neutrones orientada a Demo (IFMIF-DONES respectivamente por sus siglas en inglés). Este proyecto se convertirá en una instalación científica única a nivel mundial, orientada a probar materiales para futuros reactores de fusión, en el marco del desarrollo de esta energía como fuente segura.

ÚLTIMAS PUBLICACIONES







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]

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 > The future of radiotherapy: precision and reduced damage to healthy tissues

Techniques such as proton therapy and FLASH radiotherapy offer more precise, safer, and personalized cancer treatments.

REPORTS

14 > Is there life beyond Earth? The origin of life: its limits and possible existence in the Universe

A set of favourable conditions and a series of chemical reactions gave rise to life on Earth. But perhaps it isn't the only place...

22 > Geoengineering: alternatives to accelerate the race against climate change

Global warming continues to rise, and the scientific community is striving to control it from multiple fronts

INTERVIEW

28 > Alfredo Poves Paredes

Mentor to generations of of nuclear physicists, and pioneer in the study of the shell model and in international collaboration.

TECHNICAL ARTICLES

32 > 25th anniversary of the signing of the Protocol for Collaboration on Monitoring Radiation of Metallic Materials

41 > Evaluation of the application for renewal of the operating license for the Trillo Nuclear Power Plant

SCIENCE AND ART

47 > From uranium to ultramarine: the science that gives colour to art

RADIOGRAPHY

52 > New ISO 48

Published on May 1, 2025, it sets out the criteria that operational experience programs at nuclear power plants must meet

CSN I+D

54 > Characterization, Exhalation and Remediation of Radon in Construction Materials (EXRADON)

ENTITIES

56 > Seibersdorf Laboratories of IAEA

A multidisciplinary complex dedicated to the application of techniques for nuclear safety

NAMES IN SCIENCE

60 > Niels Bohr: from the quantum atom to the politics of an open world

A pioneer in revealing the quantum structure of the atom, he was also a thinker who foresaw the ethical and political implications of science

¡Conecta con nosotros!

https://twitter.com/CSN_es

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

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

http://www.csn.es

TRANSPARENCIA › COMUNICACIÓN › DIVULGACIÓN