

Un telescopio de neutrinos bajo el hielo del Polo Sur

Los nuevos requisitos en
transporte de material
radiactivo que entran en
vigor en 2021

Pilar Lucio, consejera del CSN:
“Mejorar la información
y la comunicación con la
ciudadanía es uno de los
principales retos del Consejo”

Tecnologías nucleares ayudan
a cumplir los Objetivos de
Desarrollo Sostenible de
Naciones Unidas

Nueva sede electrónica del CSN



El Consejo de Seguridad Nuclear ha renovado su sede electrónica para ampliar el número de trámites que se pueden realizar por medios telemáticos y facilitar su operatividad tanto a instituciones como a empresas y particulares.

Entre la veintena de trámites que están ahora disponibles mediante esta vía destacan los siguientes:

- ▶ Registro general
- ▶ Pago de tasas
- ▶ Solicitudes de acreditación para operar o dirigir instalaciones radiactivas o de radiodiagnóstico médico
- ▶ Consultas y solicitudes de información al portal de Transparencia
- ▶ Envío de ficheros y documentación
- ▶ Consulta por parte de los trabajadores expuestos de sus datos en el Banco Dosimétrico Nacional
- ▶ Denuncias radiológicas
- ▶ Solicitudes de visita al Centro de Información

<https://sede.csn.gob.es>

Vidas salvadas gracias a las vacunas

Abrimos un nuevo número de *Alfa* abordando los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que Naciones Unidas ha incluido en su Agenda 2030. Un listado de 17 desafíos en el que las radiaciones pueden desempeñar un papel importante; por ejemplo, a través de la esterilización de plagas o la descontaminación del agua. El CSN se ha apoyado firmemente en estos ODS para el diseño de su nuevo Plan Estratégico 2020-2025.

La primera vacuna fue desarrollada a finales del siglo XVIII tras casi dos décadas de observación e investigación. En 2020, hemos visto casi minuto a minuto cómo se han diseñado las que nos inmunizan frente a la covid-19 y todos podemos recitar sus nombres de carrerilla. En este número explicamos los mecanismos empleados en el desarrollo de las vacunas de hoy, que abren las puertas a futuras aplicaciones para los virus del mañana.

El gigantesco páramo blanco de la Antártida tiene como habitante a uno de los mayores telescopios del mundo: el IceCube. Este hueco de un kilómetro cúbico excavado a 2.500 metros bajo el hielo en las inmediaciones de la base Amundsen-Scott, en pleno Polo Sur, consta de unos 5.000 sensores y cumple diez años ahora. Su misión es detectar las partículas más comunes y a la vez extrañas del universo, los neutrinos cósmicos.

Tras la secuenciación del genoma humano y del proteoma, el interactoma abre hoy las puertas al estudio del comportamiento celular desde otra perspectiva, la cual permitirá comprender enfermedades y hallar nuevos tratamientos mediante la aplicación de nuevas técnicas de nanotecnología y biomedicina. Se trata del mapa que desvela las diferentes interacciones que se producen entre las proteínas

*Especialistas de
dos grandes hospitales
nos cuentan
la organización de la
protección radiológica
hospitalaria durante
las primeras olas
de la pandemia*

dentro de las células y que son esenciales para el funcionamiento del organismo.

Cerramos la sección divulgativa de *Alfa* con un reportaje dedicado a la luz ultravioleta, invisible a nuestros ojos, pero peligrosa para nuestra piel. Y también con muchas y diferentes aplicaciones prácticas; entre ellas, desinfectar espacios y objetos, ya que es capaz de destruir los microorganismos que pue-

den generar enfermedades descomponiendo su ADN en pequeños fragmentos sin actividad biológica, por lo que se está empleando en algunos espacios cerrados para prevenir la propagación del virus causante de la pandemia actual.

La comunicación con la ciudadanía, la transparencia y la necesaria independencia del CSN son algunos de los asuntos que aborda en sus respuestas la consejera Pilar Lucio, protagonista de la entrevista de este trimestre.

En las páginas técnicas de este número nos sumergimos en la organización de la protección radiológica hospitalaria durante la pandemia. ¿Cómo se afrontaron las dificultades organizativas iniciales? Diversos especialistas del Hospital Universitario 12 de Octubre y del Hospital Clínico San Carlos de Madrid nos lo narran, desde el tratamiento de pacientes de riesgo hasta la limpieza y desinfección de las pruebas radiológicas.

Este año entran en vigor en España una serie de nuevos requisitos en el transporte de material radiactivo que están relacionados con el concepto de nivel de radiación, el marcado de los materiales o el transporte de bultos después de largos periodos de almacenamiento. Los detalles de estos cambios que afectarán a todo el sector del transporte, pero en especial al del sector nuclear se recogen en el segundo artículo técnico de *Alfa* 46. 

ALFA

Revista de seguridad nuclear
y protección radiológica
Editada por el CSN
Número 46
Mayo 2021



Comité Editorial
Josep Maria Serena i Sender
Pilar Lucio Carrasco
Francisco Castejón Magaña
Elvira Romera Gutiérrez
Rafael Cid Campo
M^a Fernanda Sánchez
Ojanguren
David Redoli Morchón
Ignacio Martín Granados
Ignacio Fernández Bayo

Comité de Redacción
Ignacio Martín Granados

Natalia Muñoz Martínez
Vanessa Lorenzo López
Adriana Scialdone García
Arturo Fernández García
Juan Enrique Marabotto García
Ignacio Fernández Bayo

Edición y distribución
Consejo de Seguridad Nuclear
Pedro Justo Dorado Dellmans, 11
28040 Madrid
Fax 91 346 05 58
peticiones@csn.es
www.csn.es

Coordinación editorial
Divulga S.L.
C/Diana, 16
28022 Madrid

Fotografías
CSN, Divulga, OIEA,
DepositPhotos.

Impresión
Editorial MIC
C/Artesiano s/n
Pol. Ind. Trabajo del Camino
24010 León

Fotografía de portada
Jamie Yang/IceCube/NSF

Depósito legal: 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.

REPORTAJES

6 Radiaciones para un mundo sostenible

La Agenda 2030 de Naciones Unidas consta de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), de los que al menos nueve pueden verse beneficiados por el uso de las tecnologías nucleares y radiológicas, que permiten, entre otras cosas, producir energía sin emitir gases de efecto invernadero, esterilizar insectos que provocan plagas o difunden enfermedades, derrotar a los tumores, conservar alimentos y desinfectar espacios cerrados.

12 El milagro de las nuevas vacunas

La inmunidad como medio para erradicar una enfermedad no es una novedad originada por la actual pandemia, pero sí lo es que en apenas unos meses se hayan conseguido desarrollar varias vacunas contra la covid-19; algunas de ellas con mecanismos biológicos hasta ahora no utilizados, que ofrecen nuevas vías para la lucha contra el coronavirus y contra posibles futuras infecciones.

34 El telescopio de los poetas

Bajo el hielo del Polo Sur, a una profundidad de entre 1.500 y 2.540 metros, está instalado un gigantesco detector de neutrinos que tiene como misión específica seguir el rastro de estas partículas fantasmales que apenas sí son capaces de interactuar con la materia. Se trata de IceCube, formado por más de 5.000 sensores de luz que se sirven del prístino hielo antártico para capturar la huella de estos esquivos viajeros interestelares que han estado atravesando la Tierra desde el universo primitivo.

41 Interactoma, la red social de las proteínas

Se conoce como interactoma al mapa que relaciona las interacciones moleculares que tienen lugar entre las proteínas humanas dentro de las células. Tras la secuenciación del genoma humano y del proteoma, el interactoma abre hoy las puertas al estudio del comportamiento celular desde otra perspectiva, la cual permitirá comprender enfermedades y hallar nuevos tratamientos mediante la aplicación de modernas técnicas de nanotecnología y biomedicina.

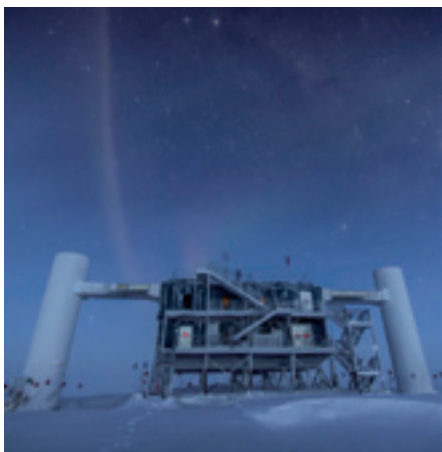
55 La luz invisible al ojo, pero no a la piel

Que la luz no solo esté formada por aquella al alcance del ojo humano implica varias cosas, entre ellas, que el universo es mucho más colorido y que la tecnología sí puede ver y aprovechar aquello que va más allá del espectro visible. La luz ultravioleta, en particular, tiene aplicaciones muy curiosas, como estudiar el cosmos, tratar enfermedades cutáneas o eliminar patógenos en espacios públicos mediante cierto tipo de radiación, tal como se ha estado haciendo para evitar contagios durante la pandemia.

DEPOSITPHOTOS



FELIPE PEDREROS / ICECUBE / NSF



DEPOSITPHOTOS



RADIOGRAFÍA

26 Solicitudes de licencias en el CSN

Las personas que trabajan en instalaciones radiactivas y de radiodiagnóstico precisan una licencia que otorga el CSN. Aquí se explican los pasos a seguir para obtenerla.

ENTREVISTA

28 Pilar Lucio Carrasco, consejera del CSN

“Mejorar la información y la comunicación con la ciudadanía es uno de los principales retos del Consejo”.

ARTÍCULOS TÉCNICOS

18 Nuevos requisitos en 2021 en transporte de material radiactivo

A raíz de los cambios introducidos en la edición de 2018 de la norma SSR-6 del OIEA, este 2021 entran en vigor en España modificaciones significativas en los requisitos para el transporte de material radiactivo. Estas novedades aplican principalmente al concepto de nivel de radiación, a los ensayos de los materiales BAE-III y a los bultos, tanto a su marcado como a su transporte, así como el de los grandes objetos contaminados. El transporte del sector nuclear será el más afectado por estos nuevos requisitos.

47 La protección radiológica hospitalaria en tiempos de pandemia

La pandemia ha supuesto un reto para los centros hospitalarios de todo el país, y en especial para servicios como los de Oncología Radioterápica, Física Médica y Radiofísica. Varios profesionales médicos explican aquí las dificultades que han tenido que sortear en estos meses, desde el tratamiento de pacientes de riesgo hasta la limpieza y desinfección de las pruebas radiológicas pasando por el teletrabajo, la dosimetría de trabajadores y áreas y la presión hospitalaria en UCI y REA.



JULIO FERNÁNDEZ GONZÁLEZ



61 Reacción en cadena

65 Panorama

69 Acuerdos del Pleno

70 Publicaciones

71 Abstracts



Las técnicas isotópicas permiten evaluar la erosión que sufre el suelo, que se agrava con la deforestación.

DEPOSITPHOTOS

Cómo ayudan las tecnologías nucleares a los ODS de Naciones Unidas

Radiaciones para un mundo sostenible

Hambre cero; agua y energía sostenible para todos; fin de la pobreza; frenar el cambio climático... La Agenda 2030 plantea 17 retos planetarios, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en los que las tecnologías nucleares y las radiaciones pueden ayudar; al menos, en nueve de ellos. Proporcionan una fuente de energía que no emite gases de efecto invernadero. También aportan trazadores para conocer en profun-

didad el entorno —un órgano, el suelo, un acuífero— y así saber que sucede en él para buscar soluciones. Además, la radiación altera estructuras que permite desde obtener nuevas plantas más resistentes y vacunas, hasta cambiar las propiedades de un material, descontaminar aguas, esterilizar plagas y acabar con tumores.

■ Texto: **Elvira del Pozo** | Periodista de ciencia ■

Quedan solo nueve años para cumplir los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), las 17 metas que se autoimpusieron los 193 países de Naciones Unidas para conseguir en 2030 un mundo que viva mejor según sus po-

sibilidades. En definitiva, tienen que lograr que una población creciente, que entonces alcanzará los 8.500 millones de habitantes, tenga las necesidades cubiertas y a sus minorías integradas, y que al mismo tiempo se desarrolle económica-

mente sin sobrepasar los límites de su entorno. Además, es urgente que ralenticen el cambio climático que calentará el planeta a una temperatura que ningún humano ha experimentado jamás. La tarea no parece fácil.

La primera de las metas: garantizar la vida. Antes de la irrupción de la covid-19, uno de cada tres decesos en el mundo se debía a dolencias cardiovasculares. El segundo motivo, con aproximadamente un 18 por ciento de media, era el cáncer, según datos del *Our World in Data*. Ambas enfermedades, entre otras muchas, como las neurológicas y endocrinas, son el objeto de la llamada medicina nuclear, que utiliza pequeñas cantidades de radioactividad para diagnosticar, evaluar y tratar.

Localizar, apuntar, disparar

Para obtener una imagen de lo que pasa dentro del cuerpo humano, es necesario una investigación previa que encuentre qué molécula es específica de una determinada enfermedad, de tal manera que la existencia de la primera delataría a la segunda. Éstas son las dianas a las que apuntarán las radiosondas, que son compuestos que llevan unido un emisor de radiación fotónica. Al ser inyectados, ingeridos o inhalados en forma de gas “permiten visualizar desde el exterior las zonas donde se acumulan; confirmando la dolencia y caracterizándola (forma, extensión, perfil metabólico...)”, explica Joan Castell, presidente de la Sociedad Española de Medicina Nuclear e Imagen Molecular.

Estos radiofármacos además pueden unirse a un material terapéutico emisor de rayos beta o alfa, que, por ejemplo, al acoplarse exclusivamente a las células de un tumor las destruyen sin dañar el tejido sano. “El teragnóstico —integración de diagnóstico y terapia usando una misma molécula— está suponiendo una revolución en oncología, con resultados nunca vistos antes”, reflexiona Castell.

Y aunque las técnicas nucleares son “muy prometedoras para lograr una medicina personalizada y de precisión”, para que contribuyan masivamente a garantizar la salud y el bienestar (ODS 3) tiene



La medicina nuclear es una poderosa técnica de diagnóstico.

que abarcar cada vez a más enfermedades y a más personas. Como señala Castell, “Pese a que los aparatos se producen ya en serie y no requieren más que disponer de electricidad para que funcionen, en la mayoría de los casos, su coste y la necesidad de disponer de suficientes profesionales preparados sigue dificultando su globalización; la intervención de la Organización Mundial de la Salud y la solidaridad entre los estados son claves para dotarles de estas tecnologías y de formación para que se manejen con seguridad”.

Salud, dinero y... comida

Por muy lejos que llegue la medicina hay condicionantes que no puede combatir. Así lo indican los datos: en los países empobrecidos las enfermedades infecciosas reemplazan al cáncer en el tétrico pódium de la mortandad. En concreto, las afecciones respiratorias y las diarreas resultan ser el principal motivo por el que

seis millones de niños menores de 5 años mueren cada año. Muchos de ellos están débiles debido a la falta persistente de alimentos, recuerda la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Por ello, la importancia de los ODS 1 y 2: *Fin de la pobreza* y *Hambre cero*.

Naciones Unidas alerta: actualmente hay 820 millones de personas que pasan hambre en el mundo, sino que el año 2050, los agricultores necesitarán producir un 60 por ciento más de alimentos, forrajes y biocombustibles debido al aumento demográfico. La importancia de este sector es clave, más incluso en los países desfavorecidos, donde la mayor parte de su economía depende de él. Por estos motivos, el pasado febrero, la FAO y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) renovaron su acuerdo para trabajar juntos en el uso de tecnologías nucleares. Su objetivo es conseguir

sistemas agroalimentarios más sostenibles y seguros, y contrarrestar el riesgo de enfermedades en plantas y animales. Ambos organismos llevan cooperando desde la década de los 60 del siglo pasado, en el que ahora se conocer como Centro Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura, ubicado en Austria.

Una de sus líneas de acción es la de esterilizar insectos para controlar plagas que son responsables, junto con otras enfermedades vegetales, de la pérdida del 40 por ciento de los cultivos alimentarios en todo el mundo cada año, calcula la propia FAO. En lugar de echar pesticidas, se crían en masa machos de la mosca de la fruta, la tsetse y el gusano barrenador del ganado, entre otros. Se los somete a rayos X y gamma, y se sueltan en el medio para que al aparearse con hembras silvestres no haya descendencia y su población disminuya.

También la castración radiológica de patógenos es la base de algunas de las vacunas que se suministran al ganado. Los organismos vivos atenuados son capaces

de generar reacción inmunológica en el organismo, pero no de reproducir la enfermedad. Gracias a esta tecnología se inmunizó masivamente a vacas de todo el mundo contra la peste bovina, hecho que fue decisivo para que, en 2011, se convirtiera en la primera enfermedad animal en ser eliminada en la historia de la humanidad. Pero quedan muchas más: la fiebre del valle del Rift, la peste porcina africana, la fiebre aftosa... que causan la muerte de animales y obligan al sacrificio a gran escala de otros muchos.

Un paso más allá están los alimentos ionizados, a los que se somete a radiación directa para alargar su conservación reduciendo el uso de aditivos y fumigantes. En esta ocasión, los rayos gamma matan todos los patógenos y retrasan la maduración de la fruta, entre otros efectos.

Agricultura climáticamente inteligente

El fitomejoramiento es una manera de producir cultivos resistentes a enfermedades y las condiciones climáticas e hidro-



DEAN CALMA / OIEA

lógicas que están por llegar. También para generar más alimentos. Elena Sáenz, directora de la Asociación Nacional de Obtenedores Vegetales, recuerda que “en los últimos 20 años, casi la mitad del aumento de la productividad ha sido consecuencia del desarrollo de nuevas variedades”.

Las técnicas nucleares aceleran el proceso de mutación espontánea del ADN de la planta reduciendo así el tiempo en el que se consiguen especímenes

Un compromiso del CSN

El Consejo de Seguridad Nuclear no ha permanecido ajeno a la demanda de acciones establecido por Naciones Unidas en sus Objetivos de Desarrollo Sostenible incluidos en la Agenda 2030. Su compromiso se ha materializado en su nuevo Plan Estratégico 2020 – 2025, aprobado por el Pleno de la institución el 17 de junio de 2020. Ya en su prólogo se afirma que “el CSN se guía por los Objetivos de Desarrollo Sostenible y se compromete a contribuir a que éstos puedan alcanzarse”. Y al establecer sus dos metas estratégicas señala, junto con la dedicada a la seguridad nuclear y radiológica, la orientada a la consecución de dichos objetivos, señalando que “La meta estratégica de sostenibilidad es transversal y se desarrollará en todos los procesos que constituyen el sistema de gestión del CSN”.

El 25 de septiembre de 2015 el Gobierno español firmó el compromiso de cumplimiento de los 17 ODS para el año



Estado para la Agenda 2030, a cuyo frente se encuentra actualmente Enrique Santiago. Durante estos años numerosas instituciones y empresas han adquirido el compromiso de asumir los objetivos de la ONU. En el caso del CSN, el compromiso implica tanto al Pleno del Consejo como a todo el personal al servicio del organismo, que deberán velar por la incorporación de estos criterios en los planes anuales de trabajo de actividades y de indicadores específicos.

A la izquierda, análisis de la composición de un material. Sobre estas líneas, la esterilización de insectos para controlar plagas. Y a la derecha, la mejora vegetal de cultivos busca una mayor producción agrícola.

DEAN CALIMA / OIEA

LAURA GIL / OIEA

KUWAIT INSTITUTE OF SCIENTIFIC RESEARCH (KISR)

más adaptados al medio. Las semillas y tejidos son irradiados con rayos X o gamma y se analiza el rendimiento que la planta genera en situaciones de sequía, mayor temperatura o suelos salinos, entre otras variables. Ésta es la base del proyecto español GOCITRUS, que genera variabilidad en cítricos a partir de la radiación de las yemas de los árboles, donde hay muchísima división celular y la capacidad de generar muchos individuos genéticamente distintos es elevada.

“Aunque la irradiación se sigue utilizando en las empresas de mejora vegetal para la obtención de mutantes, en investigación cada vez se usa menos”, señala Antonio Molina, director del Centro de Biotecnología y Genómica de Plantas. La radiación altera grandes segmentos de

ADN al azar, mientras que compuestos químicos como el metanosulfonato de etilo, y herramientas de edición del genoma como CRISPR y *Prime editing* permiten cambios dirigidos y puntuales, incluso de un nucleótido concreto o de varios genes simultáneamente. Esto último es muy útil en plantas donde la expresión de una determinada característica no se debe a la acción de un solo gen, sino a un grupo de ellos.

¡Siga a esa molécula!

Otro problema es el agua. Según datos del Banco Mundial, la agricultura necesita el 70 por ciento del recurso que se extrae en el mundo. Una herramienta de ahorro muy extendida en cultivos, al menos en países desarrollados, son las sondas

neutrónicas, que son una fuente radiactiva de neutrones de gran energía y un detector de neutrones lentos que permiten conocer la humedad del suelo. Si hay suficiente para la planta, se puede ahorrar el riego.

El agua es el objetivo del ODS 6 que pide “garantizar su disponibilidad y gestionarla de manera sostenible, además de saneamiento para todos”, no solo para los cultivos. Dada la gran interrelación entre las masas acuáticas (la sobreexplotación de un pozo puede agotar un manantial a 30 kilómetros) requiere una gestión a escala mayor, del ciclo del agua en su conjunto. Más allá de “garantizar la buena calidad radiológica de las aguas, las téc-

nicas de trazado con isótopos estables y radiactivos es una manera de conocer en profundidad cómo se comporta el sistema hídrico y ayudar a la toma de decisiones”, explica Javier Rodríguez, jefe del Área de Aplicaciones Isotópicas del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

El H_2O , de manera natural, tiene tres isótopos distintos de hidrógeno y otros tres del oxígeno, que dan mayor o menor peso a la molécula en función de si tienen más o menos neutrones. En un proceso de evaporación, como sucede en los embalses, los isótopos más ligeros pasan a vapor con más facilidad y el agua que queda se enriquece en los más pesados, presentando una concentración mayor que el de la lluvia pero menor que la del mar. “El agua tiene una huella isotópica que delata su origen”, señala Rodríguez.

Además, se miden los radionucleidos que existen de manera natural. Las aguas superficiales lavan rocas que en muchos casos son ricas en uranio natural y sus descendientes, que pasan al medio acuoso. Pero los procesos y los solutos resultantes son distintos si el agua se filtra y

tarda mucho en volver a salir a un manantial; o si la escorrentía es casi solo superficial y va directamente a un río. Con técnicas isotópicas se sabe si la muestra proviene o no de fuentes subterráneas. “Es como viajar en la molécula del agua o en alguno de sus componentes en disolución, que se convierten en los trazadores ideales para mostrar cómo se mueve el fluido y cuánto tarda”, apunta el investigador.

Si se incorporan estas técnicas de datación, se puede estimar el tiempo de residencia del agua dentro de un acuífero, desde que el agua se infiltra hasta que emerge de nuevo. Esto permite estimar la vulnerabilidad de las masas subterráneas, de donde procede un alto porcentaje del agua que bebemos. En esta ocasión, los espías son el tritio, el carbono 14 y el 13. “Un acuífero puede tardar en renovarse meses o miles de años, lo que condicionará el tiempo que necesitará para recuperarse si se sobreexplota. Y, por lo mismo, si existe una fuente de contaminación en superficie y el agua se renueva cada año es muy fácil que se contamine y que llegue pronto a su uso;

aunque será más fácil también limpiar el acuífero”, concluye Rodríguez.

La segunda meta del ODS 6 es la de garantizar el saneamiento de las aguas. Con técnicas nucleares e isotópicas se pueden detectar y rastrear contaminantes, que posteriormente pueden destruirse sometiéndolos a haces de electrones y con otras fuentes de radiación gamma como los radionucleidos del cobalto (^{60}Co) y el cesio (^{137}Cs).

Sí, pero aquí no

La energía es el factor que más contribuye al cambio climático pues aporta alrededor del 60 % de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, según datos de Naciones Unidas. En un futuro superpoblado y electrificado, parece inevitable apostar por las fuentes energéticas renovables. Pero mientras se resuelve cómo almacenar el excedente, cuando se produce, y cubrir los picos de la demanda, “la fisión nuclear puede asumir la producción y el apoyo en zonas con recursos naturales intermitentes sin contribuir al aumento del CO_2 atmosférico, ya que cuenta con la gran ventaja de que

Javier Rodríguez junto al pluviómetro de la estación de Madrid Retiro de la Red Española de Vigilancia de Isótopos en Precipitación.





Gracias a las técnicas isotópicas y nucleares, se sabe el contenidos de microplásticos y otros contaminantes en especies acuáticas.



Conocer la causa de la degradación de un ecosistema es el primer paso para preservarlo.

DEPOSITPHOTOS

es una tecnología muy bien conocida y que funciona”, apunta Enrique González, responsable de la División de Fisión Nuclear del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat).

Esta tecnología, que podría ayudar a la consecución del ODS 7 (*Energía asequible y no contaminante*) y del ODS 13 (*Acciones por el clima*), cuenta con una fuerte oposición social. La percepción de riesgo de sus reactores y la producción de residuos radiactivos casi eternos está detrás del ya conocido como *Not in my back yard* (*Sí, pero aquí no*, en español). Este término alude al hecho de que personas que en principio no se oponen a esta fuente energética se oponen a que cerca de su lugar de residencia instalen una central o un almacén de residuos nucleares. Frente a ello, “se trabaja para diseñar una nueva generación de reactores más seguros; que generen menos residuos y que estén más adaptados a eventos extremos y a la escasez de agua”, señala González.

Otras contribuciones menos evidentes de las técnicas nucleares tienen que ver

con otros tres ODS, los 9, 14 y 15, que hacen referencia a *Innovación industrial*, *Vida submarina* y *Ecosistemas terrestres*, respectivamente. En todos ellos, el valor añadido que aporta es entender de manera profunda qué está pasando, en el entorno, en un proceso. Respecto a la industria, gracias a gammagrafías y neutrografías, se pueden radiografiar con rayos gamma y neutrones piezas críticas en, por ejemplo, el fuselaje de aviones y soldaduras de gaseoductos, en busca de debilidades o roturas en principio imperceptibles al ojo humano.

También, gracias a la trazabilidad de sustancias radiactivas se pueden escanear los procesos que suceden en grandes estructuras como chimeneas industriales para saber qué reacciones químicas ocurren en su interior y detectar si hay alguna anomalía. Al margen de las técnicas nucleares de imagen, “la irradiación de materiales es una manera de cambiar sus propiedades. Como es el caso de fibras de carbono que se vuelven conductoras”, cuenta el investigador.

Las técnicas nucleares mejoran el conocimiento de los ecosistemas terrestres,

cuyo bienestar es objeto del ODS 15. Se estima que una de sus principales amenazas es la erosión, causada por el agua que discurre por la superficie de la tierra y que arrastra sus capas más fértiles. El problema es mayor cuanto más pendiente y menos vegetación haya. Utilizando esta vez como espías al nitrógeno 15 y el carbono 13, los investigadores saben en qué estado está el suelo y si se mueve. También, pueden conocer si las plantas que viven en él consiguen captar todos los nutrientes que necesitan. Esta información es el punto de partida para elaborar planes de gestión del territorio.

Respecto a la vida submarina (ODS 14), se puede monitorizar la progresión de su acidez, que se produce al absorber el dióxido de carbono atmosférico. Para ello se evalúan con isótopos los cambios en las corrientes marinas y los efectos en los distintos ecosistemas. “La tecnología nuclear es una herramienta muy prometedora con un conjunto de aplicaciones muy amplio que puede contribuir a conseguir nueve de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible”, concluye González. ©



Tecnologías desarrolladas en las últimas décadas han permitido afrontar la pandemia en menos de un año

El milagro de las nuevas vacunas

La pandemia actual nos recuerda que la aparición y difusión de nuevos virus se produce de forma regular desde siempre. Antes que apareciera el SARS-CoV-2, causante de la covid-19, lo hicieron en las últimas décadas los del sida, el SARS, el MERS, el ébola, el de la gripe aviar y el zika, entre los que infectan a humanos. Su capacidad de reproducción y la frecuencia de sus mutaciones dificultan la batalla que libra nuestro sistema inmune contra ellos. Aunque tras la aparición del sida se desarrollaron los primeros antivíricos, la

mejor forma de luchar contra estos patógenos, a los que ni siquiera se incluye entre los seres vivos, son las vacunas: mecanismos que estimulan el sistema inmune para reconocer y eliminar cada tipo de virus. En apenas unos meses la ciencia ha sido capaz de desarrollar diferentes vacunas eficaces con el causante de la covid-19, algunas utilizando mecanismos novedosos, que abren la puerta a futuras aplicaciones para los virus del mañana.

■ Texto: **Pura C. Roy** | Periodista científica ■

Perseguir la inmunidad contra las enfermedades originadas por diferentes patógenos no es nuevo. Las vacunas han sido unas grandes aliadas para luchar contra ellas. Según la Orga-

nización Mundial de la Salud (OMS), una vacuna es un preparado cuyo fin es generar inmunidad contra una enfermedad estimulando la producción de anticuerpos. Gracias a las vacunas, además de

erradicar la viruela, se ha podido controlar otras como la rabia, el cólera, el tétanos, la difteria, la peste, la tuberculosis, el tifus, la poliomielitis, el sarampión, las paperas, la rubéola, la meningitis, la

hepatitis A y B y la gripe. También hay vacunas contra tóxicos, como venenos de serpiente, o para alérgenos como el polen. Solo la del sarampión salvó 23 millones de vidas entre 2000 y 2018.

La búsqueda de nuevas vacunas no siempre es una historia de éxito. Es el caso de la malaria, por ejemplo, que, a pesar de que hace 140 años que se descubrió su relación con el parásito *Plasmodium*, aún no hay una vacuna definitiva contra ella. En 2015 la Agencia Europea de Medicamentos aprobó el uso de la vacuna RTS,S para combatir la infección en niños en África, pero su uso todavía se limita a proyectos piloto en algunos países. El ciclo de vida del *Plasmodium* dificulta encontrar un blanco específico para la vacuna. Esto se debe a que el parásito infecta los glóbulos rojos de la sangre humana y eso lo hace menos detectable para el sistema inmunitario.

Otro ejemplo es el del VIH, causante del sida, contra el que cuatro décadas de investigación no ha dado aún fruto. Desde el punto de vista científico, el sida y la covid-19 son pandemias, pero muy diferentes. El virus del sida tiene gran facilidad de mutación, mucho mayor que la del SARS-CoV-2. La forma de transmisión también cambia: la covid-19 se transmite por el aire, de ahí su alta capacidad de contagio, y el VIH lo hace por vía sexual, sanguínea o perinatal. Se apunta a la variabilidad de la estructura del VIH como principal dificultad para el desarrollo de una vacuna, y a los mecanismos de escape que le permiten ocultarse, creando una especie de escudo muy eficaz. Esto es algo que no pueden hacer los virus respiratorios como el del coronavirus, de ahí que sea más sencillo conocer cómo atacan. Actualmente los tratamientos controlan la enfermedad del VIH hasta el punto de que su contenido en sangre y fluidos se hace indetectable, lo que impide su transmisión a otras personas.

Según un estudio de la Universidad de Oxford, la disminución del tiempo necesario para desarrollar una vacuna se puede atribuir a los avances tecnológicos del último siglo. Por ejemplo, las técnicas de cultivo de bacterias en el laboratorio permitieron la creación de vacunas contra la difteria y el tétanos a principios del siglo XX. Igualmente, avances en el cultivo de virus en el laboratorio



Edward Jenner desarrolló en 1796 la primera vacuna de la historia.

hicieron posibles las vacunas contra la poliomielitis, el sarampión, la rubéola y la viruela en la década de 1950 y, recientemente, descubrimientos en biología molecular y química han propiciado las vacunas contra la hepatitis B, la gripe, la neumonía y la meningitis.

La era de las vacunas la inició el médico Edward Jenner a finales del XVIII. El británico observó que las personas que ordeñaban vacas y contraían la viruela bovina estaban protegidas contra

la viruela humana. En 1796 inoculó a un niño de ocho años fluido de las pústulas de viruela bovina y cuando, posteriormente, le inyectó el virus de la viruela humana el niño ni se contagió ni tuvo síntomas. Ya en el siglo XIX, el médico francés Louis Pasteur desarrolló la segunda generación de vacunas, entre otras contra el cólera y contra la rabia, e introdujo el término vacuna en honor a los ex-

perimentos con las vacas de Jenner. La mayor parte de las vacunas desarrolladas hasta hace 50 años utilizaban los microorganismos muertos o atenuados, o algunas partes de su estructura o de sus derivados. Pero en los últimos años los científicos han sido capaces de encontrar otros mecanismos.

La biología molecular ha permitido desarrollar vacunas generadas en laboratorio. Así, para acabar con el último brote de Ébola en la República Democrática del Congo fue fundamental la administración de una vacuna experimental recombinante. La única vacuna que ha demostrado cierta eficacia frente al VIH es, precisamente, la de un virus recombinante que se genera a partir de una proteína de la envoltura del virus. Sin embargo, mientras las vacunas tradicionales activan el sistema inmunitario gracias al patógeno (o una parte de él) que causa el propio mal contra el que se lucha, las vacunas recombinantes se

crean a la carta en el laboratorio, generando nuevos microorganismos que no producen la infección. Como solo se introduce un fragmento del patógeno, jamás puede causar la enfermedad que trata.

La primera vacuna humana producida gracias a este método fue contra la hepatitis B, comercializada en 1986, y demostró la misma efectividad que su versión tradicional: más del 95 % de las personas sanas vacunadas quedan inmunizadas. Por esto, y por su seguridad, las vacunas recombinantes son las que se plantean contra enfermedades para las que no hay cura y que hasta ahora han resistido a las vacunas tradicionales.

Vacunas de ARNmensajero

El último gran salto tecnológico comenzó a gestarse en los años 90. Consiste en introducir en el organismo las instrucciones, en forma de ARN mensajero (ARNm), para que sea el propio cuerpo el que fabrique su vacuna, el antígeno que estimula la respuesta inmune. Esta técnica es tan manejable y versátil que permite crear una vacuna en muy poco tiempo, como han demostrado las compañías Moderna y BioNTech/Pfizer contra la covid-19.

Encontrar una vacuna para la pandemia actual se convirtió en un asunto prioritario. El gran esfuerzo realizado ha llevado a mucha gente a preguntarse por qué no ha pasado esto con la malaria o el sida. En menos de un año hemos visto el desarrollo de vacunas con una aceleración sorprendente gracias a la unión de apoyos públicos y privados y a los múltiples laboratorios que se han puesto a desarrollarlas, además de las ingentes cantidades de dinero.

Tras más de 2,5 millones de víctimas mortales y más de 100 millones de contagios, el mundo está sumergido en una campaña sin precedentes para vacunar al grueso de la población mundial lo

antes posible y contener así la propagación del virus. Entre las decenas de vacunas desarrolladas o en desarrollo encontramos diferentes mecanismos, pero las primeras que consiguieron su aprobación estaban basadas en la tecnología del ARNm, que se venía desarrollando desde hacía décadas y con ensayos preclínicos y clínicos. Hasta ahora habían demostrado que generaban una potente respuesta protectora en ensayos con modelos animales contra infecciones por ébola, zika, gripe e incluso bacterias, como el *Streptococcus*.

2021 comenzaba con la primera vacuna contra la covid-19 aprobada en Europa, la desarrollada por Pfizer-BioNTech con la tecnología ARNm. El nombre

concreto en el gen que codifica para la proteína S (la glicoproteína de la envoltura del virus, que actúa como la llave que se une al receptor de la célula). Pero esa molécula no es un trozo del ARN del virus sin más: esa secuencia se ha modificado para aumentar su estabilidad y facilitar que la célula sea capaz de leerla, traducirla y sintetizar la proteína viral.

La estadounidense Moderna se basa en la misma tecnología del ARNm, presenta una eficacia del 94,5 % y también requiere de dos dosis, como la de Pfizer, espaciadas en 28 días. Esta vacuna se mantiene estable entre 2 °C y 8 °C, la temperatura de un refrigerador doméstico durante 30 días y hasta seis meses si se mantiene a -20 °C, mientras que la de



MODERNA

Sede central de los laboratorios Moderna, empresa que ha elaborado la segunda vacuna de tipo ARNm.

técnico de la vacuna es BNT162b2 y el comercial, Comirnaty. Israel utilizó esta vacuna para inmunizar a 1,2 millones de personas, y ha confirmado una protección del 94 % en casos sintomáticos, a los siete días de la inoculación de la segunda dosis. La investigación israelí llevada a cabo entre el 20 de diciembre y el 1 de febrero viene a constatar también la efectividad frente a la variante británica del virus, que afectaba entonces al 80 % de los casos.

La vacuna de ARNm de Pfizer se basa en el genoma del coronavirus, en

Pfizer necesita conservarse a 70 grados bajo cero. Es un avance importante y permitiría una distribución más simple y una mayor flexibilidad para facilitar la vacunación a mayor escala, ya que la necesidad de ultracongelación imposibilita o dificulta su distribución a los países el tercer mundo.

El ARN es una molécula muy inestable y por eso requiere condiciones de mantenimiento extremas. Sin embargo, esta tecnología también tiene ventajas. Es relativamente más barata que otro tipo de vacunas y, sobre todo, permite diseñar



Vacuna contra la varicela, por lo general del tipo viva atenuada.

Tipos de vacunas

El Departamento de Salud y Servicios Sociales de los Estados Unidos (HHS) divide a las vacunas en cuatro tipos: las vivas atenuadas, las muertas o inactivadas, las biosintéticas y las toxoides.

Las vacunas vivas atenuadas utilizan una forma debilitada del germen que causa la enfermedad. Dado que son muy similares al patógeno natural crean una respuesta inmunitaria fuerte y de larga duración. Una o dos dosis pueden proteger durante toda una vida del sarampión, paperas, rubéola, viruela, varicela o fiebre amarilla.

Las vacunas muertas, o inactivadas, se elaboran a partir de una proteína u otros pequeños fragmentos tomados del virus o bacteria tomadas del microorganismo muerto. La inmunidad es menor que las vacunas de virus vivos y por ello se necesitan varias dosis, que se administran varias veces en un plazo que a veces es de varios años. Así son las de la hepatitis A, la gripe, la polio y la rabia.

Las vacunas biosintéticas contienen sustancias artificiales, fabricadas por el ser humano, que son muy similares a trozos de virus o bacterias. Al igual que las muertas suelen requerir la administración de dosis de refuerzo. Así son las que nos protegen contra la hepatitis B, el virus del papiloma humano y la tosferina, entre otras.

Las vacunas toxoides contienen una toxina producida por ciertas bacterias. En este tipo de vacunas, la inmunidad no se crea contra el germen, sino directamente contra la toxina de la bacteria. Como en otras, pueden ser necesarias dosis de refuerzo. La difteria y el tétanos son ejemplos de enfermedades tratadas por esta vía. Las últimas versiones de las vacunas recombinantes ya combaten patologías para las que aún no tenemos cura. ▶

una vacuna nueva en un tiempo récord. Una vez que se conoce el genoma del patógeno, en unas semanas se pueden producir los primeros prototipos vacunales. Por eso es una excelente herramienta cuando aparece un patógeno nuevo para el que se necesita una vacuna con urgencia, como en esta pandemia. Además, el proceso de fabricación no requiere emplear sustancias químicas tóxicas, ni cultivos celulares que se pueden contaminar con otros virus o microorganismos. Su fabricación es rápida y fácil y requiere de poca manipulación, con lo que se minimiza el riesgo de posibles contaminantes. El ARNm no se integra en el ADN, por eso, las vacunas ARNm se consideran potencialmente muy seguras.

AstraZeneca la tercera de las vacunas para el covid-19 aprobada en Europa tiene la ventaja frente a las anteriores de que puede conservarse a temperaturas de entre 2 °C y 8 °C. Esto permite que su distribución sea más fácil. Su desarrollo ha optado por otra vía, ya que utiliza como vector otro virus manipulado que desencadena una reacción en nuestras células dándoles instrucciones: que se trata de un adenovirus que produce resfriados en los chimpancés. Este tipo de vacunas enseñan a nuestras células a producir una proteína presente en la superficie del SARS-CoV-2 (la proteína spike), lo que desencadena una respuesta inmunitaria dentro del organismo.

Según la OMS, la vacuna de AstraZeneca, cuyo nombre técnico es AZD1222, tiene una efectividad del 63,09 % contra la infección sintomática del coronavirus. Sin embargo, parece que una distancia más amplia entre dosis aumenta la efectividad de la misma y permite inyectar dosis más bajas. Así, los últimos estudios anuncian una efectividad de hasta el 90 %. El principal problema es que los ensayos de la vacuna no han

incluido suficiente número de pacientes mayores de 55 años, por lo que muchos países han decidido utilizar esta vacuna solo en personas más jóvenes.

Janssen, CureVac y Novavax

En los próximos meses habrá disponibles al menos tres nuevas vacunas en la Unión Europea. Dos de ellas se están ensayando y fabricando en hospitales y laboratorios españoles. Cada una usa una tecnología diferente y la primera en llegar solo necesita una dosis. Se trata de la creada por la compañía belga Janssen (cuya matriz es la multinacional Johnson & Johnson). La Ad26.COV2-S aguanta tres meses a temperaturas de un frigorífico convencional, sin necesidad de congelarla, y dos años bajo cero. En cuanto a su eficacia, los resultados más recientes del ensayo de única dosis muestran un porcentaje del 66 %, que se eleva al 85 % a la hora de evitar un curso

Janssen, al igual que la de AstraZeneca, es de tipo vector viral.

Novavax es una vacuna a base de proteínas que contiene partículas de la llamada spike, que se encuentra en la superficie del SARS-CoV-2. Estas proteínas contienen un adyuvante, una sustancia que ayuda a fortalecer la respuesta inmunitaria de la vacuna. Según datos de un ensayo en curso en Reino Unido, la doble dosis de esta vacuna tendría una eficacia del 89 % en una muestra donde ya la mitad de los infectados lo estaban de la variante británica del virus. Sin embargo, en otro experimento paralelo en Sudáfrica el porcentaje de eficacia bajó hasta el 60 %, confirmando la peligrosidad de la mutación aparecida en ese país.

Ya para después del verano debería llegar una nueva vacuna. Se trata de la creada por CureVac, una empresa alemana de biotecnología. Al igual que las vacunas desarrolladas por Pfizer y Moderna,

utiliza la técnica de ARNm. Se administra en dos dosis, como la mayoría, y presenta evidencias de que es capaz de generar una respuesta inmune eficaz contra el coronavirus, pero aún no se conoce su grado de eficiencia exacto.

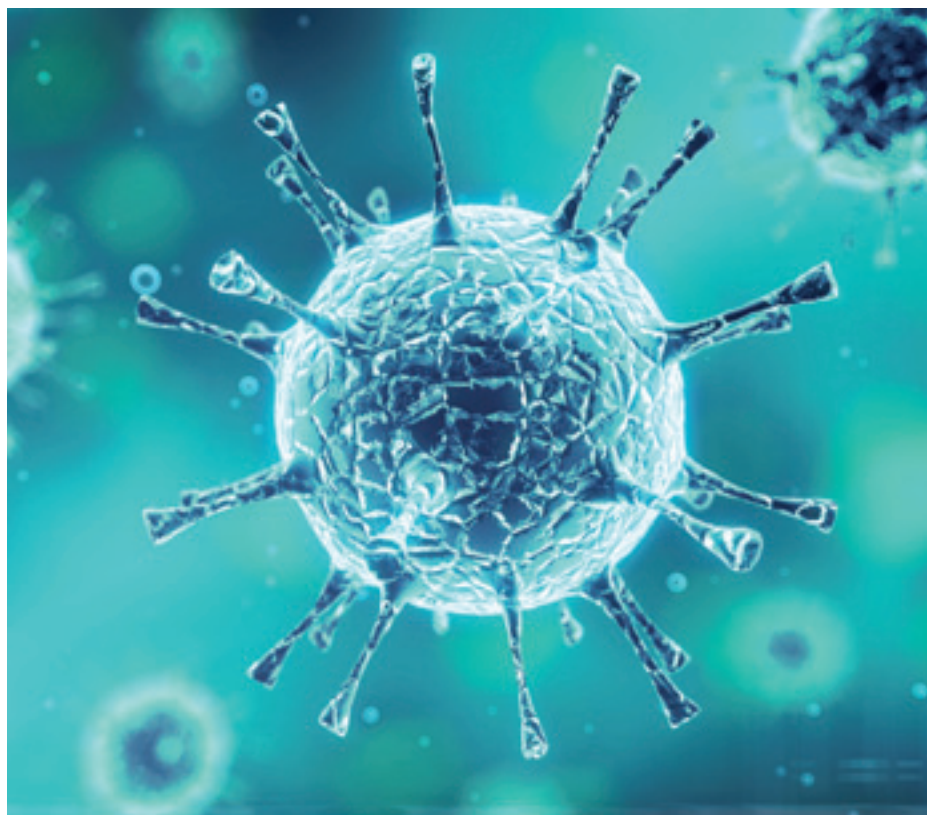
Sputnik V

La rusa Sputnik V, ya distribuida de forma masiva en muchos países y a la espera de que la Agencia del Medicamento Europeo (EMA) la autorice para su uso en la UE, está también desarrollada a partir de un adenovirus. La diferencia con la de AstraZeneca es que, aunque usan el mismo método, la vacuna rusa recurre a dos tipos distintos de adenovirus humanos para la primera y segunda dosis, en lugar del virus de chimpancé de AstraZeneca. Esto podría suponer una mayor fiabilidad de la vacuna, al depender únicamente de adenovirus propios del ser humano además de me-



Secuencia de aminoácidos de las proteínas del virus.

agravado de la enfermedad. La primera cifra se ve rebajada porque la prueba incluye a varios miles de sudafricanos. Todo indica que la variante del coronavirus dominante en Sudáfrica es más resistente a la vacuna. Una última ventaja de la Ad26.COV2-S, al menos para los españoles, es que buena parte de las vacunas se harán en la farmacéutica catalana Reig Jofre. La vacuna de



Las espículas (púas) del coronavirus, causantes de su forma tan característica, permiten al virus adherirse a la superficie de las células al vincularse al receptor ACE2.



Gracias a la cooperación y a la constante investigación los científicos han sido capaces de desarrollar varias vacunas en menos de un año.

nores efectos secundarios. La vacuna rusa habría demostrado una efectividad del 91,6 %.

Vacunas españolas

Distintos grupos de trabajo en España también están desarrollando otras vacunas contra el causante de esta pandemia. El de Mariano Esteban, en el Centro Nacional de Biotecnología (CNB-CSIC) se ha centrado en la utilización de un virus muy atenuado, que tiene una cubierta membranosa alrededor de una estructura proteica y en su interior lleva una molécula de ADN mayor que la del adenovirus. En esta molécula va incrustado también el fragmento que produce la proteína S del coronavirus. Como vehículo se usa el virus vaccinia, empleado en la vacunación contra la viruela. Para Esteban, el diseño de su futura vacuna puede posibilitar que la

respuesta inmunitaria en las personas sea mucho más amplia y duradera.

Otra contribución española es la propuesta de Vicente Larraga, quien confía en que su vacuna pueda estar lista para finales de año. Para el investigador del Centro de Investigaciones Biológicas (CIB-CSIC), su prototipo de vacuna sintética a partir de ADN puede conllevar dos ventajas: la conservación a temperatura ambiente y que, al ser una vacuna de ADN sintética, puede rehacerse rápidamente para adaptarla a variantes del virus que sean más resistentes. Además de poder llegar a los países pobres, ser más estables y seguras y se pueden clonar y fabricar de forma fácil y sencilla.

La Comisión Europea cree que a principios de 2022 el continente estará en posición de fabricar entre 2.000 y 3.000 millones de dosis anuales, dirigidas a los ciudadanos europeos y al resto del

mundo, y con capacidad de reacción ante las nuevas variantes. Sin embargo, los tropiezos del comienzo de la vacunación han mostrado la debilidad de la industria europea para conseguir producir las cantidades demandadas.

La mal llamada gripe española mató entre 1918 y 1920 a más de 40 millones de personas en todo el mundo y es considerada la más devastadora de la historia. Un siglo después aún desconocemos su origen, aunque ahora sabemos que fue causado por un brote de influenza virus A, del subtipo H1N1. En el verano de 1920 el virus desapareció tal y como había llegado, pero generalizó como protección el uso de mascarillas y la limpieza de manos, como en nuestros días. Del SARS-CoV-2 tampoco estamos seguros aún de su origen, pero esta vez conocemos su composición genética y por tanto tenemos armas para derrotarlo. ©



Transporte de contenedores de combustible gastado.

Nuevos requisitos en 2021 en transporte de material radiactivo

Tras muchos años sin cambios significativos, a lo largo de 2021 entrarán en vigor en España modificaciones importantes en los requisitos reglamentarios para el transporte de material radiactivo. Las modificaciones derivan de las ya introducidas en la edición 2018 de la norma SSR-6 del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), que se han trasladado a los reglamentos internacionales sobre transporte de mercancías peligrosas que se aplican en nuestro país. Las novedades fundamentales afectan al concepto de nivel de radiación, al marcado de los bultos, a los ensa-

yos de los materiales BAE-III, a los mecanismos de envejecimiento en los bultos y al transporte de bultos tras largos periodos de almacenamiento, así como de grandes objetos contaminados. Algunos de los cambios afectarán a todos los sectores del transporte, pero, sin duda, los más destacables lo harán sobre el sector nuclear. En este artículo se informa sobre los nuevos requisitos y se analiza su objetivo, su necesidad y las implicaciones de su puesta en vigor.

■ Texto: **Fernando Zamora Martín** | Jefe del área de transporte de material radiactivo del CSN ■

El transporte de material radiactivo debe ajustarse a requisitos reglamentarios de diversa índole; unos relacionados con la protección contra las radiaciones ionizantes, al ser una actividad con riesgo de exposición radiológica para los trabajadores y las personas del público; otros que afectan a la

seguridad física y buscan impedir sabotajes a los transportes o el robo de los materiales radiactivos que se transportan; y, por último, aquellos que están enfocados específicamente al proceso de transporte, que incluyen disposiciones sobre el diseño de los embalajes y de tipo operacional, como la señalización de los bultos y

vehículos, las tasas de dosis en su exterior o la documentación y las aprobaciones necesarias para llevar a cabo las expediciones. El objetivo de este artículo es informar sobre los cambios reglamentarios que, desde enero de 2021, afectan a estos últimos requisitos, recogidos en las reglamentaciones que regulan el

transporte de todas las clases de mercancías peligrosas, de las que la materia radiactiva es identificada como clase 7.

Proceso de revisión reglamentaria

La legislación española sobre transporte de mercancías peligrosas por carretera, ferrocarril, vía aérea y vía marítima, remite al cumplimiento de los requisitos establecidos en reglamentos internacionales para esos modos de transporte: Acuerdo sobre el Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR), Reglamento sobre el Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Ferrocarril (RID), Instrucciones Técnicas para el Transporte sin Riesgo de Mercancías Peligrosas por Vía Aérea de la Organización Internacional de Aviación Civil (OACI) y Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (Código IMDG) de la Organización Marítima Internacional (OMI). Las disposiciones de obligado cumplimiento de esos cuatro reglamentos internacionales se basan en las Recomendaciones Relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas de la Organización de las Naciones Unidas, denominadas coloquialmente *El libro naranja*, debido al color de las tapas de la publicación. A su vez, las disposiciones del libro naranja relativas al transporte de materiales radiactivos provienen de una norma del OIEA: Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos, identificada como SSR-6 (Specific Safety Requirements nº 6)¹.

Por tanto, a través de este complejo proceso internacional de desarrollo reglamentario, la SSR-6 del OIEA se constituye como la fuente primordial de los requisitos sobre transporte de material radiactivo en todo el mundo, y sus cambios terminan trasladándose, sin modificación alguna, a las reglamentaciones nacionales. Pero también se trata de un proceso largo, que conlleva varios años

Clasificación de las materias peligrosas		
CLASE 1:	Materiales y objetos explosivos	
CLASE 2:	Gases	
CLASE 3:	Líquidos inflamables	
CLASE 4:	Sólidos inflamables	
CLASE 5:	Oxidantes	
CLASE 6:	Venenos Materias tóxicas Materias repugnantes Materias infecciosas	
CLASE 7:	Materiales radiactivos	
CLASE 8:	Corrosivos	
CLASE 9:	Materias peligrosas no recogidas en otras clases	

desde que se generan los cambios en el seno del OIEA hasta que se adoptan con carácter obligatorio a escala internacional y nacional. Es el caso de las modificaciones introducidas en la última edición de la SSR-6, de 2018, que se incorporaron al libro naranja en 2019 y a partir del cual serán trasladadas a las ediciones de 2021 del ADR, RID, IT de la OACI y Código IMDG. De esta manera, las nuevas disposiciones de la edición 2018 de la SSR-6 van entrando en vigor en España desde enero de 2021, aplicando los periodos transitorios de los reglamentos internacionales de los diferentes modos de transporte.

Novedades fundamentales a partir de 2021

Dado que las disposiciones recogidas en la SSR-6 del OIEA se trasladan de forma directa a las cuatro reglamentaciones in-

ternacionales sobre transporte de mercancías peligrosas, el análisis que se realizará a continuación se centrará sobre las modificaciones más significativas introducidas en las disposiciones (en adelante requisitos) que se establecen a lo largo de los 840 párrafos de su edición de 2018. En la mayoría de los casos, esta revisión se ha debido a modificaciones del texto de párrafos ya existentes, pero también han aparecido algunos nuevos y se han eliminado otros. En la tabla 1 se resumen las variaciones introducidas en párrafos, tablas y figuras de la SSR-6, aunque no se identifican los cambios menores, exclusivamente editoriales o motivados por armonización de la terminología o del texto. A la vista de esta tabla, podría deducirse que los cambios en los requisitos del transporte de material radiactivo que entrarán en vigor a lo largo del año 2021 serán numerosos, pero no debemos alar-

marnos en exceso, pues gran parte de ellos no van a afectar de manera significativa a las operaciones de transporte ni a la mayoría de los sectores.

Tasa de dosis versus nivel de radiación

Hasta la edición de 2018, en la SSR-6 se designaba el valor de la magnitud operacional “dosis equivalente ambiental” o “dosis equivalente” a través del término “nivel de radiación”, entendiendo por tal la tasa de dosis expresada en milisieverts por hora (mSv/h). Sin embargo, en el proceso de revisión de la norma, se consideró que, desde el punto de vista más purista de la protección radiológica, no parecía el término más adecuado para ese cometido, cuando era factible usar directamente el de “tasa de dosis”. Por otra parte, es ampliamente utilizado en esa disciplina para representar el concepto de dosis equivalente por unidad de tiempo. Por tal motivo, desaparece el párrafo 233 en la edición 2018, que definía “nivel de radiación”, y aparece el párrafo 220A para definir “tasa de dosis”, entendiendo por tal la dosis equivalente ambiental o la dosis equivalente direccional, según el caso, por unidad de tiempo, medida en el punto de interés.

Como puede suponerse, este cambio terminológico ha afectado al texto de numerosos párrafos de la SSR-6, todos aquellos en los que se indicaban valores de nivel de radiación para establecer criterios de diseño de bultos y de operación en el transporte relacionados con la protección radiológica. Sin embargo, no es un cambio significativo para la esencia de esos requisitos, aunque sí resaltable por la cantidad de modificaciones de párrafos que implica.

Marcado de los bultos

Para los bultos del tipo Industrial, A, B o C, la reglamentación de transporte requiere marcarlos en su exterior, de manera duradera y legible, con la identificación del

Tabla 1. Resumen de cambios en la edición 2018 de la SSR-6 del OIEA

Párrafos modificados
101, 102, 104, 106, 220, 304, 305, 313, Tabla 1, Tabla 2, 409, 411, 413, 417, 423, 424, 427, 503, 509, 510, 513, 514, 515, 516, 517, 520, 522, 523, Tabla 6, 524,525, Tabla 7, Título antes de para. 526, 527, 528, 529, 534. 535, 536, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6, 540, 543, 546, 547, 557, 566, 571, 572, 573, 575, 579, 605, 617, 622, 624, 626, 627, 628, 629, 630, 648, 651, 659, 671, 674, 680, 683, 701, Título antes de para. 703, 716, 809, 817, Título antes de para. 819, 819, Título antes de para. 820, 820, 821, Título antes de para. 823, 823, 825, 832, 833, 836, 838, Anexo I Parte 1, Anexo III
Nuevos párrafos
220A, 524A, 536A, 613A, 821A, 827A
Párrafos eliminados
233, 601

	ADR	■ Periodo transitorio de 6 meses ■ Edición 2021: periodo transitorio del 1 de enero al 30 de junio de 2021
	RID	
	INSTRUCCIONES TÉCNICAS OACI	■ Sin periodo transitorio ■ Edición 2021: entrada en vigor el 1 de enero de 2021
	CÓDIGO IMDG	■ Periodo transitorio de 12 meses ■ Edición 2021: periodo transitorio del 1 de enero al 31 de diciembre de 2021

Periodos transitorios para la puesta en vigor de los reglamentos internacionales de transporte.

correspondiente tipo de bulto. Sin embargo, puede ocurrir que ese marcado no sea consistente con otras marcas también requeridas, como el número de Naciones Unidas (UN), que informa del contenido del bulto y, en ocasiones, del mínimo tipo de bulto requerido para ese contenido. Aunque hay varios casos en los que se puede dar esa inconsistencia, un ejemplo que puede ilustrarla bien sería el retorno de un bulto del tipo B (U) tras descargar su contenido. En ese caso, la remesa debe clasificarse como UN 2908 MATERIALES RADIACTIVOS, BULTOS EXCEPTUADOS – EMBALAJES VACÍOS y el bulto debe ir marcado exteriormente con esa información; pero también, al tratarse de un bulto aprobado como B(U), existiría en su exterior una marca (chapa o grabado o etiqueta) que incluirá la indicación B(U).

Hasta la edición de 2018 de la SSR-6 no había una indicación expresa de qué hacer en ese tipo de casos, de manera que era posible realizar el transporte con bultos que en su exterior mantuvieran marcas que podrían ser consideradas incoherentes y que generaran cierta confusión en aquellos que no conocieran profundamente los requisitos reglamentarios y, sobre todo, su motivo. Así, se podrían provocar dudas en los propios operadores de transporte, en las diversas autoridades con competencias en el seguimiento de los requisitos y, especialmente, en la actuación de los servicios de intervención inmediata en el caso de una emergencia. Este fue el motivo por el que, en el proceso de revisión de la SSR-6, se acordó introducir el nuevo párrafo 536A, que

Tabla 2. Tipo de cambios de los requisitos y sectores del transporte afectados

Principales modificaciones en los requisitos	Tipo de cambio	Sectores afectados
Tasa de dosis versus nivel de radiación	Formal	Todos
Supresión o tapado de marcas en el bulto que no guarden relación con el número UN de la remesa	Operacional	Todos
Eliminación del ensayo de lixiviación para los materiales BAE-III	Diseño	Residuos radiactivos / Nuclear
Consideración de los mecanismos de envejecimiento en los bultos de transporte	Diseño / Operacional	Todos
Disposiciones para el transporte de bultos radiactivos tras largos periodos de almacenamiento	Diseño / Operacional	Nuclear / Residuos radiactivos
Disposiciones para el transporte de grandes objetos contaminados en la superficie (OCS-III)	Operacional	Nuclear

establece que debe suprimirse o cubrirse cualquier marca en el bulto que no guarde relación con el número UN asignado a la remesa.

Este cambio afectará a todos los sectores del transporte de material radiactivo, aunque previsiblemente el impacto puede ser especialmente destacable en el del transporte de radiofármacos, donde diariamente se realizan decenas de expediciones de bultos del tipo A que, una vez descargados, son devueltos a las instalaciones remitentes clasificados como bultos exceptuados vacíos: es decir, como UN 2908. En ese caso particular, será necesario tapar o retirar cualquier marca que indique “tipo A”.

Eliminación del ensayo de lixiviación para los materiales BAE-III

Los requisitos para los materiales de baja actividad específica (BAE-I, BAE-II y BAE-III) fueron introducidos en el reglamento de transporte del OIEA a principios de los años 70 del siglo pasado. Hasta la edición de 2018, el párrafo 409 c) de la SSR-6 establecía que los BAE-III debían cumplir tres condiciones: que los materiales radiactivos estuvieran distribuidos en sólidos, o esencialmente distribuidos de modo uniforme en el seno de un agente ligante (como hormigón, asfalto o materiales cerámicos); que la actividad específica media del sólido no fuera superior a $2 \times 10^{-3} A_2/g$; y que los materiales radiactivos fueran relativamente insolubles,



La remesa de este bulto se ha clasificado como UN 3332-Materiales radiactivos, bultos del tipo A, en forma especial. Deberá suprimirse o cubrirse cualquier marca en el bulto que no guarde relación con el número UN asignado a la remesa

lo que debía confirmarse realizando un ensayo de lixiviación descrito en el párrafo 601.

Desde el establecimiento de esos requisitos, se ha obtenido mucha experiencia internacional en el transporte de los materiales BAE-II y BAE-III, normalmente constituidos por residuos radiactivos procedentes de instalaciones del ciclo de combustible nuclear. Una de las cuestiones sobre la que se ha discutido a lo largo de esos años ha sido la relevancia real para la seguridad en el transporte de la limitación de la solubilidad de los BAE-III, representada por el ensayo de lixiviación. A este respecto, análisis realizados en el primer decenio del siglo XXI sobre escenarios de accidente con impacto mecánico han demostrado que el factor de insolubilidad

del BAE-III no contribuye de manera relevante al nivel de seguridad, siendo insignificante frente a una potencial liberación del material en el aire. Asimismo, se ha comprobado que en ninguno de esos escenarios las personas en las inmediaciones del accidente llegarían a inhalar más de $10^{-6} A_2$, actividad equivalente a los 50 mSv de dosis máxima usado como referencia en el sistema Q para el cálculo y aplicación de los valores A_1 y A_2 ². También se ha comprobado que la reducción del límite de actividad específica de los BAE-III en un factor de 20 respecto a los BAE-II en forma sólida da suficiente margen de seguridad para que no sea necesario realizar la comprobación adicional que aporta el ensayo de lixiviación. Por estos motivos, se ha eliminado de la edición 2018 de la SSR-6 el requisito de este ensayo para los materiales BAE-III, lo que fundamentalmente afectará al transporte de los residuos radiactivos en el sector nuclear.

Como el resto de cambios introducidos en la edición 2018 de la SSR-6, este debería haberse incorporado en las ediciones de 2021 de los cuatro reglamentos internacionales de transporte de mercancías peligrosas, siguiendo el proceso de revisión reglamentario indicado al comienzo de este artículo. Sin embargo, debido a una serie de desafortunados errores de transmisión de la información entre los diferentes organismos involucrados en el proceso, es-

te cambio no fue adecuadamente incorporado en la edición 2019 del libro naranja y, en consecuencia, tampoco ha sido trasladado a las ediciones de 2021 del ADR, RID, IT de la OACI y Código IMDG. El problema debería haber sido detectado en alguno de los sucesivos foros de elaboración de la normativa de transporte, pero desgraciadamente no fue advertido. Afortunadamente, aunque fuera en el último momento, en el CSN se detectó el problema al revisar la traducción española de la edición 2021 del ADR y se puso en conocimiento del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana de manera inmediata para la búsqueda de una solución urgente. El CSN también lo puso en conocimiento de los miembros de la EACA (Asociación Europea de Autoridades Competentes en el Transporte de Material Radiactivo), que mostraron su apoyo para la búsqueda de una solución. Finalmente, el Ministerio, en colaboración con el CSN y tras consensuarlo en el foro ADR de la UNECE (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa), decidió promover desde España la firma de un Acuerdo Multilateral para que el ensayo de lixiviación de los BAE-III no fuera requerido en los países que lo firmaran, a pesar de ser mantenido en el ADR 2021. Este acuerdo, identificado como M332, fue firmado *in extremis* por España el 11 de diciembre de 2020 y publicado en el BOE nº 332 de 22 de diciembre de 2020 y ya ha sido firmado por varios países europeos. Por tanto, al menos en el ámbito del transporte por carretera, el ensayo de lixiviación para los materiales BAE-III no será necesario en los países que hayan firmado el acuerdo M332, que tendrá validez hasta el 31 de diciembre de 2022; es decir, hasta que se publique la edición 2023 del ADR, en la que ya se habrá corregido el error.

Consideración de los mecanismos de envejecimiento en los bultos de transporte

Los componentes del embalaje de un bulto, e incluso su contenido, pueden sufrir mecanismos de degradación y de envejecimiento que dependerán de las características de esos componentes y de ese contenido, así como de las condiciones de utilización del bulto. Hasta ahora, la reglamentación de transporte no recogía ningún requisito explícito sobre este asunto, pero la edición 2018 de la SSR-6 establece, en su nuevo párrafo 613A, que el diseño del bulto ha de tener en cuenta los mecanismos de envejecimiento. En consecuencia, de esa manera tan directa, y quizás excesivamente simple, a partir de 2021 las reglamentaciones de transporte requerirán que en todos los diseños de bulto (sujetos y no sujetos a aprobación) se consideren los mecanismos de envejecimiento. Parece evidente, no obstante, que este requisito ha de ser aplicado con un enfoque graduado, según el tipo de bulto y las condiciones de operación de cada diseño. A este respecto, es recomendable consultar lo que la SSG-26 del OIEA³ indicará en relación con la aplicación del párrafo 613A. Por tanto, a partir de ahora, el diseñador de un bulto tendrá que evaluar potenciales degradaciones en el diseño a lo largo del tiempo, tales como corrosión; fatiga; propagación de grietas; cambios en propiedades mecánicas o características de los materiales, debidos a la carga térmica o a la radiación; y cómo impactarán esos fenómenos en el cumplimiento de las funciones de seguridad del diseño. Estos fenómenos han de ser considerados fundamentalmente en dos casos: los embalajes que tengan un uso repetido y el transporte de bultos tras largos periodos de almacenamiento, sobre los que se hablará de manera específica en el siguiente punto de este artículo. En ambos casos, los efectos del

envejecimiento deberían ser evaluados en el estudio de seguridad (ES) de los bultos, en el caso de que estén sujetos a aprobación de diseño, o en su documentación de cumplimiento si no están sujetos a esa aprobación (documentación requerida en el párrafo 801 de la SSR-6 y cuyo contenido se concreta en el artículo 5º de la IS-39 del CSN). El programa de inspección y mantenimiento periódico del bulto, que también formará parte del ES o de la documentación de cumplimiento del bulto, debería tener en cuenta los resultados de esa evaluación. Aunque la SSR-6 no lo requiere expresamente, la SSG-26 del OIEA indicará que la evaluación del impacto del envejecimiento debería apoyarse en un «programa de gestión del envejecimiento», que tenga en cuenta sus efectos y su prevención, mitigación e inspección y seguimiento. Para el caso particular de los bultos almacenados durante un largo periodo de tiempo antes de ser transportados, ese programa debería tener en cuenta la duración y las condiciones del almacenamiento que especifique el diseñador, así como toda inspección y mantenimiento periódico realizados a lo largo del almacenamiento y con antelación a la realización del transporte.

Transporte de bultos radiactivos tras largos periodos de almacenamiento

La experiencia en determinados sectores del transporte de material radiactivo ha mostrado que la expedición no siempre se inicia tras la carga de los bultos, sino que puede transcurrir un largo periodo de almacenamiento antes de la salida. Son dos los casos más frecuentes, ambos en el sector nuclear: la preparación de bultos de residuos de media y baja actividad durante la operación de las instalaciones nucleares y la carga con combustible nuclear gastado en contenedores de doble propósito (DPC) para



Almacenamiento Temporal Individualizado (ATI) de la central nuclear de Trillo, en Guadalajara.

su almacenamiento en seco y su posterior transporte. Fue este último caso, debido a las características nucleares, radiológicas y térmicas del combustible gastado, y a las incertidumbres sobre cómo podrían verse afectados los componentes del contenedor y el propio contenido tras un largo periodo de almacenamiento, lo que llevó a considerar necesario establecer requisitos que garantizaran el mantenimiento de la seguridad en el bulto (contenedor + contenido) cuando se realizara el transporte tras ese almacenamiento prolongado. Así, la edición de 2018 de la SSR-6 identifica una nueva actividad en su alcance: el “transporte tras el almacenamiento” (*shipment after storage*). La dificultad para concretar el número mínimo de años que está detrás de ese concepto impidió llegar a consensuar su definición en la SSR-6, pero se trataría de una operación de transporte que requiere la consideración de mecanismos de envejecimiento de los componentes del bulto, así como el seguimiento de los cambios

reglamentarios o del conocimiento técnico aplicable a lo largo del periodo de almacenamiento; es decir, estaríamos hablando de varios años o incluso de décadas de almacenamiento de los bultos cargados.

En un principio, al desarrollar los requisitos relacionados con el transporte tras el almacenamiento, se estaba pensando solo en los contenedores DPC, pero finalmente esa exclusividad no se vio justificada, ya que en la práctica existen otros casos a los que pueden ser aplicados, como los bultos de residuos de media y baja actividad. Por tal razón, los nuevos requisitos se han establecido de manera genérica, de forma que deben ser aplicados a cualquier tipo de bulto, contengan combustible gastado o no. Es importante tener en cuenta que las condiciones de almacenamiento de los bultos antes de su transporte pueden estar reguladas por normativa específica sobre almacenamiento, quedando al margen del alcance de la reglamentación de transporte. No obstante, dada la interrelación

evidente entre ambas operaciones, existirán requisitos que las afecten de manera común. Un ejemplo podría ser el nuevo párrafo 503 e) de la SSR-6, relativo a las verificaciones a realizar antes de cada expedición. Este nuevo apartado requiere que para la expedición de bultos tras su almacenamiento se verifique que el estado de los componentes del embalaje y del contenido radiactivo se ha mantenido durante el almacenamiento de forma que se cumplan todos los requisitos especificados en las disposiciones reglamentarias y en los correspondientes certificados de aprobación. Para aplicarlo puede ser preciso comprobar una gran cantidad de parámetros (físicos, radiológicos, térmicos, de contención, etc.) definidos en los requisitos reglamentarios, en el ES de los bultos o, si fuera el caso, en los certificados de aprobación. Aunque habrá parámetros que podrán comprobarse fácilmente justo antes de la expedición, para otros será necesario hacerlo a lo largo de toda la fase de almacenamiento, pues su evolución

puede ser indicativa del estado de los componentes del embalaje y del propio contenido del bulto. Por tal motivo, para cumplir con este requisito será necesario desarrollar programas de inspección de los bultos almacenados, cuyo detalle y complejidad tendrá que ser acorde con la propia complejidad de los diseños.

El otro cambio a destacar tiene que ver con la información mínima que debe presentarse en una solicitud de aprobación de un diseño de bulto del tipo B o C. Se trata de dos nuevos apartados del párrafo 809 de la SSR-6, el f) y el k). El primero de ellos establece que si el bulto se transporta después de un almacenamiento la solicitud deberá incluir una evaluación de cómo afectarán los mecanismos de envejecimiento a los análisis de seguridad, así como a las instrucciones de funcionamiento y de mantenimiento (cuestiones que forman parte del ES del diseño del bulto). Si consideramos los dos casos habituales de transportes tras almacenamientos prolongados (residuos de media y baja actividad y combustible gastado), parece evidente que este requisito solo va dirigido a los DPC cargados con combustible gastado, ya que se clasifican normalmente como bultos del tipo BF (bultos B con materiales fisiónables). Por tanto, para estos diseños de bulto será necesario que se evalúen los efectos de los posibles mecanismos de degradación y envejecimiento a lo largo del almacenamiento, a fin de prever acciones que garanticen la seguridad del bulto cuando vaya a transportarse, acciones que pueden documentarse en el programa de gestión del envejecimiento al que se hacía mención en el punto anterior de este artículo. Por su parte, el nuevo apartado k) del párrafo 809 de la SSR-6 establece que la solicitud de aprobación deberá incluir un *gap analysis programme*, lo que podría ser traducido como un programa de análisis de las variaciones o cambios, pues su objetivo es definir un

procedimiento sistemático para evaluar periódicamente los cambios en los requisitos reglamentarios, en los conocimientos técnicos y en el estado del diseño del bulto mientras se mantenga almacenado en espera del transporte.

En definitiva, como resumen de este importante punto, antes del transporte de un bulto que haya estado almacenado un largo periodo de tiempo se deberá verificar que se cumplen todos sus requisitos de seguridad y, para aquellos cuyo diseño precise de aprobación, la solicitud deberá incluir una evaluación de cómo los mecanismos de envejecimiento afectarán al diseño y un programa de análisis de cambios (*gap analysis programme*) a lo largo del almacenamiento.

Por último, es importante tener en cuenta que la nueva disposición transitoria recogida en el párrafo 821A de la SSR-6 establece que después del 31 de diciembre de 2028 ya no podrán fabricarse embalajes de diseños de bultos aprobados según las ediciones del Reglamento de Transporte del OIEA de 1996, 1996 (revisada en 2003), 2005, 2009 y 2012, por lo que todos los contenedores de combustible gastado aprobados según esas ediciones deberán incorporar en su ES lo requerido en relación con la gestión del envejecimiento y el programa de análisis de cambios y adaptarse a la edición de 2018 si se pretende continuar fabricándolos a partir de esa fecha.

Transporte de grandes objetos contaminados en la superficie (OCS-III)

En los desmantelamientos de las instalaciones nucleares se genera una gran cantidad de objetos contaminados superficialmente clasificados como OCS-II, de acuerdo con los requisitos hasta ahora vigentes. Esos OCS-II han de ser transportados embalados, conformando un bulto Industrial tipo 2 (BI-2), pero en

ocasiones son de unas dimensiones y de un peso tales que no pueden ser embalados en la práctica, bien porque no exista un embalaje lo suficientemente grande o porque para llevar a cabo solo operaciones puntuales no esté justificado abordar el desarrollo de un diseño de esas dimensiones, con evidentes complicaciones logísticas para demostrar el cumplimiento de ciertos requisitos así como para su utilización. Por tal motivo, hasta ahora, la única vía reglamentaria para el transporte de grandes componentes, como generadores de vapor o vasijas de reactor sin embalar, era realizarlo bajo autorización de arreglos especiales. Aunque en España no ha sido necesario por el momento, en el mundo se han realizado más de un centenar de transportes de esas características, obteniéndose una gran experiencia reguladora y operacional. Sin embargo, ya sabemos que la opción de los arreglos especiales siempre es controvertida y problemática, pues, al fin y al cabo, supone la realización de un transporte que no se ajusta plenamente a las disposiciones reglamentarias. Por ello, en el proceso de revisión de la edición 2018 de la SSR-6 se decidió abordar el problema y tratar de definir unos requisitos reglamentarios que cubrieran estas operaciones sin que fuera preciso acudir a la opción de los arreglos especiales. El resultado ha sido la definición de un nuevo tipo de objeto contaminado en la superficie: el OCS-III, con la consecuente modificación del número UN que representa a las remesas de objetos contaminados en la superficie: UN 2913 – MATERIALES RADIATIVOS, OBJETOS CONTAMINADOS EN LA SUPERFICIE (OCS-I, OCS-II u OCS-III), no fisiónables o fisiónables exceptuados. Es importante hacer notar que no se produce un cambio similar en el UN 3326, relativo a los OCS con materiales fisiónables, ya que los OCS-III no podrán contener esos materiales.



Transporte de grandes componentes contaminados.

De acuerdo con el nuevo párrafo 413 c) de la SSR-6, un OCS-III deberá cumplir las siguientes condiciones: que sea un gran objeto sólido que por su tamaño no pueda ser transportado en ninguno de los tipos de bultos descritos en la reglamentación; que todas sus aberturas estén selladas para prevenir la dispersión de la contaminación durante el transporte; que su interior esté tan seco como sea posible; que la contaminación transitoria en su superficie externa no exceda los límites definidos para todos los tipos de bulto; y que se cumplan los límites de contaminación transitoria y fija en las superficies inaccesibles establecidos para los OCS-II. En resumen, se cubre el transporte de grandes objetos contaminados sin embalar, tratando de reducir al máximo la dispersión de la contaminación durante la expedición.

Una vez definido el OCS-III, ¿cuáles serían los requisitos específicos que deberían cumplirse durante su transporte? Además de los que aplicarían de manera genérica a cualquier material radiactivo

no embalado, ya definidos en ediciones anteriores de la SSR-6, la respuesta a esa cuestión la encontramos en el nuevo párrafo 520 e): un OCS-III no podrá apilarse y tanto el objeto como el blindaje que en su caso se le añada deberán ir adecuadamente sujetos al vehículo; el transporte se realizará bajo “uso exclusivo” y de acuerdo con un plan de transporte que defina las medidas de protección radiológica, las de emergencia y los procedimientos de control operacional; se deberá justificar el cumplimiento de los criterios de aceptación que la SSR-6 establece para el ensayo de caída que simula condiciones normales de transporte; y, por último y fundamental: la expedición precisará de autorización multilateral; es decir, de todos los países a través de los que transcurra. El contenido de la solicitud de esa autorización, además de adaptarse a lo requerido de manera genérica en el párrafo 827 de la SSR-6, deberá cumplir de manera específica con lo establecido en el nuevo párrafo 827A. Así, se justificará que el transporte del objeto solo puede realizarse

bajo la consideración de OCS-III; se describirá en detalle el objeto y su contenido radiactivo, justificando que cumple las condiciones de un OCS-III; se confirmará que no se superará la máxima actividad en el medio de transporte, definida en el párrafo 522 de la SSR-6; se demostrará el cumplimiento de todas las condiciones de transporte establecidas en el párrafo 520 e); se incluirá el plan de transporte requerido en dicho párrafo; y, por último, se informará del sistema de gestión que se aplique en el proceso.

En definitiva, como puede observarse, la solución encontrada en realidad ha sido similar a la que ya se venía utilizando: la autorización previa del transporte del gran objeto contaminado, aunque con una diferencia muy destacable desde el punto de vista regulador, ya que, a partir de 2021, estos transportes, en lugar de realizarse bajo una autorización de arreglos especiales, lo harán sometidos a una autorización, digamos, ortodoxa; es decir, con todos sus términos y condiciones ya previstos en el reglamento y, por tanto, acordados a escala internacional en el proceso de confección de la reglamentación de transporte de material radiactivo. ▀

Referencias

- ¹ Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos. Edición de 2018. Requisitos de Seguridad Específicos. N° SSR-6 (Rev.1). Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).
- ² Material explicativo para la aplicación del Reglamento del OIEA para el transporte seguro de materiales radiactivos (Edición de 2012). Guía de Seguridad Específica N° SSG-26. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).
- ³ Draft Safety Guide DS496. Revision of SSG-26 (SPESS STEP 12). Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2018 Edition). 30 August 2019. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Solicitudes de licencias y acreditaciones

La formación de las personas que trabajan en las instalaciones radiactivas y de radiodiagnóstico se considera un elemento fundamental para su correcto funcionamiento y para garantizar la protección de los trabajadores y la población.

La legislación española requiere que las personas cuya actividad puede afectar a la seguridad y a la protección radiológica de las instalaciones obtengan una licencia o una acreditación concedida por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

Existen dos tipos de licencias, de operador y de supervisor, además de los diplomas de jefatura de servicio de protección radiológica.

Dependiendo del tipo de instalación para la que se solicite y el puesto a desempeñar, las licencias disponen de una vigencia de cinco años de duración que debe ser renovada pasado ese tiempo.

En el caso de las acreditaciones, estas se vinculan a las instalaciones de radiodiagnóstico médico y no es precisa su renovación.

La acreditación se concede exclusivamente a efectos de protección radiológica, sin perjuicio de las titulaciones y requisitos que sean exigibles en cada caso en el orden profesional y por razón de las técnicas aplicadas.

1. ¿Para qué instalaciones se necesitan?

- Las licencias son necesarias para:
 - Instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible.*
 - Instalaciones radiactivas (con fines científicos, médicos, agrícolas, comerciales o industriales).
- Las acreditaciones son necesarias para:
 - Instalaciones de radiodiagnóstico médico.

- ▶ Diploma de jefe de servicio de Protección Radiológica:
- Titulados universitarios de grado superior y formación adecuada en protección radiológica.

- **Instalaciones de radiodiagnóstico médico:**
Las acreditaciones las pueden obtener los licenciados en Medicina y Cirugía y los técnicos superiores en imagen para el diagnóstico y medicina nuclear.

2. ¿Qué tipo de trámites hay?

- Obtención de primera licencia.
- Renovación de licencia.

3. ¿Quién puede solicitarlas?

- **Instalaciones radiactivas (con fines científicos, médicos, agrícolas, comerciales o industriales):**
 - ▶ Licencia de operador:
 - Personas que han completado la Enseñanza Secundaria Obligatoria o superior (o equivalente).
 - ▶ Licencia de supervisor:
 - Titulados universitarios de grado medio o superior (o equivalente).

* Su proceso de obtención no está recogido en esta Radiografía.

4. ¿Qué pasos hay que dar?

- **Instalaciones radiactivas (con fines científicos, médicos, agrícolas, comerciales o industriales):**
 1. Abonar las tasas correspondientes. Para ello se debe cumplimentar el documento "Solicitud del modelo 801 para el pago de las tasas por concesión o renovación de licencias" y seguir los trámites indicados en el mismo. El documento se encuentra disponible en la web del Consejo.

en el CSN

2. Cumplimentar el documento “Solicitud de licencia de personal de instalaciones radiactivas” y seguir los trámites indicados en el mismo para su remisión al CSN. (Documento disponible en la web del organismo).

3. La solicitud deberá acompañarse de:
 - Documentación que acredite el título académico. Fotocopia del diploma del curso de capacitación homologado por el CSN (si lo posee).
 - Certificado médico de aptitud para el puesto de trabajo emitido por un servicio de prevención de riesgos laborales o servicio médico especializado, autorizado a tal efecto, para ejercer la vigilancia médica de los trabajadores profesionalmente expuestos, siguiendo el protocolo para radiaciones ionizantes, calificando al solicitante de apto, no apto, o apto en determinadas condiciones, para trabajar con radiaciones ionizantes.
 - Fotocopia del DNI o NIE por ambas caras.

■ Instalaciones de radiodiagnóstico médico (acreditaciones):

1. Abonar las tasas correspondientes. Para ello se debe cumplimentar el documento “Solicitud del modelo 801 para el pago de las tasas por

concesión o renovación de licencias” y seguir los trámites indicados en el mismo. (Documento disponible en la web del CSN).

2. La solicitud deberá ir acompañada de:
 - Copia del DNI, de la documentación que acredite el período de ejercicio profesional y del contenido y duración de los cursos de especialización o bien copia compulsada del título académico.

5. ¿Cuánto se tarda en obtener una licencia?

- Depende de si se trata de una acreditación o de una licencia. En el caso de las acreditaciones el plazo de obtención depende de la correcta cumplimentación de la documentación.
- En el caso de las licencias que deben obtenerse a través de un examen, las actuales medidas de seguridad impuestas por la covid-19 —que reducen el aforo de asistentes— hacen que el proceso quede dilatado y se tarde más tiempo del habitual.

¿Cómo se conceden las licencias?

■ Instalaciones radiactivas (con fines científicos, médicos, agrícolas, comerciales o industriales):

- El CSN otorga las licencias, en su respectivo campo de aplicación, e inscribe en el correspondiente registro a quienes:
 - Remitan cumplimentada la documentación pertinente al CSN.
 - Acrediten haber superado los cursos homologados previamente por el CSN para cada tipo de licencia y campo de aplicación.
 - Estén en posesión de titulaciones académicas cuyos programas, a juicio del CSN, contengan los conocimientos requeridos para un tipo de licencia y campo de aplicación.

En los demás casos, las licencias y diplomas serán concedidos por el Consejo a propuesta de un tribunal designado por el mismo, quien juzgará si los solicitantes disponen, en su campo de aplicación, de formación y experiencia suficiente para el desempeño del puesto de trabajo de que se trate. El tribunal estará compuesto por un presidente y cuatro vocales expertos en protección radiológica y en alguno de los campos de aplicación de las instalaciones radiactivas, uno de los cuales actuará como secretario.

Pilar Lucio Carrasco (Plasencia, Cáceres, 1972) es licenciada en Ciencias Políticas y Sociología y tiene formación de posgrado en Consultoría estratégica de las organizaciones y en Gobierno y administración pública. Durante un tiempo se dedicó al ejercicio profesional en investigación sociológica y de mercados, en la docencia y en la dirección de proyectos europeos de fomento de la economía y el empleo de jóvenes y mujeres. Esa experiencia le permitió dar el salto a la gestión pública y la política, a las que ha dedicado los últimos catorce años. Y lo ha hecho por un lado con responsabilidades ejecutivas, ya que fue consejera de Igualdad y Em-

pleo de la Junta de Extremadura; y por otro legislativas, como diputada del Grupo Socialista entre 2011 y 2019. En el Congreso ejerció como portavoz de Energía de su grupo y fue miembro de la Ponencia de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica, ante la que rinde cuentas en CSN. Con ese bagaje, en 2019 fue propuesta para ocupar el cargo de consejera del Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear, cargo que sigue ostentando en la actualidad y en el que, según dice, se ha focalizado en la definición de líneas estratégicas y nuevas regulaciones del organismo. Coordinó el libro *La transición energética en España. Una propuesta desde la socialdemocracia*.

Entrevista a Pilar Lucio, consejera del CSN

“Mejorar la información y la comunicación con la ciudadanía es uno de los principales retos del Consejo”

■ Texto: **Ignacio Fernández Bayo** | Divulga ■ Fotografías: **Julio Fernández González** ■

PREGUNTA: *Usted conocía bien el Consejo por haber sido miembro de la ponencia del Parlamento ¿no?*

RESPUESTA: Conocía bastante el funcionamiento del Consejo de Seguridad Nuclear, cuales eran los temas que se

estaban tratando, las vicisitudes que había, pero realmente no acabas de conocer una entidad hasta que estás dentro de ella y eso es lo que me ha ocurrido a mí. Yo lo conocía especialmente desde la perspectiva de su influencia en la políti-

ca energética, pero realmente el conocimiento del organismo, su funcionamiento, sus procedimientos no lo tienes hasta que estás dentro de él.

P: *Y no se ven igual los toros desde la barrera que desde el ruedo.*



R: Claro, no es lo mismo, lo conoces parcialmente pero no en profundidad. En el Congreso de los Diputados lo que conoces es lo que salta a la opinión pública; en la ponencia de relaciones con el CSN se profundiza en el trabajo realiza-

do por el Consejo durante el año anterior pero siempre se fija la atención en aquellos temas que tienen repercusión en la opinión pública, en la ciudadanía...

P: *Y ahora que lo conoce por dentro, ¿qué le ha sorprendido?*

R: Conocer el organigrama y saber qué hacía cada área es lo que me llamó la atención al principio. La verdad es que me resultó sorprendente la cantidad de personas trabajando, todas ellas hiper-cualificadas. Con solo leer los informes

anuales no te haces una idea de todo eso. Y descubrí la reputación que tiene el Consejo a nivel internacional y su posicionamiento entre los reguladores. También me llamó la atención que todos los procedimientos están perfectamente establecidos y documentados, con niveles de calidad de gestión muy elevados. En un organismo que tiene la responsabilidad que tiene el Consejo eso es muy importante.

P: *El Consejo tiene una rama técnica fundamental, pero está gobernado por un Pleno que no suele proceder del propio Consejo. ¿Cómo se conjugan las dos cosas?*

R: Como recogen los Estatutos, el cuerpo técnico tiene la misión de evaluar con el máximo rigor cada una de las peticiones que tienen encima de la mesa. Y sus informes generalmente no se tocan, porque por muy especializados que estemos los miembros del Pleno en algunos temas ninguno conoce como los técnicos del CSN lo que hay que hacer para sacar un informe con todo el rigor. El Pleno está conformado por personas de distintas trayectorias y experiencias y tiene la misión de regular, de asegurar que la regulación que existe sea adecuada y comprobar que los informes técnicos se adecúan a la regulación. Y tenemos la obligación de hacer política regulatoria acorde con el momento, con la coyuntura en la que vivimos. No es lo mismo el sector nuclear del año 2020 que el del año 1990, ni el que será en 2040, cuando ya habrán cerrado todas las centrales nucleares. Nosotros tenemos la obligación de aportar, desde nuestra experiencia, innovación regulatoria.

P: *Y ¿cómo son las relaciones entre los miembros del Pleno? ¿Es fácil adoptar acuerdos por unanimidad o hay discrepancias?*

R: Bueno, en este Pleno hemos tomado decisiones por consenso yo diría que el 99,9% de las veces. Es verdad que hay discusión y debate, porque somos personas diferentes, con bagajes y priorida-

des, diferentes, con culturas y experiencias diferentes y por tanto cada uno enfoca los temas desde una perspectiva distinta. Somos muy diferentes, pero creo que hemos conseguido llegar a esos consensos. En los temas puramente técnicos no recuerdo que haya habido ningún voto particular desde que estoy aquí. Y eso que hemos tenido tres renovaciones de licencia de centrales en ese tiempo. Yo creo que donde hay más diferencias es en la gestión de la organización, que cada uno la ve de manera diferente. Los órganos colegiados son complicados porque todos tienen voz y voto a la hora de tomar decisiones. Yo estoy acostumbrada a trabajar con una estructura más jerárquica, donde se analizan los temas en equipo, pero las decisiones las toma el responsable.

P: *Esa gestión de la organización se plasma en el Plan Estratégico, y el año pasado se aprobó uno nuevo. ¿Qué cambios introduce respecto al anterior?*

R: El nuevo plan incorpora unas prioridades que parecían necesarias y desde luego yo desde mi experiencia como portavoz de energía en el Congreso de los Diputados la veía clara y es la necesidad de mejorar la información y la comunicación con la ciudadanía; trabajar con la máxima transparencia que podamos. Y todo eso se ha incorporado en el nuevo Plan Estratégico. Es darle un nuevo enfoque, no necesariamente revolucionario, porque lo que se hace está muy tasado y lo tasan los Estatutos, pero sí darle otro enfoque, sobre todo de apertura y de adaptación al mundo en que vivimos.

P: *La comunicación es uno de los retos permanentes del Consejo y ha sido objeto de muchos esfuerzos, ¿de qué forma se va a mejorar?*

R: En comunicación es muy importante el liderazgo que haya en cada momento en el organismo y el liderazgo es el presidente, el Pleno y los instrumentos que tiene, como el Plan Estratégico. Cuando uno vive aislado porque no necesita relacionarse con nadie no hace falta comunicar, pero en el Estatuto del Consejo de Seguridad Nuclear, en uno de sus primeros artículos, se dice que una de nuestras funciones fundamentales es la información pública. Hay procedimientos, está muy bien organizado, pero no el día a día. Si surge cualquier duda en la opinión pública el Consejo tie-



ne que responder de forma rápida, porque es el único organismo competente en materia de seguridad nuclear y protección radiológica, y es quien debe dar la información que demanda la sociedad sobre este asunto. Si nosotros no informamos, como institución, habrá quien informe. Los periodistas deben tener alguien veraz con quien contrastar. Por eso hay que hacer todo el esfuerzo necesario para que cada vez que ocurre algo salir a informar; y hacerlo de forma rigurosa pero también con un lenguaje que pueda ser comprendido por la opinión pública. Si eso no se hace tendremos problemas de reputación. En todas las organizaciones la transparencia es importante

para acabar con malentendidos y el CSN ahora es más transparente.

P: *Ser transparente es una forma pasiva de contactar con la sociedad. ¿No se deben hacer también acciones proactivas?*

R: Sin duda, en el caso de los *stakeholders*, aquellos que nos necesitan para algún servicio, no hay ningún problema, porque tienen la información que necesitan en la web del Consejo. Es distinto cuando un ciudadano de a pie dice que le han comentado que en la cueva de su pueblo hay radón y que ahí van los chicos del pueblo a hacer botellón y que no saben si van a tener algún problema. Ahí

es donde debe estar el Consejo de Seguridad Nuclear. ¿Cómo nos encuentran? La gente no sabe que es aquí donde se trata ese asunto. ¿Hay que ser proactivos? Pues yo creo que sí, porque tenemos la capacidad, los documentos, solo hay que poner la información digerible y a disposición de la ciudadanía. Nos llegan muchas consultas y las estamos analizando dentro del Grupo de Comunicación e Información, para saber en qué está interesada la gente para que de forma proactiva emitamos documentos, colguemos algo en la web, hagamos un monográfico... cosas en las que podamos ir por delante.

P: *¿Qué otros retos deberá afrontar el Consejo en los próximos años?*

R: Yo creo que el principal reto es seguir mejorando la calidad del servicio que prestamos, intentar adaptar la normativa para que podamos ser lo más ágiles que podamos, siempre que respetemos, desde luego, los criterios de seguridad. Por ejemplo, tenemos por delante una nueva actividad que no era prioritaria en 1990 y ahora sí, que es el desmantelamiento de las centrales nucleares. Es un reto de política energética pero también un reto regulatorio, porque tenemos que adaptar la regulación a una nueva realidad,

“El sector nuclear está muy masculinizado”

P: *¿Cuántas mujeres van a las reuniones internacionales del sector?*

R: Pues te diré que en las reuniones de HERCA, cuyos temas abarcan las prácticas médicas y medioambientales, hay más mujeres, pero en la CNRA, sobre seguridad nuclear, hay muy pocas. Hay muchas más mujeres en protección radiológica que en seguridad nuclear.

P: *El sector nuclear está muy masculinizado ¿no?*

R: Sí, sí lo está.

P: *¿Y sabe cómo ha evolucionado a lo largo del tiempo?*

R: Bueno no tengo aún la visión de un plazo largo. Hay una organización internacional llamada Women in Nuclear, que hicieron un congreso en la Escuela de Ingenieros Industriales de Madrid, hace un par de años. Lo organizó la sección española, un grupo de mujeres del mundo nuclear, y yo tenía interés en que me contaran si tienen estudios sobre la paridad en el sector. Teníamos programada una reunión con la responsable para unos días después del estado de alarma y lógicamente se quedó pendiente.

P: *¿Y cuál es la situación en el Consejo?*

R: Estamos haciendo un diagnóstico para ver cómo ha evolucionado a lo largo del tiempo. Es un trabajo interesante pero que este año ha sido difícil seguir con él y lo retomaremos ahora. Se trata de hacer un análisis de situación y evolución de los parámetros de igualdad en el organismo. En 2010 se hizo un primer diagnóstico y ahora se van a actualizar los datos y a reactivar la comisión paritaria que

se creó en su momento. Después se elaborará un plan de igualdad, que está recogido en los Estatutos, pero no se había hecho. Estábamos sujetos al Plan de Igualdad de la Administración General del Estado, pero ahora tendremos el nuestro.

P: La proporción de mujeres en la plantilla del Consejo era en 2019 del 52%. ¿Se reducen las proporciones al escalar en los puestos de responsabilidad?

R: Claro, es lo que suele ocurrir. Que el Consejo sea un organismo de la Administración y ofrezca puestos fijos, con un horario acotado, suele ser un incentivo para el trabajo femenino, por la tranquilidad que aporta y porque permite mantener el tradicional reparto de tareas en el hogar y en la crianza de los hijos y el cuidado de los mayores. Estoy generalizando, obviamente, porque habrá todo tipo de casos. Pero eso hace que el Consejo quizás tenga una media de ingenieras, médicas, físicas... por encima de lo que habría en un central nuclear o una ingeniería al uso, porque es una Administración. Y luego es verdad que según vas subiendo vas viendo que cambia. En las subdirecciones se ve que ya hay bastantes más hombres que mujeres; en las direcciones está equiparado, porque hay dos...

P: *¿Qué medias se tomarán cuando se acabe el estudio?*

R: Las medidas que se suelen tomar en todos los planes de igualdad: tratar de equiparar las responsabilidades dentro de la organización, garantizar medidas de conciliación, evitar el acoso laboral y sexual, actividades de formación, puesta en valor de las mujeres que han pasado por el Consejo... Es una de las muchas cosas que trato de impulsar en el Consejo.

garantizar que ese proceso se haga con todas las garantías de seguridad y eso exige que el regulador se adelante y sea proactivo. No somos solo un organismo regulador, es que también somos un organismo público; no podemos vivir aislados de la realidad en la que estamos. Ser independientes no significa estar aislados. Ser independiente es tomar decisiones sin depender de ningún poder, ni del económico ni del político, pero no quiere decir que vivas de espaldas a la realidad en la que estás. Y el regulador tiene que estar abierto a la realidad en la que vive.

P: *Esa independencia se ha puesto en cuestión hace unas semanas, por la supuesta presión realizada por la empresa minera Berkeley. ¿Ha sentido el Consejo realmente que se estaba poniendo en riesgo su independencia?*

R: Yo creo que lo mínimo que se le puede pedir a alguien cuando se relaciona con una Administración Pública es que entienda cuales son las reglas del juego. Todos deberían saber que el regulador se relaciona con el Ministerio que le encarga hacer evaluaciones, informes y autorizaciones. Hay que entender el funcionamiento y respetarlo. Y si se entiende y no se respeta, mal; y no se entiende, pues peor. Pero cada uno tiene su papel y hay que saber qué papel juega cada uno y el Consejo solo hace informes a petición del Ministerio y lo único que tiene que hacer es garantizar la seguridad nuclear y la protección radiológica; con ese proyecto y con todos los proyectos. Cada uno tiene que saber qué sitio ocupa y qué barreras no se deben traspasar.

P: *En alguna carta de esta empresa que se difundió en los medios había veladas amenazas al Consejo.*

R: Bueno se pueden interpretar como tal. Lo que no es normal es esa comunicación directa por parte de abogados, asociaciones que apoyan o no... Es que este no es el sitio. Aquí estamos haciendo otra cosa. Estamos dejándonos la piel todos

los técnicos en todas las áreas que tienen que hacer un informe para valorar si es seguro o no desde el punto de vista radiológico ese proyecto y en ello estamos. En el caso particular de Retortillo nosotros no tomamos decisiones. Hacemos informes técnicos de una gran complejidad.

P: *Este último año ha sido peculiar por la pandemia. ¿De qué manera ha afectado al funcionamiento del Consejo?*

R: Dos días antes de que empezara el estado de alarma tomamos la decisión de que no viniera nadie a trabajar al Consejo y se empezó a organizar cómo hacerlo, porque había sido todo muy precipitado. La experiencia del teletrabajo era



“Hemos cambiado el informe anual al Parlamento para hacerlo más útil y asequible para los diputados”

inédita, no sabíamos cómo iba a funcionar y teníamos que establecer las prioridades de trabajo. Tomamos la decisión de poner en marcha el Plan de continuidad para el seguimiento y cada semana íbamos realimentándolo con toda la experiencia que se acumulaba. Esto tuvo un cierto interés internacional, porque otros reguladores pusieron en marcha cosas parecidas y el presidente ha estado en contacto con ellos para compartir experiencias. Yo creo que se ha llevado bastante bien, porque la mayor parte del trabajo aquí es de *masa gris* y se ha podido hacer desde casa, aunque siempre se pierde algo por la falta de presencialidad.

P: *Pero hay funciones, como la de inspección, que sí exige cierta presencialidad*

y se podría pensar que se ha reducido en este tiempo.

R: Que se ha reducido es una realidad. Pero rápidamente empezamos a activar otro tipo de acciones para ver cómo lo resolvíamos y se han hecho inspecciones telemáticas y poco a poco se reanudaron las labores de inspección.

P: *¿Los inspectores residentes han seguido en su puesto?*

R: Han seguido cumpliendo sus funciones. En su puesto cuando lo han permitido las normas de cada central, que tuvieron unos servicios mínimos, pero también hicieron mucho teletrabajo.

P: *El CSN ha cambiado la estructura y contenido de su informe anual al Parlamento. ¿En qué ha consistido ese cambio?*

R: Esta totalmente relacionado con lo que hablábamos antes de la información y la comunicación pública. Dentro del Pleno cada miembro asume la coordinación de temas concretos y a mí se me encargó que pusiera en marcha un grupo de trabajo para la mejora de las relaciones con el Parlamento y para los temas de comunicación y transparencia. Uno de los objetivos era cambiar el informe para hacerlo más útil, legible y asequible para los diputados. Los informes tradicionalmente han sido muy exhaustivos y rigurosos, incorporando todas las actividades realizadas en el CSN el año anterior, pero era un informe más descriptivo que analítico. Hemos querido darle mayor valor añadido, para que un diputado pudiera leerlo y comparar con el del año anterior; y encontrar fácilmente los aspectos que le interesaran. El resultado es un informe más cualitativo y evaluativo que solo descriptivo, sin perder el rigor de la información.

P: *Usted era la persona idónea para conocer las carencias de los informes anteriores...*

R: Conocía el informe bastante bien porque estuve cuatro años en la ponencia y he tenido que lidiar con él desde el

Parlamento, y veía que era complicado sacar una información válida para una persona profana en la materia, que sea útil para un diputado o un senador.

P: ¿Se ha reducido de tamaño?

R: No. Sigue siendo un informe grande pero la estructura es diferente. Por ejemplo, a un senador de Murcia le interesa mucho saber qué pasa en su comunidad y el informe lo puede decir porque tenemos convenios de protección radiológica, de medición de radiación ambiental y de emergencias con todas las comunidades autónomas. Esa información,

terminado, y entonces el Consejo lo tendrá que informar.

P: El proyecto anterior, el de Villar Cañas, ya pasó la supervisión del Consejo ¿no?

R: El Ministerio pidió al CSN que evaluara el proyecto de construcción de un Almacén Temporal Centralizado en Villar de Cañas y el Consejo trabajó en esa evaluación. Luego, el Ministerio informó al Consejo de que este proyecto quedaba en *impasse*.

P: ¿En qué otros temas trabaja el Consejo con Enresa actualmente?



Pilar Lucio e Ignacio Fernández Bayo durante la entrevista.

que me parece fundamental, estaba recogida en el informe, pero de manera dispersa. Y depende de cómo empaquetes la información puede ser de mayor o menor utilidad.

P: Usted coordina las relaciones con Enresa. ¿Tratan con ellos el tema del Almacén Temporal Centralizado (ATC), que sigue sin resolverse?

R: Es que ese tema trasciende a nuestras competencias. Es el Ministerio y Enresa quienes lo tratan mediante el Plan General de Residuos Radiactivos, que está en tramitación. Nosotros no tenemos nada que decir hasta que el plan no esté

R: Pues estamos trabajando junto con el Ministerio en una labor de prospectiva, para adelantarnos un poco a lo que vendrá. Estamos organizando un workshop internacional sobre los almacenes geológicos profundos (AGP), y creo que va a ser muy interesante, porque se va a tratar desde el punto de vista técnico por parte de Enresa, pero también regulatorio, porque los países que ya han comenzado a hacer un AGP ya tienen desarrollada su regulación.

P: ¿Cuáles son esos países?

R: Suecia, Finlandia y Canadá... Y con Enresa tenemos mucha actividad

por delante, porque una vez que hagamos las revisiones de seguridad de todas las centrales nucleares, lo más importante va a ser el licenciamiento de los contenedores el redimensionamiento de los almacenes temporales y eso es todo prácticamente con Enresa. Son muchos temas los que tenemos entre manos.

P: Antes ha citado las relaciones internacionales del Consejo. ¿En cuáles ha participado y qué impresión tiene de esa labor?

R: En un tema tan delicado y superespecializado como es la seguridad nuclear, es importante saber que hay una armonización regulatoria internacional y que lo que haces ha sido testado o que lo que tu testes les sirva a otros. Desconocía esa labor y ahora la valoro muchísimo. Yo estoy en HERCA, que es un grupo para la armonización regulatoria en protección radiológica y su labor nos garantiza nuestra actuaciones. En esas instituciones han surgido iniciativas como la cultura de seguridad, que ahora es un enfoque generalizado, porque no solo tienen que funcionar los aparatos sino también las personas que están con esos aparatos. También participo en la CNRA de la NEA, que es el comité de regulación, donde informamos de dónde está cada país, en operación a largo plazo, problemas en las cadenas de suministro... problemas comunes a los que les damos soluciones comunes.

P: Y las relaciones bilaterales.

R: El Consejo se creó tomando como referencia a la NRC americana e históricamente ha mantenido una intensa relación con EEUU, de la que también formo parte. Con Francia también tenemos una fructífera relación; por ejemplo, en temas de comunicación, para ver cómo afrontan la información al público, donde tienen mucha experiencia porque tienen centrales en todo el territorio. Y con Portugal tratamos impulsar un memorándum de entendimiento para actualizar algunos de los convenios conjuntos que tenemos sobre emergencias. ©



Vista general
del laboratorio
IceCube.

El detector de neutrinos IceCube, enterrado bajo el hielo del Polo Sur, celebra una década de actividad

El telescopio de los poetas

Los neutrinos son las partículas más comunes y también las más extrañas del Universo. Su abundancia es tal que nos llegan muchos más neutrinos que fotones de luz del Sol, pero son esquivos y atraviesan la Tierra sin perder la compostura a razón de billones de ellos cada segundo. Por eso, casi 70 años después de su descubrimiento todavía sabemos menos sobre ellos que del resto de partículas que componen la materia. IceCube es el telescopio de neutrinos más grande del mundo, está enterrado

bajo el hielo antártico, en el mismísimo Polo Sur, e intenta capturar neutrinos de muy alta energía, nacidos fuera de nuestra galaxia, y rastrearlos hasta sus remotos lugares de origen. Se trata de hacer una fotografía del Universo, pero no con fotones, esos temblores de luz, como es habitual en astronomía, sino con esta partícula de naturaleza fantasmal. De momento ya ha demostrado que, bajo su aparente quietud, el Universo brilla en neutrinos.

■ Texto: **Eugenia Angulo** | Periodista de ciencia ■



MARTIN WOLF / ICECUBE / NSF

estudiar unas partículas invisibles y extrañas que viajan, imperturbables, desde las profundidades del espacio: los neutrinos de origen cósmico. Financiado por la Fundación Nacional para la Ciencia de Estados Unidos y algunos países europeos, y bajo el cuidado de la Universidad de Wisconsin-Madison, IceCube es un telescopio extraño: está formado por 5.160 sensores de luz enterrados bajo la capa de hielo de la Antártida a una profundidad entre 1.500 y 2.540 metros. En total, ocupa un kilómetro cúbico y está muy cerca de la base científica Amundsen-Scott, en el Polo Sur. Es el cazador de neutrinos más grande del mundo. El deber poético de IceCube (el cubo de hielo) es encontrar neutrinos que están ahí, pero se esconden.

Porque sobre estos discretísimos viajeros cósmicos poco se sabe, aunque se les supone una abundancia colosal: varios miles de millones atravesarían nuestros cuerpos cada segundo. De ser visibles, los neutrinos que nos visitan en la Tierra harían que la noche no tuviera fronteras con el día.

“De todas las cosas que componen el universo, la más común y la más rara son los neutrinos”, escribió Frank Close, físico de partículas y antiguo jefe de la división de física teórica del Laboratorio Rutherford Appleton, en su libro *Neutrino, la partícula fantasma*. “Si tuviéramos ojos para ver los neutrinos, la noche sería tan brillante como el día: los neutrinos del Sol brillan sobre nuestras cabezas por el día y desde debajo de nuestras camas por las noches, y lo hacen con la misma intensidad [...] Son tan esquivas que el simple hecho de que conozcamos su existencia es extraordinario”.

Con una masa que apenas es un soplo, los neutrinos son lo más parecido a la nada, a un chispazo de la imaginación. 65 años después de que los físicos de partículas Clyde Cowan y Frederick Reines demostraran experimentalmente que existen, aún no se ha conseguido

medir su masa, aunque se sabe que es muchos órdenes de magnitud más pequeña que las demás partículas subatómicas. ¿Por qué? No se sabe.

Los neutrinos tampoco tienen carga eléctrica (de ahí su nombre), de forma que no interaccionan con nada; y en este caso la nada es total: viajan en línea recta desde los lugares en los que nacieron y si se encuentran con un planeta “lo atraviesan como si fueran un banco de niebla”, en palabras de Close. Lo atraviesan, y siguen su camino, imperturbables.



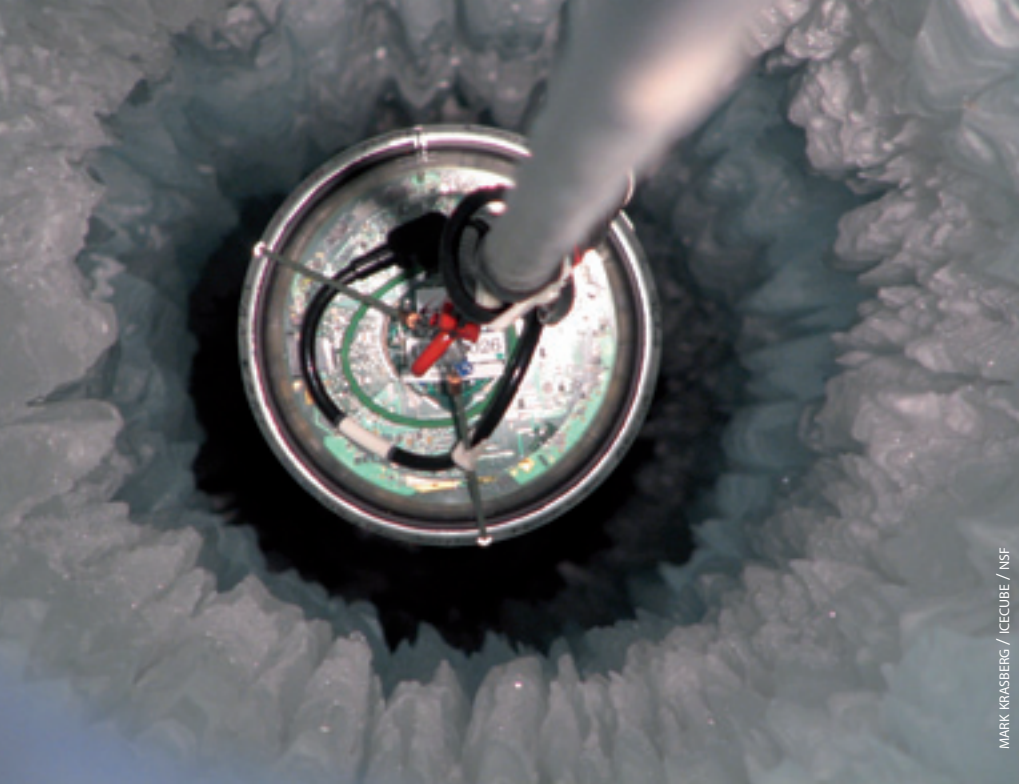
CIEMAT

Inés Gil Botella, investigadora del Ciemat.

Su desafección les convierte en testigos de los lugares y de los procesos en los que nacieron. “Hasta ahora en astronomía, en astrofísica, se trataba de observar la luz, los fotones. Esta es otra partícula, que proviene de fenómenos en el universo y que nos proporciona información sobre las fuentes de las que vienen”, explica Inés Gil Botella, física en el Departamento de Investigación Básica del Ciemat. Gil participa en el proyecto DUNE, que está construyéndose en Estados Unidos para comprender esta partícula tan ajena al resto y que podría estar detrás de algunas de las cuestiones más acuciantes en física: dónde está la materia oscura, cómo encajan los neutrinos en el Modelo Estándar

“Se supone que la prosa está más cerca de la realidad que la poesía. Entiendo que es un error”. La quinta noche de las siete que Jorge Luis Borges dedicó en el verano de 1977 a charlar sobre literatura en el Teatro Coliseo de Buenos Aires estuvo dedicada a la poesía. “Cuando yo escribo algo, tengo la sensación de que ese algo preexiste. Parto de un concepto general; sé más o menos el principio y el fin, y luego voy descubriendo las partes intermedias; pero no tengo la sensación de inventarlas, no tengo la sensación de que dependan de mi arbitrio; las cosas son así. Son así, pero están escondidas y mi deber de poeta es encontrarlas.”

El telescopio IceCube se construyó en la desolación blanca de la Antártida para



MARK KRASBERG / ICECUBE / NSF

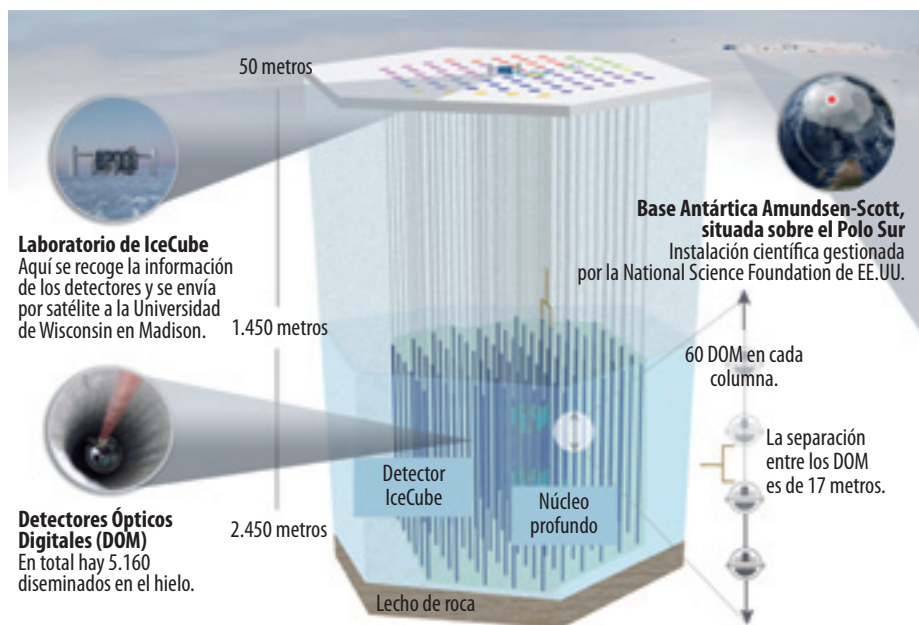


FREJA DESCAMPS / ICECUBE / NSF

Perforación del hielo para colocar una columna de detectores.

Colocación de los cables que envían la señal.

ICECUBE / NSF



Telescopio de neutrinos IceCube en la Antártida

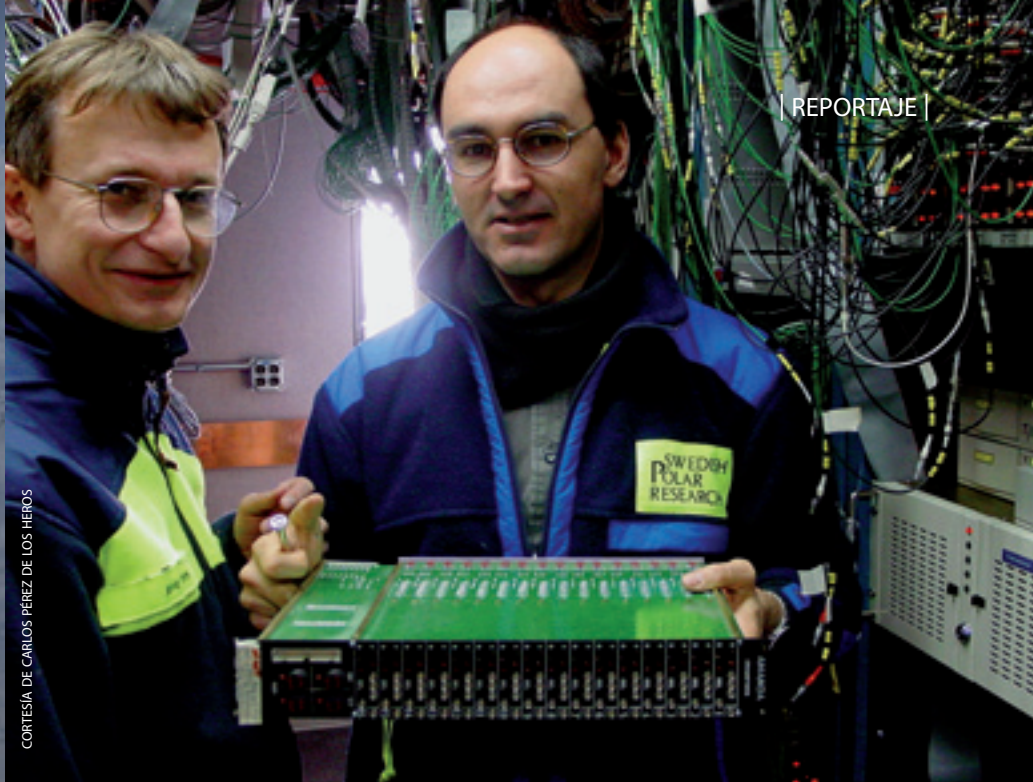
IceCube está formado por más de 5.000 detectores ópticos digitales muy sensibles distribuidos en un volumen de un kilómetro cúbico, cerca de la base científica Amundsen-Scott, en el Polo Sur geográfico. Los módulos, de unos 35 cm de diámetro, tienen forma esférica y están colocados a una profundidad de hasta 2,5 kilómetros en la capa de hielo; el conjunto pesa más de mil millones de toneladas. Los sensores detectan el débil destello de luz que se crea cuando un neutrino de alta energía interactúa con el hielo.

—la tabla periódica de las partículas subatómicas—, la búsqueda de antimateria...

Los físicos que han dedicado y dedican buena parte de sus vidas a estudiar neutrinos han dejado frases que podrían estar en un poema. Para Frederick Reines, premio Nobel de física en 1995, los neutrinos son “la cantidad de realidad más pequeña jamás imaginada por un ser humano”. Para Close, “fantasmales e invisibles pedazos de la nada”. Haim Hariri, presidente del Instituto Weizmann de Ciencias de Israel, imparte una conferencia famosa titulada: “La física del neutrino es el arte de aprender muchas cosas observando la nada”. Para Inés Gil, “Al final lo minúsculo, una cosa tan insignificante, tiene la llave para abrir puertas más allá”. Y por supuesto, Wolfgang Pauli, quien predijo su existencia a principios de los años 30, así: “He hecho una cosa horrible hoy: he propuesto una partícula que no puede detectarse. Eso es algo que ningún teórico debería hacer jamás”.

En la placenta de neutrinos

El origen de los neutrinos es diverso: algunos se producen en estrellas como nuestro Sol —los neutrinos solares tar-



CORTESÍA DE CARLOS PÉREZ DE LOS HEROS

Carlos Pérez de los Heros durante su estancia en IceCube.

dan unos ocho minutos en llegar a la Tierra—; los hay terrestres, procedentes de la propia radiactividad de nuestro planeta; y hasta el mismo cuerpo humano los produce. La mayoría son muy antiguos, restos fósiles del *big bang* que llevan más de 13.000 millones de años viajando por el espacio.

“El Sol es un enorme reactor nuclear de fusión que está produciendo una cantidad enorme de energía y partículas como fotones, es decir: rayos de luz, y neutrinos. Los fotones se producen fundamentalmente en el centro del Sol, y hasta que consiguen salir puede pasar un tiempo enorme porque van interactuando continuamente. Mientras que los neutrinos que se producen en el centro del Sol salen de forma casi inmediata porque no interactúan con nada y llegan a la Tierra, llegan antes que incluso la propia luz”, explica Juan Antonio Caballero, director del departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universidad de Sevilla y autor de *Los neutrinos, las partículas elementales que todo lo atraviesan*.

El telescopio IceCube está interesado especialmente en los neutrinos

de muy alta energía que se producen fuera de nuestro Sistema Solar, en acontecimientos muy violentos y poco conocidos del universo, como las supernovas (estrellas que explotan), y en objetos astrofísicos extraños e inimaginables, como agujeros negros y cuásares.

La trampa en el hielo

Carlos Pérez de los Heros hacía su tesis en física de partículas en el Instituto Weizmann de Ciencias, en Israel, cuando atendió una conferencia que determinaría el resto de su vida profesional. Un físico de la Universidad de Uppsala (Suecia) hablaba de construir un telescopio de neutrinos utilizando el hielo de la Antártida como detector. El proyecto se llamaba AMANDA. Era 1997. Con el discurrir del tiempo, AMANDA desembocaría en IceCube.

Desde finales de los años 70, los físicos que intentaban cazar neutrinos del espacio tenían ya claro que la única forma era esperar a que chocasen con algo. En las raras ocasiones que esto ocurre—que un neutrino se estampe frontalmente contra un núcleo atómico—se

produce una fina lluvia de partículas secundarias. Si los choques ocurriesen en medios transparentes, pensaban, esta lluvia de esquivas subatómicas emitiría al moverse una tenue luz azul llamada radiación Cherenkov, un destello azulado que podría detectarse con sensores de luz. Para tejer la trampa al neutrino se necesitaría entonces un medio increíblemente transparente en el que esparcir sensores ópticos y, para aumentar la probabilidad de que chocasen, que este medio fuera enorme, gigantesco, de un kilómetro cúbico. Construir un kilómetro cúbico de algo es imposible. Afortunadamente, la naturaleza había resuelto esta parte hace miles de años: los océanos, en su vastedad azul, y la enorme capa de hielo que cubre la Antártida podrían atrapar algunos de los neutrinos que chocasen contra sus núcleos de agua.

El primero que lo intentó fue el proyecto DUMAND, a finales de los 70. Un grupo de físicos de las universidades de Hawái y Seattle pasó varios años sumergiendo detectores ópticos a unos 4.500 metros de profundidad en el Océano Pacífico, frente a la costa de Hawái.

El proyecto fracasó. AMANDA lo intentaría en el hielo.

CARLOS POBES

Al terminar la conferencia, Pérez de los Heros no sabía aún que pasaría cuatro veranos australes haciendo agujeros y soldando cables en la Antártida como parte de AMANDA, pero dos años después, en la nochevieja de 1999, tomaría las uvas en el Polo Sur. Era su segunda campaña antártica.

“En aquella época era totalmente loco ir allí a hacer agujeros y poner sensores ópticos”, cuenta Pérez de los Heros. “Trabajar allí es duro, más que por el frío, por la altura. Aunque son 3.000 metros, la atmósfera es más fina de lo normal y la sensación de altura mayor. Además, el clima es extremadamente seco. Supongo que los montañeros estarán acostumbrados, yo no lo estaba”. Pérez de los Heros fue el primer español en AMANDA/IceCube aunque siempre afiliado al departamento de Física y Astronomía en la Universidad de Uppsala, donde actualmente también enseña. Lleva 24 años unido a este proyecto y lo ha visto todo: desde el diseño y concepción de AMANDA hasta la construcción de IceCube y sus resultados. También ha dirigido su grupo de búsqueda de materia oscura.

AMANDA se convertiría en el prototipo de IceCube: ambos utilizan la misma tecnología, enterrar sensores en el hielo, aunque IceCube es mucho más grande, tiene más sensores y a mayor profundidad. Durante los meses en la Antártida, Pérez de los Heros y el resto del equipo pasaron turnos de 15 o 20 horas al día en medio de la enorme extensión blanca de hielo sin ninguna protección frente al viento. Solos, junto a una torre de perforación y el agujero. La temperatura en el verano antártico es bastante estable: oscila entre los 30 y 40 grados Celsius bajo cero, aunque durante una tormenta llegaron a -60 . A menudo tenían que quitarse los guan-



Carlos Pobes, a la izquierda, con un compañero en el punto que marca el Polo Sur geográfico.

tes para hacer conexiones entre los módulos ópticos y los cables.

Primer fracaso

En un principio, AMANDA no funcionó como se esperaba. “Los detectores sobrevivieron a estar *enterrados* a esa profundidad, pero nadie sabía si el hielo de la Antártida era transparente; nadie había bajado a esas profundidades”, explica Pérez de los Heros. Lo primero que hicieron fue colocar cuatro cables con 80 sensores ópticos a una profundidad entre 800 y 1000 metros, el prototipo AMANDA-A. No funcionó, porque a esa profundidad el hielo antártico aún está lleno de burbujas de aire y la luz que se quiere detectar no se propaga. “Es como meter el detector en leche”. Había que bajar más profundo para que la presión del hielo eliminara las burbujas.

“Yo esto siempre lo intento mirar desde el punto de vista de la National Science Foundation (NSF), que a estas alturas ya tenía dos proyectos de detectores de neutrinos que habían fracasado: el de Hawái y el primer intento en la Antártida. Aun así, Francis Halzen, el investigador principal americano, consiguió convencerles de que había que ir más profundo y que a esa profundidad el hielo ya sería transparente”, explica.

Se perforaron entonces 19 agujeros más hasta casi los dos kilómetros de profundidad, en los que se descolgaron 677 módulos ópticos. Funcionó, es decir, demostró que a esa profundidad el hielo era suficientemente transparente y de calidad —de hecho, uno de los *papers* más citados de este proyecto fue publicado en una revista de geología sobre la medida de las propiedades ópticas del hielo: nadie las había medido

La noche más larga

A Carlos Pobes, físico de partículas, siempre le gustó el frío. “Cuando llega el invierno no sé qué tiene, que te hace ilusión. No me gusta pasar frío, ojo. Me gusta el frío para estar abrigado”. Con esa ilusión de niño llegó en 2011 a la Antártida para pasar un año cuidando IceCube. Los llaman *winter overs* porque el invierno allí dura desde febrero hasta septiembre, seis meses de oscuridad total. Recuerda mirar las pantallas y ver 70 grados bajo cero. “Era fantástico”. Pero ni así dejó de salir a correr fuera. Pobes es el tercer español que ha pasado la noche en la base Amundsen-Scott.

Cuidar de IceCube supone mantenerle operativo el mayor tiempo posible. “Los neutrinos están llegando las 24 horas del día y tenemos que garantizar que el tiempo vivo, el que el instrumento está funcionando, sea del 99%. El 1% son paradas rutinarias, calibraciones, fallos del sistema si se cae la tensión... En fin, resolver cualquier incidencia y hacer las labores de mantenimiento habituales”, explica.

Allí, Pobes empezó a escribir un blog, El día más largo de mi vida, en el que filosofaba sobre su experiencia, pero también sobre ciencia. “Tratar con entidades que están tan alejadas de nuestra experiencia diaria te invita a reflexionar. Para entender realmente lo que es un neutrino necesitas también reflexionar sobre el proceso de entender y sobre el concepto de realidad... Adentrarnos en el mundo subatómico es como volver a ser niños, volver a nombrar cosas que están escapando a nuestros sentidos”.

“A la vuelta pensaba que la experiencia me iba a dejar esa huella de soñar con ello y no. Quizás lo más raro es que todo volvía a ser muy normal. Me costó meses, incluso años, soñar que estoy ahí. Pero no suelo soñar con la Antártida”.

a esas profundidades—. Pero también había malas noticias: aunque los detectores funcionaban y detectaban neutrinos, no eran los que se buscaban, aquellos producidos fuera del sistema solar y cargados de muchísima energía.

“Sin embargo, en física un resultado negativo también es interesante a veces. Lo que AMANDA estableció es que el flujo de neutrinos cósmicos era menor que cierto nivel y que entonces se necesitaba un detector más grande. O esperabas muchos años con AMANDA o construías algo mayor para incrementar la probabilidad de detectar los neutrinos. Ahí nació la idea de IceCube. Se han ido mejorando cosas, pero la tecnología es la misma”, explica el físico español.

Y llegó IceCube, el telescopio de neutrinos más grande del mundo, la ventana al universo que se esconde. El deber del poeta. IceCube ocupa un kilómetro cúbico de hielo antártico con 86 cables enterrados a profundidades de entre 1.400 y 2.450 metros. La primera columna de hielo tardó 57 horas en perforarse, con el resto se consiguió rebajarlo a un promedio de 48. Comenzó a construirse en 2004 y tardó siete años en completarse, sin gastar un dólar más del que estaba presupuestado: 279 millones, 242 de los cuales los aportó la NSF. Como AMANDA, cuyos restos duermen inmóviles bajo el hielo, el telescopio de neutrinos IceCube está a un kilómetro de la base estadounidense Amundsen-Scott.

De sus 86 cables cuelgan como guirnaldas 5.160 módulos ópticos digitales o DOMs, el auténtico corazón de Ice Cube. Una vez perforados los agujeros en el hielo, los cables con los sensores tienen que descolgarse de forma ininterrumpida porque para perforar se usa agua caliente que ya no se retira, se congela y hay que dejarlo todo colocado antes de que ocurra. Cuando los detectores quedan enterrados en el hielo no existe forma física de acceder a ellos.

Estos funcionan al revés que una bombilla de casa: en lugar de encenderse al apretar el interruptor de electricidad, cuando la luz de Cherenkov incide contra uno de ellos se ilumina y convierte la señal lumínica en una señal eléctrica que se digitaliza y se manda a través del cable hasta los ordenadores del laboratorio de la superficie. A partir de la hora de llegada y el brillo del destello en cada detector, los investigadores pueden calcular la energía y la dirección de la que procede un neutrino: si su fuente está cerca o habita en el espacio profundo. IceCube manda estos datos por satélite desde el Polo Sur a la Universidad de Madison, en el hemisferio norte, para que lo estudien los científicos de la llamada IceCube collaboration, unos 300 a fecha del verano pasado, de 53 instituciones, ninguna española. Cuando detecta el impacto de un neutrino de alta energía también envía una alerta a la red AMON, de observatorios multimensajeros de astrofísica, de la que también forma parte el observatorio de rayos gamma HAWC, en la ladera del volcán Sierra Negra, en México y el telescopio de rayos gamma Magic, en la isla de La Palma.

Bingo

IceCube lleva diez años operando de forma completa, helado y en soledad. Paciente. Se construyó con dos objetivos básicos: demostrar que a la Tierra llegan neutrinos de muy alta energía desde fue-



Cabezal de la perforadora que horada en el hielo. Abajo: portada de la revista Science dedicada a IceCube.

ra de nuestra galaxia y tratar de identificar algunas de sus fuentes.

En 2013 la revista Science publicó en su portada una foto de IceCube: había detectado el primer flujo de neutrinos de alta energía procedente de fuera de nuestro Sistema Solar observado, lo que demostraba que el universo emite neutrinos igual que emite luz. “Ahora sabemos que el universo brilla en neutrinos; más que en luz visible o en rayos gamma... Al principio se detectaron dos neutrinos y ahora tenemos ciento y pico. Se detectan unos diez al año, pero cuando detectamos uno es que el flujo es realmente muy alto”, explica Pérez de los Heros.

Cuatro años después, en 2017, IceCube detectó un solitario neutrino que logró asociar al blazar TXS0506+056, un



agujero negro supermasivo en el centro de una galaxia a 6.000 millones de años luz. Aunque un solo neutrino pueda pa-

recer muy poco, que se detectase uno quiere decir que pasaron varios millones. Habían transcurrido 21 años desde que se enterrara el primer cable bajo el hielo, casi 50 desde que se empezara a pensar en ello.

En 2019 la NSF aprobó una ampliación de IceCube con la que alcanzaría un volumen de ocho kilómetros cúbicos, un auténtico gigante encerrado en hielo. Su construcción, que plantea instalar 120 cables adicionales equipados con miles de nuevos y más sofisticados sensores de luz, comenzaría en la campaña polar 2022-23 y multiplicaría por diez su tasa de detección de neutrinos cósmicos. Le han llamado Ice Cube Gen 2: la ventana al Universo Extremo.

“Este es un campo en el que uno necesita paciencia y perseverancia. Es jugar a largo plazo. Ahora, cuando encuentras algo, es un descubrimiento fundamental, es la primera vez que se consigue eso. Si quieres te hago una predicción: a IceCube le caerá un premio Nobel tarde o temprano. Es un experimento de categoría Nobel con resultados nuevos. Hemos detectado una nueva forma de ver el universo con neutrinos. Lo ganará”.

Y, como cada año, llegará octubre y empezarán las apuestas para ver qué descubrimiento de la ciencia recibe el premio, el gran premio. “Todos los años, por esos días, un fantasma inquieta a los escritores grandes: el Premio Nobel”, escribió García Márquez. Como prueban los neutrinos, los fantasmas no son solo asunto de poetas. Para el astrofísico John Bahcall, quien no recibió el premio de 2002 por sus trabajos sobre neutrinos solares: “Si usted puede medir algo con suficiente precisión, tiene la posibilidad de descubrir algo importante. La historia de la astronomía demuestra que muy probablemente lo que usted descubra no será lo que estaba buscando. La suerte ayuda.”

Tras el genoma y el proteoma, la biología aborda el estudio de las interacciones moleculares

Interactoma, la red social de las proteínas

Si hace 20 años, el Proyecto Genoma Humano anunció la secuencia completa de nuestro ADN, hoy la ciencia ha ido más allá. De él se ha obtenido un mapa aún más complejo, el atlas que desvela cómo todas nuestras proteínas se relacionan dentro de la célula. Es lo que se conoce como interactoma, y abre las puertas al estudio de enfermedades y terapias de una forma distinta. Acelerará sus avances, los de la bio y la nanotecnología, los de la biología del desarrollo y los estudios sobre la evolución. Sus resultados se comparten en una inmensa base de datos que condensa el saber de décadas de investigación.

■ Texto: **Mar de Miguel** | Periodista científica ■

En septiembre de 2011, la Universidad de la Ciudad de Ho Chi Minh (antigua Saigón, en Vietnam) presentó un puzzle de 551.232 piezas que formaban una enorme flor de loto. Para completarlo, colaboraron 1.600 estu-

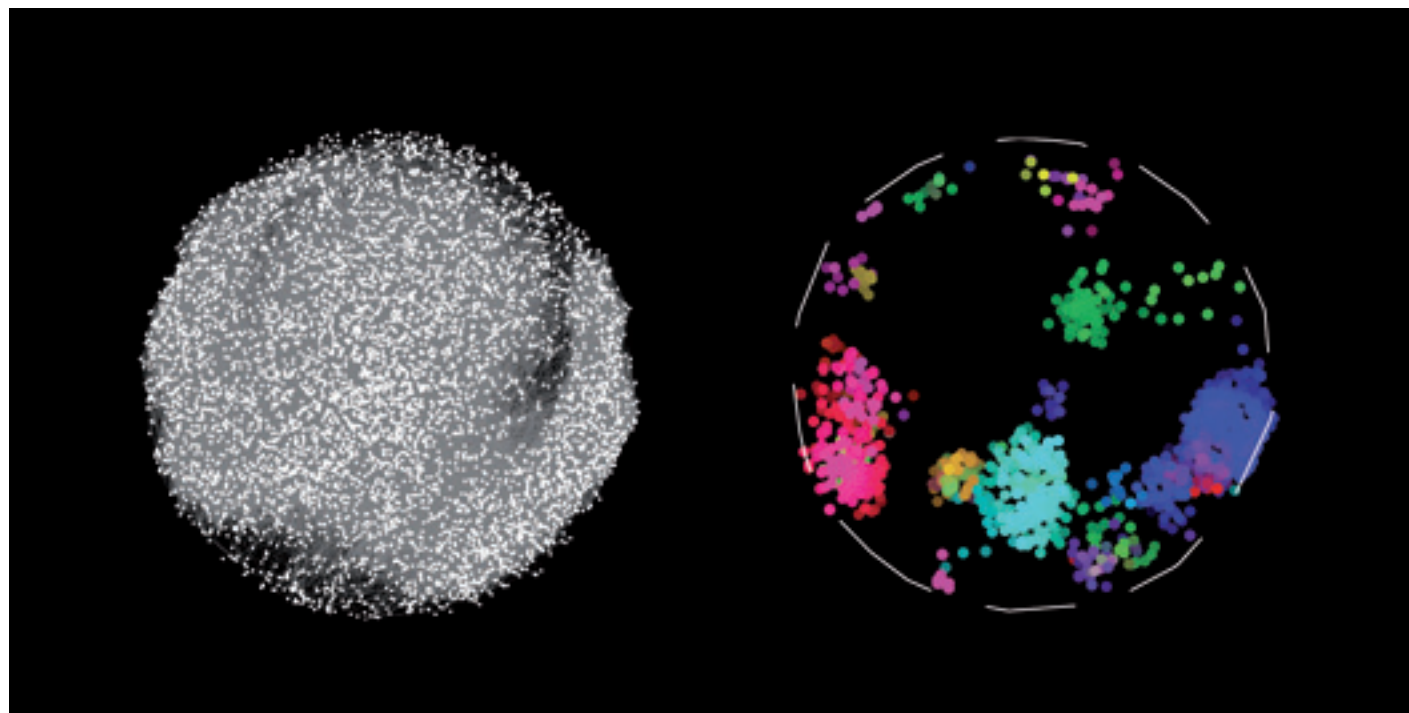
diantes que emplearon 17 horas. Hay que reconocer que reordenar cada trocito de una imagen fragmentada tantas veces resulta laborioso. Sin embargo, partieron de un molde conocido, reconstruido con piezas únicas que pu-

dieron ver, tocar y encajar en una posición concreta. Cuando los científicos hacen esto mismo, pero descienden a nivel molecular, la cosa se complica.

El 15 de febrero de 2001, hace 20 años, las revistas *Nature* y *Science* publicaron el primer borrador de nuestro genoma. El ensamblaje completo de las piezas de nuestro ADN llegó el 24 de abril de 2003, justo a tiempo para celebrar el 50 aniversario de la publicación de su estructura, descubierta por James Watson y Francis Crick.

Los investigadores del Proyecto Genoma Humano, liderado por los Institutos Nacionales de Salud de EEUU (NIH, por sus siglas en inglés) junto a 20 instituciones de siete países distintos, tardaron 13 años en completar este rompecabezas genético. A ciegas y sin un modelo previo en el que fijarse, anotaron y acoplaron ordenadamente los 3.200 millones de pares de bases de nuestros 23 pares de cromosomas.

La historia se repite ahora, de la mano del Instituto del Cáncer Dana-Farber de Boston y la Universidad de



Mapa de interacción de 17.500 proteínas humanas (izquierda) y esquema de proteínas similares agrupadas por colores (derecha).

KATJA LUCK ET AL. / NATURE 580

Las bibliotecas del chat

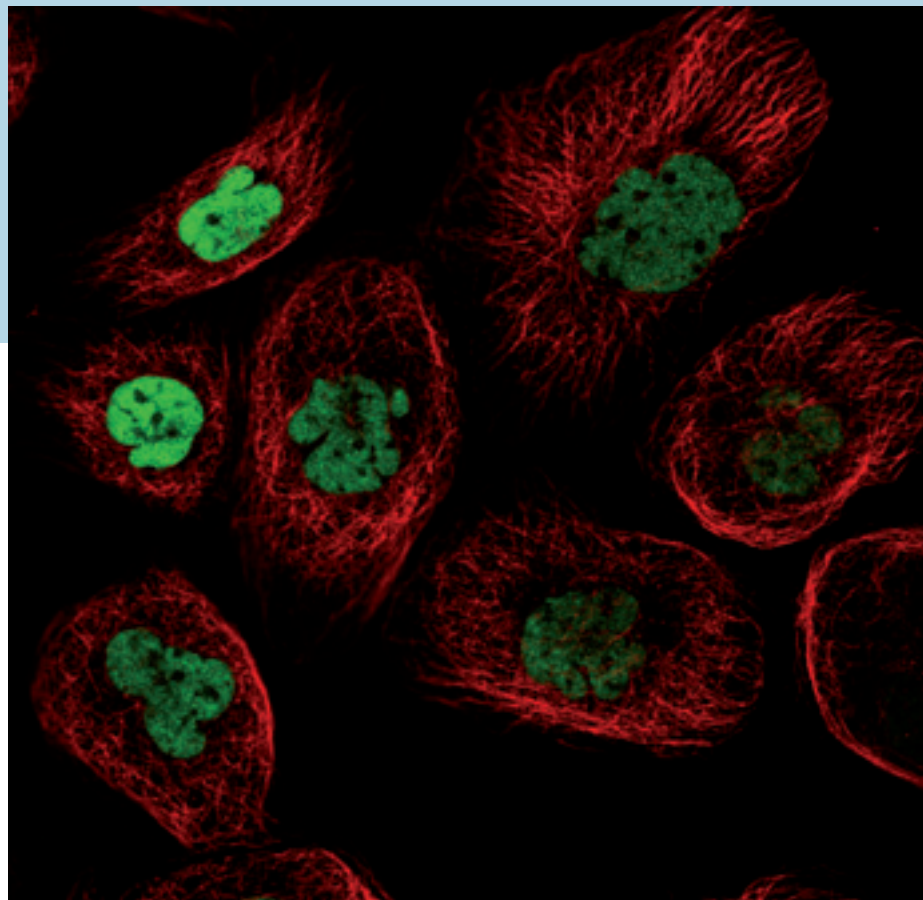
Las interacciones moleculares también se obtienen de manera individual cuando se estudian procesos concretos. Tras décadas de investigación, son miles las descritas en la bibliografía y existen bases de datos que las recogen todas. A través de internet, investigadores de todo el mundo acceden para consultarlas. Estas bases de datos están entrelazadas entre sí, maximizando las respuestas a cada pregunta.

Una de estas bases, UniProt (uniprot.org), contiene las secuencias de proteínas obtenidas de resultados experimentales. A través de ella, también se puede consultar su estructura tridimensional, función, localización en la célula, interacciones o las publicaciones en las que aparece. Entre otras, está enlazada al banco de

Localización de la proteína p53 en el núcleo de la célula (verde).

Harvard (EE. UU.) con el aún más complejo proyecto del Interactoma Humano. Ya no se trata sólo de saber quién es quién o dónde está, sino de entender sus relaciones. Quién habla, quién escucha, a quién se dice qué, quién impide la comunicación de un grupo o quién la favorece e invita a otros a la reunión. Los protagonistas son las proteínas. Las salas para sus contactos son las células y sus compartimentos. El gran congreso proteico tiene lugar en el cuerpo humano.

“Hemos mapeado el interactoma humano de interacciones moleculares entre proteínas. También existen mapas de asociación genética, que recogen las interacciones entre los genes”, señala Javier De Las Rivas, coautor del trabajo y director del Grupo de Investigación en Bioinformática y Genómica Funcional del Centro de Investigación del Cáncer (CSIC y Universidad de Salamanca). El estudio, publicado en la revista *Nature*, está dirigido por Marc Vidal, director del Instituto del Cáncer Dana-Farber de



THE HUMAN PROTEIN ATLAS

datos de proteínas RCSB (rcsb.org) y al portal de publicaciones PubMed.

Mantener y actualizar UniProt no es sencillo: “UniProt tiene un equipo que verifica la literatura más reciente. Esta tarea parece inmensa, con más de un millón de artículos que aparecen cada año indexados en PubMed. Sin embargo, solo el 10 % de esos artículos son directamente relevantes para las proteínas”, detalla Alex Bateman, jefe de Recursos de Secuencia de Proteínas del Instituto Europeo de Bioinformática (EMBL-EBI) en Cambridge, Reino Unido. Según dice, revisan unas 60.000 publicaciones anuales.

Boston y catedrático de Genética de la Escuela de Medicina Harvard, en colaboración con otros 30 grupos de investigación de nueve países.

Un proyecto colosal

Para obtener el interactoma humano, primero clonaron los 20.000 genes que generan todas las proteínas de nuestra especie. De ellos, obtuvieron con éxito

17.500 proteínas. Este trabajo formó parte de un proyecto anterior llamado ORFeoma. Aunque existen ORFeomas de bacterias, el laboratorio de Vidal en Boston es el único en el mundo que lo desarrolló en humanos.

Una vez conseguidas las 17.500 proteínas, para saber cuáles de ellas interaccionan, estudiaron el modo en que se acoplan. Las proteínas están formadas

Las proteínas más consultadas en UniProt son CYC5, TP53 (la proteína supresora de tumores p53 implicada en la reparación del ADN), E2F8, HLA-A, SGA56M (un antígeno asociado al cáncer de mama) o ESR1 (un receptor de estrógeno). “La comunidad científica centra la mayor parte de sus esfuerzos en una fracción relativamente pequeña de proteínas conocidas. Lamentablemente, no se caracterizan apenas proteínas verdaderamente desconocidas”, subraya Bateman. Sin embargo, debido a la situación de pandemia de covid-19 y la intensa investigación para combatirla, UniProt actualiza periódicamente todas las proteínas humanas relevantes. Bateman indica que existen “más de 1.400 artículos que mencionan covid-19 y UniProt”.

La Universidad de Salamanca dispone de una base de datos que recoge la interacción de proteínas obtenida de forma experimental de casi 20.000 publicaciones científicas de los últimos 30 años. Este recurso se ha ampliado para crear la metabase de datos APID (apid.dep.usal.es), siglas de *Agile Protein Interactomes DataServer*. También está enlazada a las anteriores, y a través de ella se puede seguir

la pista de todas las proteínas con las que interactúa la que se introduzca para su consulta.

Los datos de APID (basados en la experimentación) pueden servir para validar el interactoma humano recién obtenido si se cruzan con su base de datos HuRI (interactomeatlas.org), que a su vez enlaza con la del ORFeoma humano (horfdb.dfci.harvard.edu).

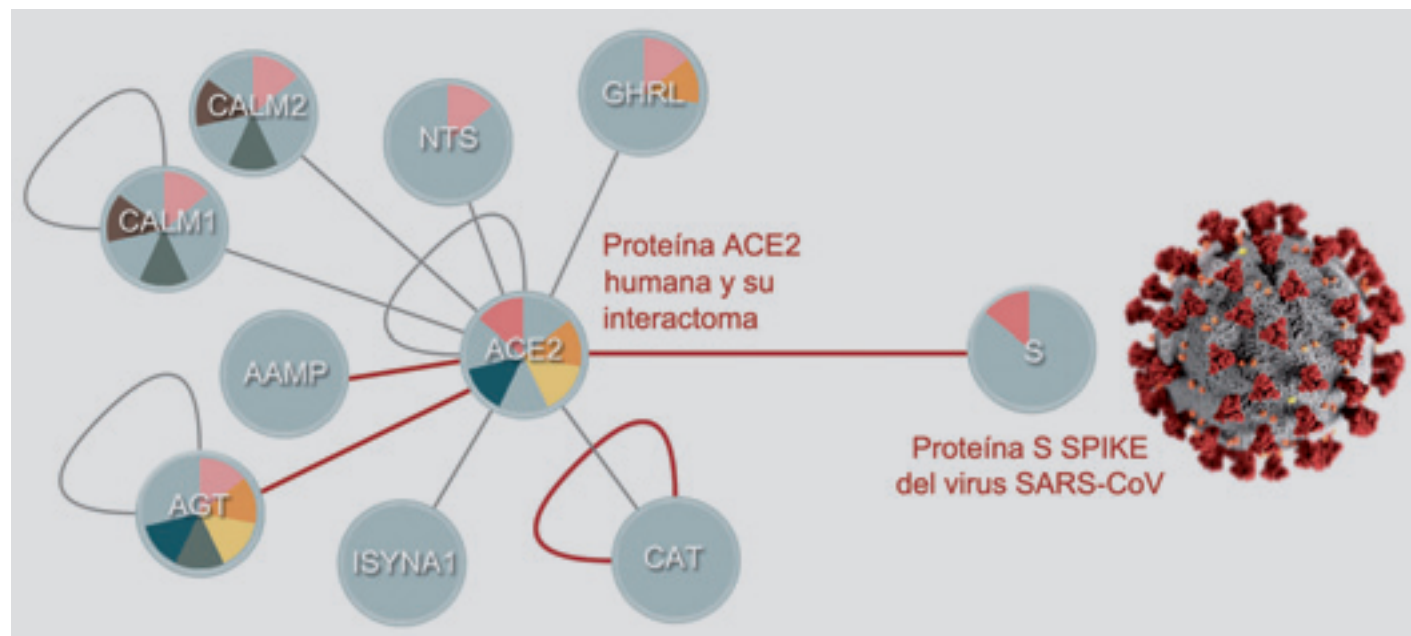
Los expertos describen estas bases de datos de interacciones moleculares como una inmensa red social en la que las proteínas desvelan sus conexiones. “Cualquier persona que trabaje con un conjunto de proteínas puede hacer una consulta sobre una de ellas y preguntar quiénes son sus amigos, como ocurre en la galaxia de interacciones de personas en Facebook”, dice De Las Rivas. Y si tienes un *Facebook* de proteínas y ves con quién interactúa una, podrías conocer su función. “Si yo tengo una proteína de la cual sé muy poco y ocho proteínas con las que interactúa están relacionadas con oncogenes, puede que mi proteína tenga que ver con el cáncer, cosa que a priori no sé”, añade. ▶

por cadenas de aminoácidos plegadas que se unen entre sí y se repliegan aún más. El resultado es una estructura tridimensional que deja un espacio de unión a otras proteínas. Dos proteínas distintas que interactúan se unen por

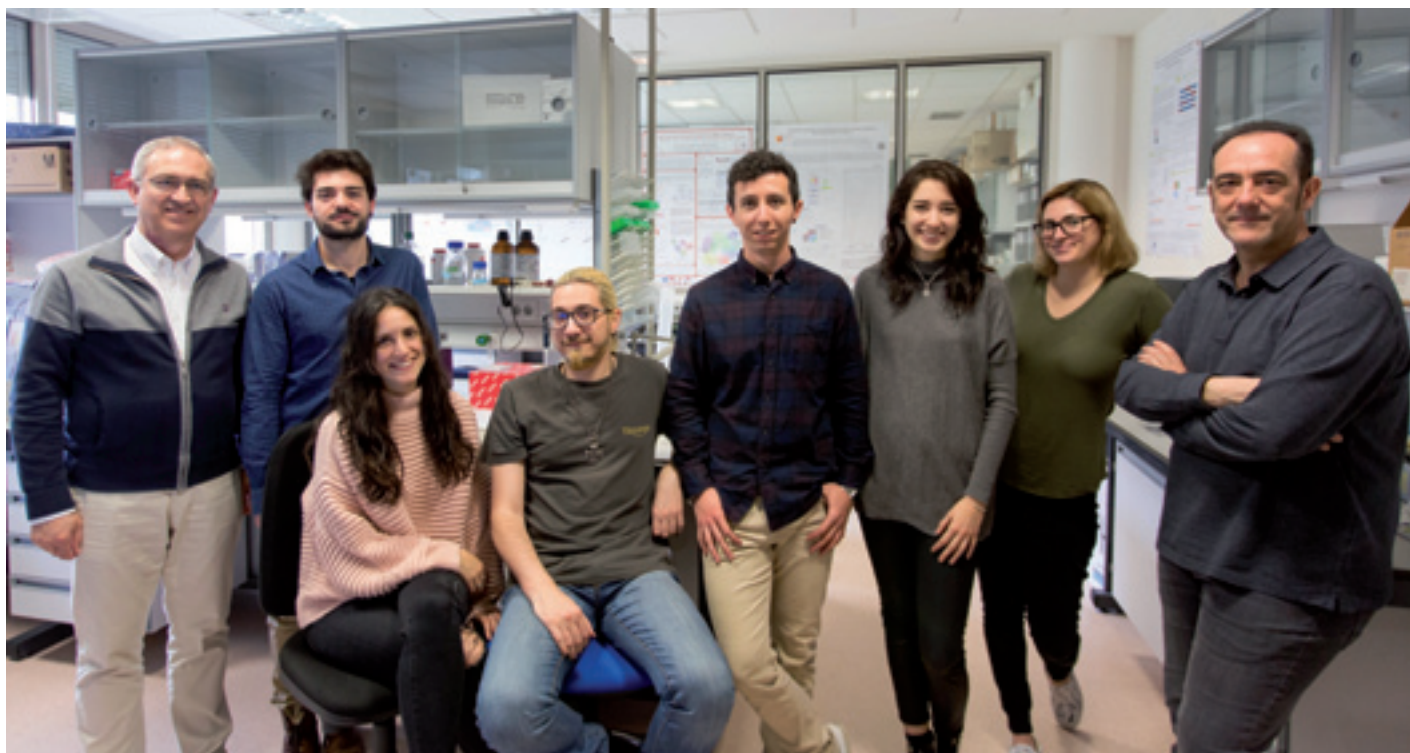
estos puntos, como se observa mediante microscopía electrónica de muy alta resolución y modelos 3D.

Para lograr el interactoma de las 17.500 proteínas, aplicaron la tecnología de interacción molecular de doble híbri-

do. La técnica consiste en medir las interacciones entre pares de proteínas. Para ello, realizaron millones de experimentos binarios. Con ellos probaron si una proteína conectaba con otra, después con una tercera y así hasta 17.500 veces.



Interacción del receptor ACE2 humano con la proteína S del SARS-Cov-2.



Grupo de investigación de Javier De Las Rivas.

Pero si obtener proteínas es complejo, asegurar que las interacciones positivas realmente lo son dispara el número de experimentos. “Las interacciones binarias de dos proteínas (una proteína A contra una proteína B y la B contra la A) se testan tres veces”, explica De Las Rivas. Esto supone seis experimentos por interacción para 17.500 proteínas, es decir, un número colosal de pruebas, que además aplicaron con tres técnicas distintas. “Hemos testado 153 millones de interacciones”, añade. De todas ellas, sólo 53.000 fueron positivas.

Cabe preguntarse a cuánto asciende la factura de un trabajo de esta envergadura. Han sido varios millones de dólares, financiados por el NIH estadounidense y por las entidades científicas que han colaborado, añadiendo los fondos de 15 proyectos y becas.

Interactomas contra la covid-19

Las interacciones de proteínas humanas no son las únicas descritas. También existen interactomas de bacterias,

virus y de varios modelos animales. Las bases de datos de diferentes especies se consultan cuando no se conoce la función de una proteína o su interacción con otras moléculas, lo que abre el abanico a estudios evolutivos de carácter molecular. Además, el universo de las interacciones de moléculas puede aumentar su rango. Si no solo contemplamos relaciones binarias sino que vemos cómo se comporta un grupo de proteínas, construiríamos una red multidimensional compleja. Ésta no se queda en lo que pasa en el interior de una célula, sino que desengrana la maquinaria de todo un organismo.

Los interactomas no han hecho más que empezar y aumentarán en un futuro porque nos ayudarán a combatir distintas enfermedades. Un buen ejemplo de ello es el interactoma del SARS-CoV-2, el virus causante de la pandemia que asola el mundo actualmente. Apenas un año después de su aparición, se ha propagado por 192 países y se ha cobrado la vida de dos mi-

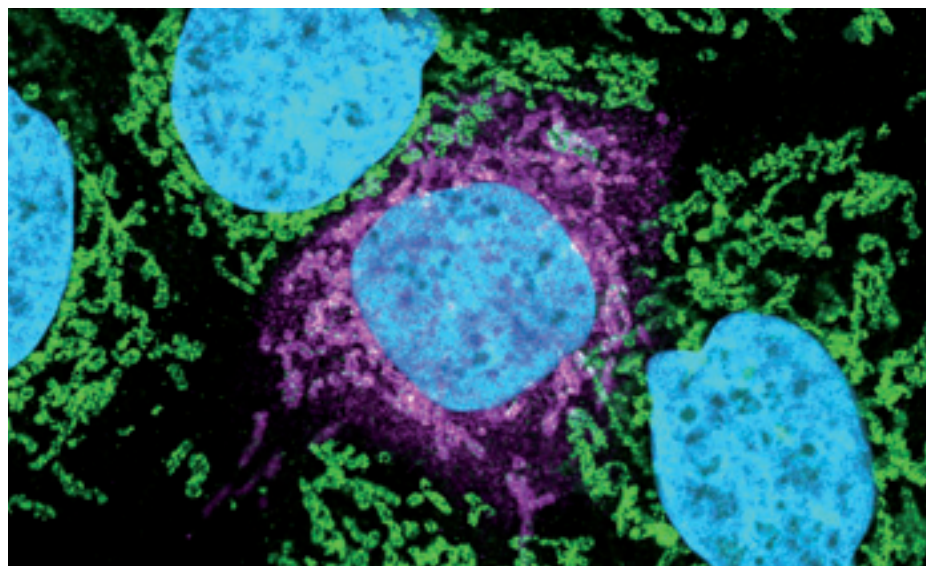
llones y medio de personas. Laboratorios y farmacéuticas, como Pfizer, Moderna o AstraZeneca, disponen de vacunas prometedoras que ya se aplican en varias regiones del mundo, al mismo tiempo que el virus desarrolla mutaciones capaces de escapar de ellas.

El reto está en alcanzar a tiempo la inmunización de un 70 % de la población mundial, como indica la Organización Mundial de la Salud (OMS), para detener contagios y muertes. Por otro lado, se avanza en el tratamiento de la sintomatología, pero aún no disponemos de un fármaco que elimine las partículas víricas de nuestro organismo, tal como un antibiótico lo haría ante una infección bacteriana. La clave del éxito está en conocer el virus a fondo, en identificar las piezas de su rompecabezas genético y proteico, en entender su funcionamiento para desarmarlo.

En eso trabaja el virólogo español Adolfo García-Sastre, catedrático de Microbiología y director del Instituto de Salud Global y Patógenos Emergentes



Adolfo García-Sastre.



Interacción de la proteína humana Tom70 (verde), y Orf9b viral (rojo) en el colón.

de la Escuela de Medicina Icahn en Mount Sinai, Nueva York (EEUU). Él y sus colaboradores de la Universidad de California en San Francisco (EEUU), del Instituto Pasteur (Francia) y otros 30 laboratorios estadounidenses y de Reino Unido, han publicado en la revista *Nature* el mapa de interacción de las proteínas del virus SARS-CoV-2 con las

proteínas humanas. “Espero que este mapa sirva para acelerar los estudios sobre la biología del SARS-CoV-2”, dice García-Sastre.

Su objetivo es encontrar candidatos a fármacos, moléculas que nos ayuden a erradicar el virus, su tratamiento o el control de la pandemia. En el interactoma recién descrito ya destaca

CLAUDIA PAUL PHOTO

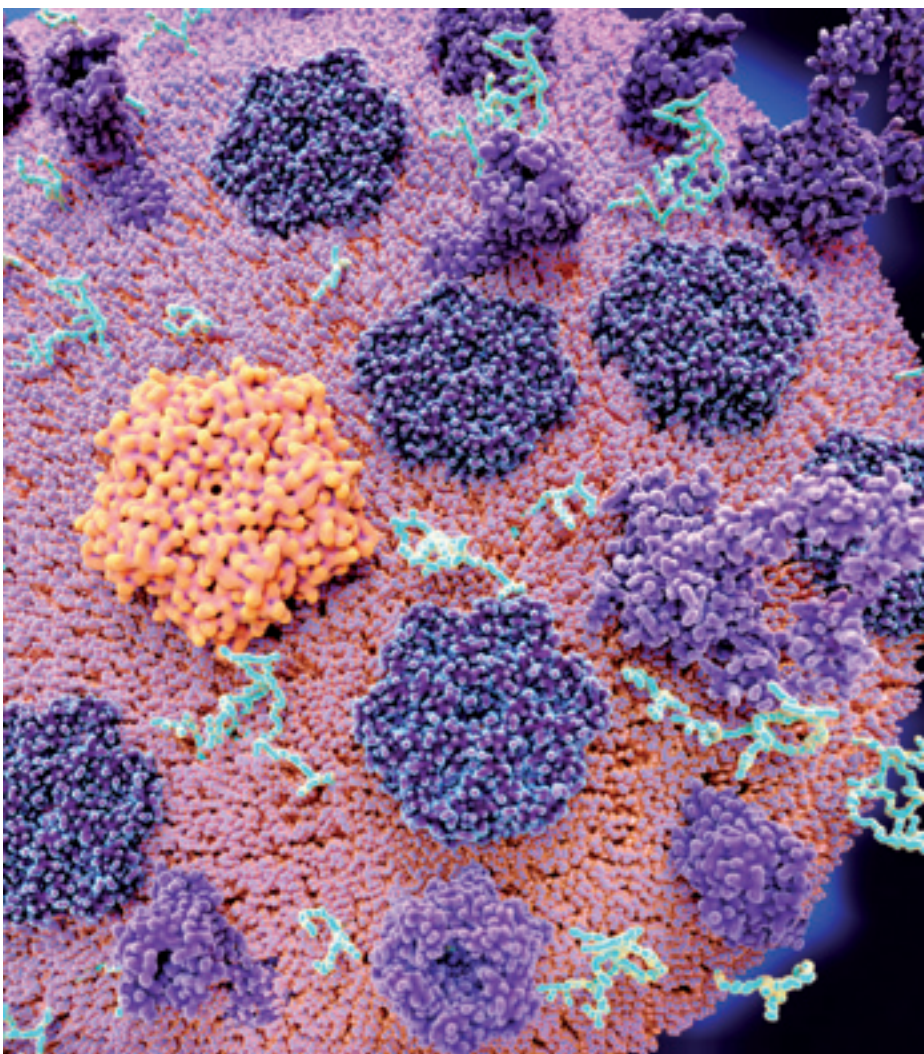
uno, la plitidepsina, un potente antiviral que bloquea la proteína eEF1A del huésped, lo que impide la replicación del SARS-CoV-2 en el organismo. Lo publica el científico burgalés en otro artículo de *Science* tras un ensayo preclínico en ratones.

“Es un inhibidor muy potente. Pero se necesita administrar de modo intravenoso, lo cual limita su uso si se demuestra que funciona en pacientes. Lo ideal sería un medicamento oral”, comenta García-Sastre. Este medicamento, desarrollado para otros usos por la farmacéutica española PharmaMar, se prueba en ensayos clínicos contra la covid-19. Se conoce como Aplidin, ya que procede de la ascidia *Aplidium albicans*, el animal marino que le da nombre.

Gracias al interactoma del SARS-CoV-2 en células humanas, los científicos fijan la mirada en fármacos que ya existían. La ventaja es clara. De funcionar contra el coronavirus servirían de atajo, pues no parten de cero en su estudio y algunos ya están aprobados por distintas agencias de medicamentos. En esta revisión, García-Sastre y sus colegas agrupan los fármacos en dos tipos, los que inhiben la traducción de ARNm y los que están relacionados con los receptores sigma-1 y sigma-2 del retículo endoplasmático de las células del huésped: “Nos hemos centrado en los inhibidores de la traducción de ARNm, como la plitidepsina. Pero también estamos trabajando en paralelo con los reguladores de receptores sigma. Aún no tenemos un buen candidato clínico, pero no los hemos descartado todavía”, destaca el virólogo.

Con respecto a esto, un estudio preliminar publicado en *JAMA*, la revista de la Asociación Médica de Estados Unidos, hace hincapié en la propuesta de la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington en San Luis (EE. UU.). Este equipo sugiere el uso del antidepresivo fluvoxamina para evitar las infecciones

SVENJA ULFERTS, UNIVERSITY OF FREIBURG, SPENCER PHILLIPS, EMBL-EBI



Membrana de la célula con receptores y canales.

graves de covid-19 y minimizar los ingresos hospitalarios. El compuesto tiene una alta afinidad por el receptor sigma-1 y aumenta los niveles de serotonina en el cerebro, por lo que se utiliza para el tratamiento de la depresión o del trastorno obsesivo-compulsivo (TOC). En nuestro país, la fluvoxamina está aprobada por la Agencia Española del Medicamento bajo varios nombres comerciales.

Dianas terapéuticas para eliminar el virus

“Si te conoces a ti mismo, pero no al enemigo, por cada victoria que ganes también sufrirás una derrota”. La cita es de *El Arte de la Guerra*, del militar de la china antigua Sun Tzu. Aplicado al virus cau-

sante de la covid-19, desconocido hasta ahora, la comunidad científica se esfuerza en entender cómo infecta y evitar la enfermedad aislándolo, secuenciándolo y analizando sus proteínas e interacciones.

El SARS-CoV-2 es un patógeno esférico de entre 50 y 140 nanómetros de diámetro. Su estructura es sencilla. Consta de tres capas, una nucleocápside central con material genético y proteínas N, y una envoltura lipoproteica (con proteínas E y M) sobre la que se asienta una corona de espículas (o proteínas S). Su genoma (ARN+) tiene 29.891 nucleótidos con los que genera 9.860 aminoácidos y 27 proteínas.

Para la infección, las proteínas de la corona entran en contacto con la célula

del huésped. Por eso, la interacción más estudiada es la de la proteína S viral y el receptor ACE2 de las células humanas, la llave de entrada del virus. Todas las vacunas se centran en esa proteína S, para que nuestro organismo la reconozca y generemos inmunidad.

Sin embargo, el virus muta y las vacunas pueden quedar obsoletas. De ahí la importancia de conocer el interactoma humano, el del SARS-CoV-2 o el de otros virus emparentados que den pistas sobre el funcionamiento de sus proteínas. En otro trabajo de la revista *Science*, García-Sastre e investigadores de 44 laboratorios de cinco países amplían el interactoma del SARSCoV-2 en células humanas y aportan los interactomas del SARSCoV-1 y del MERS-CoV en el huésped.

Este estudio destaca la interacción de la proteína del virus ORF9b con nuestra proteína Tom70, una conexión que ocurre de manera similar en SARSCoV-1 y en SARSCoV-2. El trabajo menciona este acoplamiento como posible diana terapéutica. “Tom70 es una proteína mitocondrial y la mitocondria tiene un papel fundamental en la respuesta antiviral innata. Nuestra hipótesis es que ORF9b interacciona con esta proteína mitocondrial para desarmar la defensa antiviral que nos proporciona la mitocondria”, explica García-Sastre.

“Si encontrásemos cómo inhibir esta interacción y, si nuestra hipótesis es correcta, restauraríamos la respuesta celular antiviral, lo que resultaría en la eliminación del virus en nuestro cuerpo”, afirma. El investigador, interesado en la respuesta antiviral innata, destaca otra relación interesante del interactoma, la de las proteínas Nup98 y Orf6, implicada en la forma en la que el virus previene la acción del interferón (responsable de la activación del sistema inmune), como también ha publicado en la revista PNAS.



La protección radiológica hospitalaria en tiempos de pandemia

La situación que hemos vivido el último año a causa de la pandemia por la covid-19 ha sido emocionalmente muy dura y ha supuesto un fuerte impacto en todas las facetas de nuestra vida. En los hospitales se han tenido que tomar medidas para poder enfrentar esta alerta sanitaria sin precedentes. A pesar de todas las dificultades, y después de las primeras semanas de desconcierto, hemos conseguido superar obstáculos y alcanzar una cierta normalidad.

Este artículo se compone de tres partes, en las que se recogen las experiencias del Hospital Universitario 12 de Octubre y del Hospital Clínico San Carlos de Madrid. Se ha intentado hacer un resumen del impacto en la organización de los hospitales y de las medidas adoptadas para seguir con la actividad asistencial manteniendo las medidas de seguridad, tanto para el personal como para los pacientes, basándose en recomendaciones de los organismos y sociedades científicas, y en los procedimientos de los servicios de prevención de riesgos laborales.

En concreto, el artículo describe la situación de los servicios de Oncología Radioterápica y las medidas adoptadas para continuar con las revisiones y tratamientos de pacientes considerados de alto riesgo para la infección por el coronavirus. Además, incluye una descripción de la aplicación de radioterapia de baja dosis para el tratamiento de neumonía por covid-19, en el Hospital Clínico San Carlos.

También se detallan las dificultades que se han encontrado los servicios de Física Médica o Radiofísica para poder aunar la protección radiológica con protocolos de actuación por la covid-19.

Por otro lado, se describe la inspección de puesta en marcha de un acelerador por vía telemática en el Hospital Universitario 12 de Octubre, solución para poder comenzar los tratamientos en pleno estado de alarma.

La clave para la resolución de las dificultades ha estado en la buena coordinación entre los distintos actores implicados, y la implantación de tecnología necesaria para el trabajo con apoyo telemático.





Hospital clínico San Carlos: reorganización de la actividad

■ Texto: **José Miguel Fernández Soto** | Jefe de Servicio en funciones de Física Médica | Hospital Clínico San Carlos | Madrid ■

La pandemia que estamos viviendo ha supuesto un fuerte impacto en todas las facetas de nuestra vida. A continuación revisamos específicamente cual fue el primer impacto de lo que entonces conocíamos como coronavirus de Wuhan (hoy denominado oficialmente SARS-CoV-2) en la práctica de la protección radiológica del Hospital Clínico San Carlos de Madrid, donde el Servicio de Física Médica también actúa como Servicio de Protección Radiológica y que, en muchos aspectos, puede ser considerado representativo o similar del ocasionado en otros centros.

El primer y más destacado aspecto de la primera ola de la pandemia fue la necesidad de una reorganización completa del centro para atender la demanda de atención de pacientes de covid-19, en un ambiente de incertidumbre y desconocimiento de las causas de la infección, de las medidas de protección necesarias y

con escasez de dispositivos de protección individual y de equipamiento en general para abordar la enorme demanda.

Una de las formas inmediatas de cuantificar el impacto en la organización que produjo esta situación es observar el número de camas que el centro dedicaba a cada actividad un día cualquiera inmediatamente antes de comenzar la epidemia (en el mes de enero), y la situación que se alcanzó a primeros de abril:

Como se observa en la Tabla I, el hospital aumentó su capacidad general habilitando todos los espacios disponibles para instalar camas de hospitalización. El aumento de camas generales se hizo físicamente ocupando otras áreas, como las de consultas, y también funcionalmente, en detrimento de las camas destinadas a la actividad quirúrgica. El número de camas de las diferentes UCI (coronarios, pediátricos, etcétera) se

ampliaron con extensión a otras áreas que podían disponer de las condiciones y el equipamiento necesario (unidades de recuperación post anestésica, por ejemplo) y, por tanto, también a costa de la actividad quirúrgica.

Una de las prioridades fue mantener toda la actividad en el Área de Urgencias de pacientes no covid-19, además de toda la actividad posible relacionada con pacientes oncológicos, así como los servicios centrales de soporte (análisis, radiología, etcétera), pero fue necesaria una significativa reducción de las consultas presenciales y la cirugía programada en otras especialidades. Muchos profesionales de otras especialidades (cardiología, oftalmología, etcétera) fueron reasignados para dar soporte a las áreas de hospitalización de pacientes covid-19.

Impacto en la protección radiológica

En las áreas más directamente relacionados con la protección radiológica el impacto fue el siguiente:

- Radioterapia. De manera general se intentó mantener toda la actividad posible, tanto en radioterapia externa como en braquiterapia. Se continuaron todos los tratamientos, aunque algunos pacientes fuesen covid-19 positivos, adoptando las medidas de seguridad biológica en cuanto al uso de equipos de protección individual (EPI) y limpieza de las áreas de tratamiento entre pacientes. En algunos casos, además, las limitaciones temporales de acceso a la cirugía aumentaron las indicaciones de radioterapia.
- Medicina Nuclear. También mantuvo toda su actividad, tanto en la parte de diagnóstico (PET/TC, SPECT/TC, etc.) como en la de terapia (I-131, Lu-177, etc.).
- Radiodiagnóstico. Sufrió una importante transformación ya que por un

Tabla I: Número de camas y dedicación

Fecha	Camas funcionales	Generales	Quirúrgicas	UCI
15 enero	775	365	201	64
6 abril	1061	766	27	101

lado el retraso de las consultas provocó una reducción de parte de la actividad programada que se acompañó de un enorme incremento en la demanda de radiografías con equipos portátiles.

- Radiología y Cardiología Intervencionistas. También tuvieron una reducción en parte de su actividad programada.

En los aspectos de protección radiológica, el mayor impacto se debió a que el seguimiento de la neumonía por covid-19 se realizó casi exclusivamente con radiografía simple que tuvo que ser realizada mayoritariamente con equipos portátiles. Estos tenían que atender las habitaciones de las ocho plantas y dos alas del hospital, además de las UCI, llegando a realizar más de 400 estudios de tórax al día. La tomografía computarizada (TC) que podía aportar una información clínica más completa en la evaluación de la neumonía, se encontró con dos obstáculos: la enorme demanda de estudios y el complicado manejo de los pacientes al tener que trasladarlos desde las zonas de aislamiento a las salas de TC (tanto por el riesgo de contaminación biológica como por la dependencia de muchos pacientes del suministro permanente de oxígeno).

Para poder atender esta demanda de radiografías, hubo que poner en funcionamiento todo el parque de equipos de rayos X portátiles disponible, así como los equipos digitalizadores necesarios para procesar la imagen en aquellos que no disponían de detector digital directo.

Se recuperaron también los equipos de rayos X portátiles fuera de uso, lo que supuso un esfuerzo adicional para el Servicio de Física Médica, ya que se tenía que realizar un control previo a su utilización para garantizar que los parámetros de protección radiológica y control de calidad de los mismos eran correctos. Por otro lado, en cuanto fue posible su

adquisición, se llegaron a poner en marcha hasta siete equipos nuevos de rayos X.

La puesta en marcha de equipos nuevos se vio condicionada por tres aspectos:

- La mayor parte del hospital se encontraba con acceso restringido por aislamiento, lo que impedía que los técnicos de aplicaciones de la casa comercial pudiesen entrar en las zonas de hospitalización a realizar la formación de los técnicos con exploraciones a pacientes.
- Existía una enorme urgencia en su necesidad de puesta en marcha.
- El procedimiento de compra de equipos resultó muy alterado por la fuerte demanda, por lo que hubo que adaptarse a los suministradores disponibles, sin la preparación de las especificaciones técnicas habituales y teniendo que realizar la aceptación de lo que se recibía sin conocimiento previo.

Todo esto obligó a realizar todas las verificaciones de seguridad radiológica y control de calidad correspondientes a las pruebas de aceptación y establecimiento del estado de referencia inicial, en el propio Servicio de Física Médica, habilitando espacios al efecto, y con la máxima agilidad posible, para poner los equipos en uso a la mayor brevedad.

Por otro lado los técnicos del Servicio de Física Médica tuvieron que ser entrenados como formadores en el manejo de los equipos nuevos para poder enseñar a los técnicos del Servicio de Radiodiagnóstico que se encontraban en las zonas de aislamiento, donde el servicio técnico de la casa comercial no podía acceder con agilidad debido a los requisitos de aislamiento.

A pesar de todos los cambios introducidos en los modos y zonas de trabajo, uno de los aspectos positivos fue la ausencia de incidencias en aspectos de protección radiológica, lo que puso de manifiesto que las actividades de

formación en protección radiológica, realizadas con anterioridad y repetidas periódicamente, habían dado sus frutos. A pesar de tener que realizar las exploraciones radiológicas en su mayoría sin blindajes estructurales, las medidas de protección radiológica personal, comenzando por la distancia y terminando por las protecciones personales y móviles, eran usadas de manera rutinaria, a pesar de la complicación adicional que suponía además el uso de los EPI que estaban disponibles.

El hecho de disponer de dosímetros de área pasivos permanentes colocados en todos los equipos móviles, junto con el uso de dosímetros electrónicos, también aportó un plus de seguridad, al poder corroborar que los niveles de radiación, a pesar del aumento de carga de trabajo, se mantuvieron dentro de lo esperable.

La única alteración significativa en materia de dosimetría fue evitar el cambio de dosímetros personales y de área del mes de abril, manteniendo el mismo dosímetro durante los meses de marzo y abril. La principal razón, más allá de que la manipulación de los dosímetros pudiese suponer un vector de contaminación biológica, fue eminentemente operativa: toda la reorganización de actividades del centro fue lógicamente acompañada de una reorganización de los puestos de trabajo, de modo que a finales de marzo habría sido extraordinariamente complicado localizar a cada trabajador para el reemplazo del dosímetro personal, y fue más sencillo avisar que todo el personal debía mantener su dosímetro personal asignado en marzo durante el mes de abril.

En los procedimientos de radiología intervencionista, una práctica habitual de protección radiológica de los trabajadores es que salen de la sala de exploración al puesto de control mientras realizan las series de adquisición de imagen que suponen mayor dosis (sustracción

digital principalmente). Solamente permanecen junto a la mesa de exploración mientras se realiza la fluoroscopia. Esta situación se veía alterada al tener que llevar los EPI cuando atendían a pacientes covid-19, ya que su protocolo de uso no les permitía salir de la sala de exploración con el EPI puesto (aunque fuese por unos segundos). Por ello hubo que instalar una mampara plomada móvil dentro de la propia sala de exploración, donde podían protegerse durante las series de adquisición sin tener que quitarse el EPI para salir de la sala.



Toma de imágenes para la planificación del tratamiento de neumonía por covid.

Radioterapia de baja dosis para el tratamiento de neumonía por covid-19

Como comentábamos al principio, la actividad del servicio de radioterapia se ha mantenido, utilizando los EPI disponibles para manejar a los pacientes oncológicos covid-19 positivos y realizando la oportuna limpieza de superficies entre pacientes.

Adicionalmente, a primeros de abril, en la prensa científica internacional comenzaron a circular comentarios sobre la posibilidad de utilizar la radioterapia

en baja dosis como un posible tratamiento de la neumonía por covid-19¹. El efecto anti-inflamatorio de las bajas dosis de radioterapia, sus indicaciones, dosis y los mecanismos radiobiológicos involucrados eran conocidos desde los años 40 del pasado siglo y habían sido revisados en diferentes trabajos en los últimos años². Incluso se habían publicado trabajos recientes sobre cómo la radioterapia había sido utilizada históricamente para tratar la neumonía y planteando si podría ser útil en la actualidad³. Esto hizo que los servicios de Oncología Radioterápica y de Física Médica plantearan la posibilidad de aplicar esta técnica en nuestro centro.

Dado que esta técnica llevaba sin aplicarse desde finales de los años 40, se optó por la vía de realizar un primer ensayo clínico que evaluase su viabilidad. La situación excepcional en que nos encontrábamos agilizó extraordinariamente los trámites neces-

arios, de manera que se desarrolló el protocolo y se consiguieron las autorizaciones necesarias (Dirección del Hospital, Comité de Ética, Comité de Ensayos Clínicos y Agencia del Medicamento) en aproximadamente 20 días, de manera que el 27 de abril se trataba el primer paciente. El protocolo diseñado, a pesar de ser en una sesión única con una dosis baja (1 Gy), incluye la realización de dosimetría individual a cada paciente al igual que cualquier otro paciente de radioterapia, de manera que la protección radiológica del mismo esté

garantizada. Los resultados preliminares de este ensayo ya se han publicado⁴.

Conclusiones

Disponer de una cultura de seguridad en protección radiológica implantada, con todos los elementos que la componen (especialmente la formación continuada, existencia de protocolos, dosimetría personal y de área, control de calidad de equipos, disponibilidad y uso de medios de protección, etcétera) permite afrontar una situación extraordinaria como esta sin merma significativa en las condiciones de protección radiológica de trabajadores, pacientes y público.

En una situación de emergencia sanitaria como esta, si es necesario establecer prioridades en los momentos más críticos, el orden de priorización debería ser: cuidado clínico del paciente, seguridad biológica de los trabajadores, protección radiológica de los trabajadores y protección radiológica del paciente en último lugar.

Bibliografía

- ¹ Kirkby C, Mackenzie M, Is low dose radiation therapy a potential treatment for covid-19 pneumonia?, *Radiotherapy and Oncology* (2020), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2020.04.004>
- ² Arenas M, Sabater S, Hernandez V, Rovirosa A, Lara PC, Biete A, Panes J. Anti-inflammatory effects of low-dose radiotherapy. Indications, dose, and radiobiological mechanisms involved. *Strahlenther Onkol* (2012), DOI: 10.1007/s00066-012-0170-8
- ³ Calabrese EJ and Dhawan G. How Radiotherapy Eas Historically Usset to Treat Pneumonia: Could It Be Useful Today?, *Yale Journal of Biology and Medicine* (2013) 86: 555-570.
- ⁴ Sanmamed N et al. Low-Dose Radiation Therapy in the Management of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Pneumonia (LOWRAD-Cov19): Preliminary Report. *Int J Radiation Oncol Biol Phys* (2020) (In press) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2020.11.049>



Impacto de la covid-19 en el tratamiento radioterápico del Hospital 12 de Octubre: nuestra experiencia

■ Texto: **Sara Pedraza Fernández** | Servicio de Oncología Radioterápica |
José Pérez-Regadera Gómez | Jefe de Servicio Oncología Radioterápica | Hospital
 Universitario 12 de Octubre | Madrid ■

El Servicio de Oncología Radioterápica del Hospital Universitario 12 de Octubre cuenta con tres aceleradores lineales de última generación, dos radioquirófanos y planta de hospitalización propia. Ofrece una amplia cartera de servicios, incluyendo técnicas de radioterapia volumétrica de intensidad modulada, radiocirugía, radioterapia estereotáxica corporal y braquiterapia de alta y baja tasa de dosis. El servicio atiende a población adulta y pediátrica en un entorno de 1.100.000 habitantes. En 2019 se valoraron 2.138 enfermos nuevos y en 2020 fueron 2.110 en total. Mantener el funcionamiento del servicio con las máximas garantías para los pacientes y trabajadores ha supuesto un reto dada la situación provocada por el coronavirus SARS-CoV-2.

La población oncológica es considerada de alto riesgo para la infección por SARS-CoV-2 (covid-19). Con la irrupción de la pandemia y el colapso hospitalario fue necesario implementar una serie de medidas sin precedentes que permitieran continuar con nuestra labor asistencial. En este artículo, compartimos las medidas urgentes que se tomaron durante las primeras semanas de crisis, las cuales se mantienen en la actualidad.

Se estableció una entrada única de acceso a los Servicios de Oncología Médica, Oncología Radioterápica y Medicina Nuclear. Con el fin de minimizar el contagio intrahospitalario, se controló la afluencia de enfermos, evitando así aglomeraciones en salas de espera, y se prohibió la entrada de acompañantes,

salvo en los casos estrictamente necesarios. Se organizó entre los tres servicios, con el personal auxiliar encargado de la recepción del paciente, un sistema de detección precoz del enfermo sospechoso de covid-19 (mediante un sistema de triaje en la entrada) y se habilitó una sala de espera para pacientes con síntomas compatibles con la enfermedad.

El triaje está basado en toma de temperatura, refuerzo de la higiene de manos, comprobación del uso adecuado de mascarilla e interrogatorio por síntomas compatibles con infección covid-19, así como por posibles contactos estrechos.

Además, se estableció un segundo triaje en dos puntos sensibles del Servicio de Oncología Radioterápica: en la recepción del paciente en tratamiento radioterápico por parte del técnico en radioterapia (TER) previo al paso a las unidades de tratamiento y en la Unidad de Simulación. En caso de sospecha, el enfermo era trasladado a la sala de triaje para la realización del circuito de detección precoz de SARS-CoV-2 por parte del oncólogo radioterápico.

Se procedió a realizar una reestructuración de las agendas médicas y de enfermería, minimizando el tiempo de espera del enfermo en el Hospital y potenciando las consultas vía telefónica de pacientes sin tumor activo. La necesidad de revisión presencial de los enfermos en tratamiento radioterápico se realizó de manera individualizada, según el criterio del responsable de cada patología.

En las unidades de tratamiento y simulación, se extremaron las medidas de higiene con respecto a la mesa de tratamiento e inmovilizadores, manejando con especial cuidado las máscaras termoplásticas y demás inmovilizadores que pudieran estar en contacto con fómites del enfermo, de acuerdo con las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Fue necesario

optimizar los horarios de la unidades para asegurar un adecuado cumplimiento de las nuevas funciones encomendadas a los TER, a los cuales se les proporcionaron sesiones de formación por parte del Servicio de Prevención de Riesgos Laborales sobre la higiene de manos y el adecuado manejo de los equipos de protección individual (EPI).

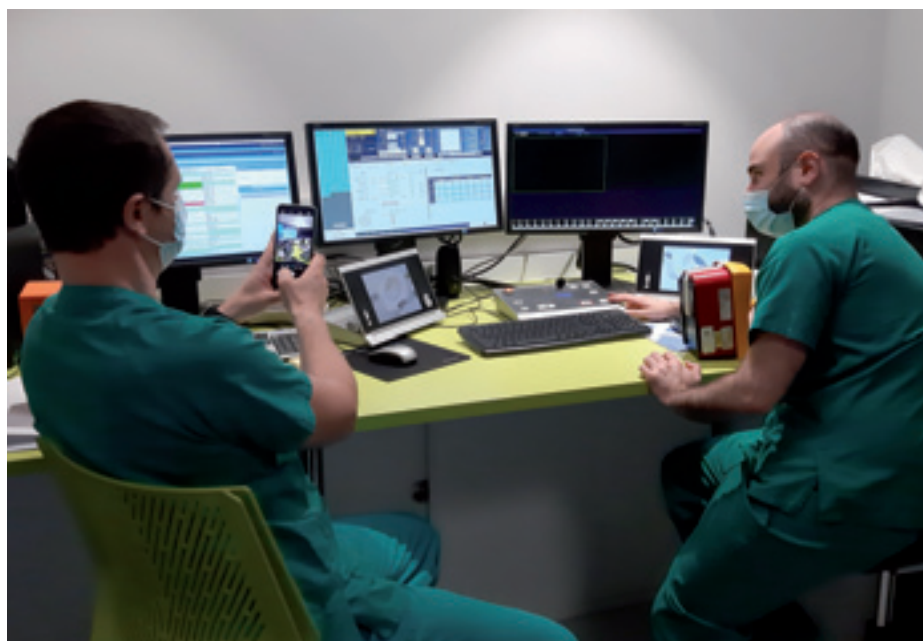
Con respecto al tratamiento radioterápico, en base a las recomendaciones

de las principales sociedades científicas (las de Oncología Radioterápica europea y americana), se elaboró un plan de contingencia con el fin de categorizar a los enfermos con relación al riesgo que presenta la enfermedad oncológica para establecer el inicio del tratamiento radioterápico o diferir el mismo. A los pacientes con indicación de tratamiento radioterápico adyuvante, tumores benignos o enfermos con otro tratamiento oncológico

ya establecido (hormonoterapia, quimioterapia), se les realizó una valoración individualizada de la situación, su patología y pronóstico, tendiendo a esperar a la estabilización de la pandemia para el inicio del tratamiento. En pacientes con indicación de tratamiento radical, ya fuera con radioterapia exclusiva o concurrente con otros tratamientos, se evaluó el beneficio del inicio de tratamiento radioterápico frente al riesgo de desarrollar complicaciones graves en relación con la covid. En lo referido a los pacientes paliativos, se primaron medidas conservadoras en domicilio.

Para aquellos pacientes pendientes de inicio de tratamiento radioterápico, así como aquellos que ya habían comenzado con el tratamiento, el objetivo fue reducir el número de fracciones. Para ello, se potenciaron las técnicas hipofraccionadas.

En la primera oleada (marzo-mayo de 2020), se identificaron en triaje 46 casos sospechosos, de los cuales 14 resultaron positivos. La decisión de continuar con tratamiento radioterápico a pesar de PCR positiva para SARS-CoV-2 se estableció de manera individualizada, valorando la repercusión de la interrupción del tratamiento en el control oncológico. En dos pacientes con tratamiento de intención radical se continuó con la radioterapia tras comprobar la adecuada evolución de la infección por el coronavirus. En otros tres enfermos nuevos se realizó la simulación y tratamiento radioterápico a pesar de presentar infección por coronavirus. Para estos casos, se elaboró un circuito especial evitando la confluencia del enfermo con el resto de pacientes y realizándose a última hora de la tarde para la posterior desinfección del acelerador. Los TER y resto de personal implicado debían portar los EPI recomendados. Los tratamientos pudieron realizarse sin ninguna incidencia.



Inspección telemática del servicio de radioterapia.



Inspección telemática del acelerador en el interior del búnker.

Experiencia en el Servicio de Radiofísica del Hospital 12 de Octubre

■ Texto: **Rosa Gilarranz Moreno** | Jefe de Servicio de Radiofísica | Hospital Universitario 12 de Octubre | Madrid ■

El protocolo de actuación descrito en el apartado anterior se realizó de forma similar en otros servicios. A pesar de ello se encontraron con pacientes que tras pasar el triaje, al realizarles alguna prueba diagnóstica con TC, se confirmaba la existencia de neumonía bilateral.

En el Servicio de Medicina Nuclear también se consideraron las recomendaciones de las sociedades científicas y se valoró la suspensión de los tratamientos para algunos pacientes de alto riesgo de infección covid. Por ello, durante el estado de alarma, se suspendieron algunos tratamientos de terapia metabólica (en concreto los tratamientos de lutecio y radio).

Además, especialmente en los meses de marzo y abril de 2020, muchos pacientes no acudían a realizarse las pruebas diagnósticas, tanto de PET como convencional, por miedo al contagio, llegándose algunos días a realizar una tercera parte de las pruebas citadas. Posteriormente se recuperaron reforzando la atención al paciente en turno de tarde.

Algunos procedimientos de cirugía radioguiada se suspendieron o retrasaron por la ocupación de las UCI y las REA (unidades de reanimación y cuidados críticos de adultos) por pacientes covid, pudiéndose realizar más adelante en los quirófanos del edificio Materno Infantil.

También se modificó el procedimiento de tromboembolismo pulmonar, realizando un solo SPECT-TC de perfusión, evitando los estudios de ventilación por producción de aerosoles, siguiendo las recomendaciones de la Sociedad Española

de Medicina Nuclear e Imagen Molecular (SEMMIN).

Inspección por vía telemática para la puesta en marcha de un acelerador

Por otro lado, en nuestro Hospital estábamos en plena implantación de los equipos adjudicados por la Fundación Amancio Ortega, cuando se decretó el estado de alarma. Nos encontramos de golpe con la suspensión de las obras por un lado y la interrupción del montaje de dos equipos (acelerador Varian Halcyon y PET digital GE), por otro. El problema fue que al declararse el estado de alarma quedaron restringidas las actuaciones de todos los implicados.

La puesta en marcha de ambos equipos era fundamental para recuperar la actividad asistencial normal ya que, por protocolo covid y para poder limpiar los equipos adecuadamente, las pruebas y tratamientos de pacientes se realizaban de forma más espaciada. Además, a causa del aplazamiento de pruebas diagnósticas y tratamientos, se había incrementado considerablemente la lista de espera y, como todos los Hospitales estaban en la misma situación, no era posible la derivación de pacientes. Con la puesta en marcha de estas unidades se conseguía al menos repartir los pacientes entre más equipos o unidades, con el consiguiente aumento de la capacidad asistencial.

Finalmente, conseguimos terminar la instalación de ambos equipos sin riesgo para los trabajadores, siguiendo los protocolos de protección y realizando labores

de limpieza y de desinfección recomendados.

Una vez realizada la aceptación y las medidas de estado de referencia del acelerador Halcyon por parte de Radiofísica, se solicitó al Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) la realización de la inspección preceptiva para su puesta en marcha.

En este sentido, la coordinación entre el CSN, que tenía restringidas la realización de inspecciones, incluidas las de puesta en marcha de las instalaciones radiactivas, y el Servicio de Radiofísica y Protección Radiológica fue muy satisfactoria, ya que como consecuencia de la realización de la inspección virtual logramos poner en marcha el acelerador.

Nos encontramos con varias dificultades, principalmente porque en ese momento, 16 de abril, no disponíamos de los mismos medios de videoconferencia que ahora, ni teníamos la misma experiencia en su utilización. Para contrarrestar los problemas de cobertura dentro del bunker, lo que cortaba la comunicación con la inspectora, decidimos implicar a un mayor número de participantes, que realizaban videos de las medidas para luego poder documentar la inspección.

Me gustaría expresar nuestro agradecimiento a los responsables de la Subdirección de Protección Radiológica Operacional del CSN, ya que gracias a su esfuerzo se consiguió que la notificación de puesta en marcha llegara el 22 de abril, por lo que pudimos comenzar la formación y tratamiento de pacientes.

Una vez más se hizo patente la importancia de una buena coordinación entre todas las partes implicadas, para conseguir un objetivo común, el bien del paciente.

Dificultad en aunar la protección radiológica con protocolos de actuación covid

Además de las dificultades expuestas en la primera parte del artículo por el Hospital Clínico, me gustaría añadir otras

con las que nos hemos encontrado, que individualmente son insignificantes, pero que en conjunto pueden dar una idea del desconcierto ocasionado con esta situación.

Especialmente en las primeras semanas y durante el estado de alarma se produjeron problemas de desplazamiento a los distintos centros de nuestro ámbito de actuación, ya que no podía viajar en taxi o vehículo propio más de una persona; también hubo dificultades en la entrega de los dosímetros personales por parte del Centro Nacional de Dosimetría,

que al principio tuvo problemas con las empresas de mensajería; y hubo dificultad de comunicación con los responsables de los servicios, ya que muchos estaban desplazados de su puesto de trabajo. Con el tiempo y una vez establecidos los cauces de comunicación por correo electrónico, teams y otras aplicaciones semejantes estos problemas han desaparecido.

También la formación en protección radiológica se ha tenido que reorganizar en poco tiempo. Ha sido un gran esfuerzo realizar las clases para talleres y cursos

ya programados de forma virtual, en *streaming* o grabadas, pero es seguro que este formato va a continuar en adelante e incluso ampliándose a todos los campos.

Me gustaría también señalar la labor realizada desde el Servicio de Prevención de Riesgos Laborales, por la información y difusión de los protocolos de actuación en relación a las medidas de protección de los trabajadores en caso de covid-19. Realizaron sesiones de formación sobre higiene de manos y el adecuado manejo de los equipos de protección individual (EPI). De especial importancia fueron las sesiones sobre distintos tipos de mascarilla y su eficacia, y sobre las vías de transmisión.

Gracias a esta información se consiguieron dos objetivos: trabajar con seguridad y tranquilizar a los trabajadores, en especial a los trabajadores de primera línea covid.

Conclusiones

Hemos aprendido mucho de esta situación, adaptando muchos procedimientos de trabajo, cuya modificación se va a quedar para siempre.

La sensación es de haber podido superar todos los obstáculos, en un momento muy difícil, para conseguir el objetivo principal: no afectar a nuestra labor asistencial. Además hemos aprendido a realizar sesiones, reuniones o formación en situación de teletrabajo o videoconferencia en la medida de lo posible, cumpliendo así las recomendaciones de aforo y poder realizarlas con seguridad.

La clave para la resolución de las dificultades ha estado en la buena coordinación entre los distintos servicios: Oncología Radioterápica, Medicina Nuclear, Radiofísica, Mantenimiento, SPRL, y también desde fuera del Hospital, con el CSN y demás organismos, así como con las empresas implicadas en la venta, mantenimiento y puesta en marcha de los equipos.



Después de cada uso, se desinfecta el acelerador para evitar posibles contagios.



DEROSIPHOTOS

Muchos recién nacidos sufren un tipo de ictericia peculiar que se trata con rayos UV-A en las unidades de neonatos.

Las insospechadas aplicaciones de la radiación ultravioleta

La luz invisible al ojo, pero no a la piel

Todo cuanto tiene cierta temperatura en el universo emite luz, pero no toda esa luz es percibida por nuestros ojos. Si el ser humano fuese capaz de captarla nos encontraríamos con un cosmos cegador, brillante y animado. Por fortuna o por desgracia, nuestra visión es bastante limitada, ya que nuestro ojo solo detecta una pequeña franja de todo el espectro electromagnético, llamada visible precisamente por ello. Entre los distintos rangos que forman ese espectro (desde los rayos gamma y x hasta las microondas y las ondas de radio) hay uno que con la pandemia ha

experimentado un mayor reconocimiento: el de la luz ultravioleta. Esta radiación, invisible para nuestros ojos pero no para nuestra piel se ha estado utilizando para desinfectar espacios y objetos, ya que es capaz de destruir los agentes patógenos descomponiendo su ADN en pequeños fragmentos sin actividad biológica. Sus posibles aplicaciones son, sin embargo, mucho más amplias, en áreas como la medicina, la policía científica, la óptica y las telecomunicaciones, entre otras.

■ Texto: **Lucía Casas Piñeiro** | Periodista científica ■

El astrónomo William Herschel (1738-1822) tuvo la gran suerte de ser una celebridad en vida. Un ávido explorador del espacio profundo, ena-

morado de Urano y de sus lunas. El arquitecto preciso de la Vía Láctea a quien el mismo Napoleón llegó a distinguir con la Gran Cruz de la Legión de Honor.

En su tiempo libre, Herschel se interesaba por las maravillas de la luz. Un día de 1800, el astrónomo —ahora físico— descubriría la radiación infrarroja. Al hacer

pasar luz solar por un prisma, Herschel podía medir el calentamiento que provocaban los distintos colores del espectro visible. La parte revolucionaria vendría con el aumento de la temperatura en la zona situada más allá del rojo, iniciándose así el estudio del espectro electromagnético más allá del rango visible.

Tan solo un año después, Johan Wilhem Ritter provocaría otra pequeña revolución, aunque esta sería mucho más silenciosa. Motivado por el experimento de Herschel, Ritter medía el oscurecimiento de tiras de papel en solución de nitrato de plata para medir la rapidez con que estas cambiaban su color. Al descomponerse la luz en el compuesto de nitrato de plata, el papel se iba oscureciendo. Ritter no solo observó que la luz violeta descomponía el color mucho más rápido que la roja, sino que continuó colocando tiras de papel humedecido más allá de este extremo, donde los sentidos le dictaban que nada había. Más allá, donde el oscurecimiento se producía cada vez más rápido, estaba la radiación ultravioleta. Los infrarrojos de Herschel se llevaron la fama que confiere ser el primero en descubrir la luz invisible. Con todo, descubrir la luz ultravioleta fue al menos igual de portentoso.

Más allá del espectro visible

La luz ultravioleta es un tipo de radiación dentro del espectro electromagnético cuya longitud de onda es menor que la de la luz visible para el ojo humano, de ahí que no podamos percibirla a simple vista. El prefijo *ultra-* (del latín ‘*más allá de*’) indica que se encuentra, por tanto, a partir de la luz violeta. Dependiendo de su longitud de onda, distinguimos distintos tipos de luz ultravioleta, desde la UV-A (cuya longitud va desde los 400 nanómetros hasta los 315) hasta el ultravioleta extremo (120-10 nm).

A diario recibimos radiación UV, aquella presente en los rayos solares que

proveen de vida a nuestro planeta. La luz UV llega en longitudes de onda que van desde los 400 nm (UV-A) hasta los 150 nm (UV-C), aunque casi la totalidad de los rayos que acaban alcanzando la Tierra son del tipo A, el menos dañino para la salud. La atmósfera es capaz de absorber los rayos UV-C gracias al oxígeno y el ozono estratosférico, pero una pequeña parte de los rayos UV-B sí consiguen atravesar la capa de ozono, causando lesiones oculares y en la piel. El agujero en esta capa, más pronunciado en las regiones polares durante la primavera, facilita este proceso.

La luz ultravioleta de mayor longitud de onda (la más cercana a la luz visible) no es ionizante. Eso quiere decir que su radiación no es capaz de extraer electrones de su estado ligado al átomo. Sin embargo, una parte de los rayos ultravioleta (UV-B) sí transporta la suficiente energía como para romper enlaces químicos, haciendo que las moléculas se vuelvan reactivas. Esto es lo que ocurre cuando exponemos al Sol nuestra piel sin protección. Las quemaduras solares no son más que el efecto visible de la radiación ultravioleta, llegando a ve-

ces incluso a causar cáncer cuando se dañan las moléculas de ADN complejas que se encuentran dentro de las células de nuestra piel.

La aplicaciones de la luz ultravioleta incluyen actividades tan habituales como las salas de bronceado o los detectores de billetes falsos. También forma parte del equipo de la policía científica para identificar huellas dactilares, sustancias y fluidos.

La necesidad de corresponder a los cánones estéticos lleva en no pocas ocasiones a poner en riesgo la salud. La tanorexia es un trastorno psicológico que lleva a las personas que lo sufren a pensar que su piel no está lo suficientemente bronceada por eso es habitual verles en las salas de bronceado artificial intentando mantener su piel morena, aunque la OMS alerta del peligro de su uso reiterado. Según las características de la piel (fototipo) se recomienda un número máximo de sesiones al año. Las personas de cabello oscuro, que en raras ocasiones tienen quemaduras, pueden tomar hasta 100 sesiones de 20 minutos, mientras que a las personas albinas y pelirrojas se les recomienda no usar estas cabinas.

DEPOSITPHOTOS



Todos los billetes contienen tinta ultravioleta para asegurar su autenticidad.

Todos los billetes que circulan hoy día contienen distintas marcas como medidas de seguridad para detectar su autenticidad. Tan solo en 2017, las autoridades españolas confiscaron más de 100.000 billetes falsos, de los cuales más de la mitad se encontraban ya en el mercado cuando fueron intervenidos. El papel de los billetes contiene tinta ultravioleta, solo visible si se le aplica directamente luz del mismo tipo. Si el billete no es falso, se podrá observar la firma del presidente del BCE en un tono verdoso, así como otros detalles y otros tonos que no pueden apreciarse sin el uso de esta luz.

A menudo se dice que no existe el crimen perfecto. Esto se debe, en parte, al uso de técnicas de iluminación o fotónica, las cuales permiten a la policía científica revisar el lugar donde se ha cometido un crimen sin destruir posibles pruebas. La luz ultravioleta suele ser la primera opción, ya que no interfiere ni daña la muestra. Su utilización es de gran utilidad para observar cierto tipo de rastros, ya que muchos elementos de origen biológico son fluorescentes. El cabello, el semen y las huellas dactilares emiten luz por fluorescencia

cuando se exponen al ultravioleta en la longitud de onda adecuada.

Todos ellos son usos cotidianos de la radiación de esta parte del espectro electromagnético, pero la aplicación más reciente de esta luz ha sido la desinfección de espacios mediante irradiación para prevenir la propagación del coronavirus. Con todo, este no ha sido su único trabajo ni tampoco el más extraño.

Borrando la huella de pequeños agentes del caos

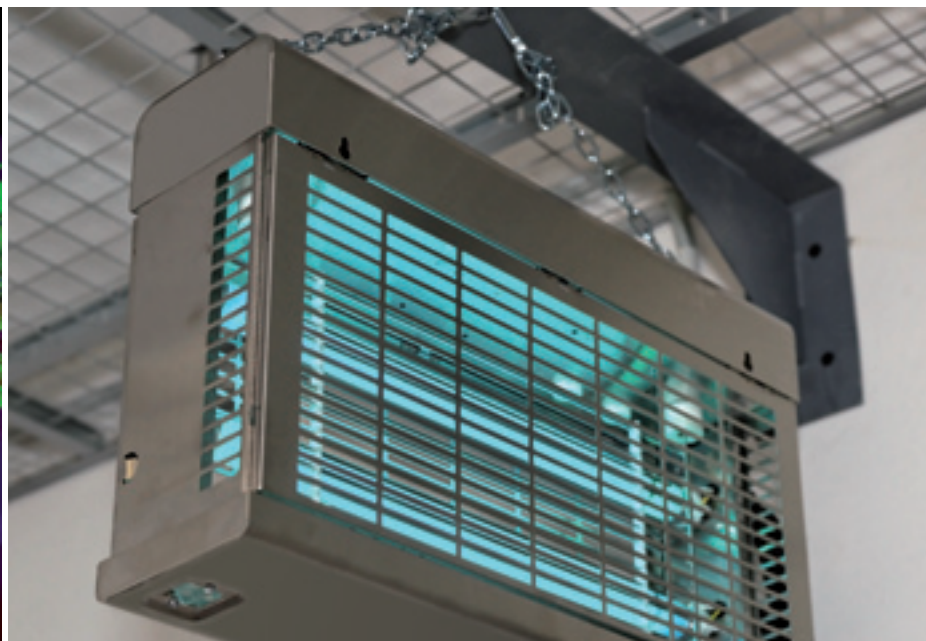
Utilizar la radiación ultravioleta para desinfectar espacios y objetos se ha convertido en una práctica generalizada durante la pandemia, pero esto no es nuevo. Desde hace años sabemos que cuando bacterias, virus y protozoos son expuestos a radiaciones con longitudes de onda entre 200 y 300 nanómetros (UV-C) se elimina la capacidad de reproducción de los microorganismos.

Un tipo específico de ultravioleta C, el UV-GI (abreviatura de *irradiación germicida ultravioleta*) se ha estado empleando para eliminar los patógenos causantes de enfermedades como el cólera, la poliomielitis, la fiebre tifoidea y otras

afecciones víricas y bacterianas. Su efectividad radica en que la propiedad que permite romper las cadenas de aminoácidos de sus proteínas. Esto inhabilita al organismo e impide que se reproduzca, evitando así que la enfermedad se propague. La radiación ultravioleta germicida se emplea, también, para controlar la calidad del agua y para desinfectar los sistemas de ventilación.

Hospitales y laboratorios científicos son escenarios donde el uso de estos rayos era ya habitual antes de la pandemia. Dependiendo del patógeno que se quiera eliminar es necesario emplear más radiación y durante un periodo de tiempo mayor. Así, según un documento publicado por la Universidad de Columbia Británica (Canadá), para eliminar en un 90 % el virus HIV-1, causante de la variante más común del sida, es necesario aplicar hasta 28.000 microvatios por centímetro cuadrado ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) durante 220 segundos, mientras que para eliminar algunos hongos unicelulares, como la levadura de cerveza (*Saccharomyces cerevisiae*), tan solo se necesitan 400 microvatios durante medio minuto.

En noviembre de 2020, el Ministerio de Sanidad publicó un archivo en el cual analizaba la efectividad de esta técnica y las recomendaciones para su uso como agente desinfectante. La necesidad de publicar un documento así se debía en parte a la creciente preocupación de la población, que desconocía esta técnica germicida, pero también por un uso inadecuado de este tipo de radiación y por algunas páginas que aconsejaban desinfectarse directamente la piel utilizando lámparas de luz UV-C. Según el Plan de Trabajo de la Red Española de Agencias de Evaluación de Tecnologías Sanitarias y Prestaciones del SNS (Sistema Nacional de Salud), “la evidencia disponible sugiere que los dispositivos de luz UV-C podrían inactivar el SARS-CoV-2 de una forma fácil y rápida”, pero también



Aparato de desinfección del aire mediante radiación ultravioleta.

DEPOSITPHOTOS

Un peligro latente tras la norma social

Tomar el sol es un hábito totalmente normalizado dentro de la sociedad, el cual se practica con la intención de ponerse moreno, aunque no siempre se conocen qué mecanismos llevan al oscurecimiento de la piel. Según un paper publicado en 2019 en *Photochemistry and Photobiology*, “existe la percepción pública de que un bronceado indica un individuo saludable” debido a motivos “culturales y cosméticos”. Sin embargo, la función de la melanina no es encajar en cánones estéticos, sino defender el cuerpo para evitar que la radiación ultravioleta de tipos A y B dañe nuestros tejidos. Exponerse al sol de forma inadecuada puede tener consecuencias serias para la salud del individuo. Por ello, es necesario comprender cómo se produce la pigmentación de la piel.

La *epidermis* (la capa más superficial de la piel) tiene como función proteger a nuestro organismo de todo agente que provenga del exterior y pueda ser dañino para nosotros, como ciertos químicos, patógenos y radiaciones UV. Los queratinocitos, las células más abundantes en esta capa externa, producen queratina, una proteína que estimula el crecimiento de las células epiteliales. Además, acumulan el pigmento causante de que nos pongamos morenos: la melanina, cuya función es evitar que los rayos UV-A y UV-B penetren en la piel. Cuando exponemos nuestra piel al Sol, la melanina acumulada en los queratinocitos se oxida, cambiando así su composición química y redistribuyéndose por la

epidermis al cabo de unos minutos. Es después, pasado un margen de horas o días, cuando los melanocitos activan la producción de más melanina, la cual se acumula de nuevo en los queratinocitos para seguir protegiéndonos.

Si esta función no se cumple, los rayos UV-A y UV-B pueden causar daños severos. El ADN absorbe el ultravioleta B, ocasionando fallos estructurales en la molécula, como por ejemplo los dímeros de timina (cuando dos bases T se enlazan) un fallo que puede impedir que nuestras células interpreten el ADN de forma correcta. Además, los rayos UV-A causan deterioros indirectos en esta molécula al inducir la aparición de los radicales libres ROS (Reactive Oxygen Species). Estos radicales pueden romper la secuencia de aminoácidos del ADN. Si estos daños no se reparan y se producen en determinados genes (aquellos que den instrucciones para la división de las células) podría llegar a desarrollarse un cáncer de piel, en el más grave de los casos, un melanoma maligno. ■



El melanoma maligno es el cáncer de piel más agresivo.

decía que esa evidencia es todavía escasa y muy heterogénea.

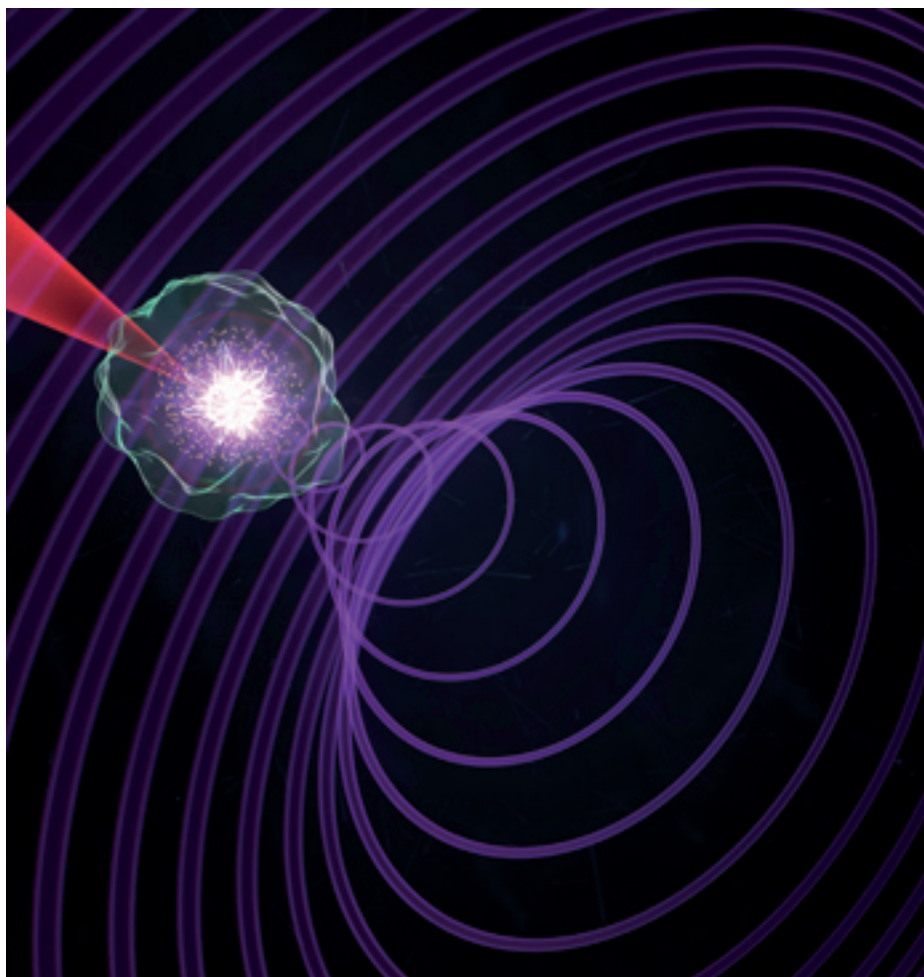
El documento concluía que la desinfección de espacios mediante luz UV-C no puede aplicarse en presencia de personas y que un uso inadecuado de estos equipos de desinfección podría acarrear daños para la salud humana, algunos de ellos potencialmente cancerígenos. La utilización de radiación UV-C en ambientes domésticos quedó totalmente desaconsejada, así como el uso de lámparas aplicadas directamente en la piel.

Medicina en formato energético

En medicina, los rayos UV-A se utilizan para identificar determinadas afeccio-

nes cutáneas, como la existencia de algunos hongos y bacterias (en especial *Microsporum* y *Corynebacterium*), los cuales brillan de forma intensa en tonos amarillentos y anaranjados cuando se observan bajo ultravioleta. Los rayos UV-A detectan además problemas de pigmentación en la piel, y son utilizados para tratar condiciones como el vitíligo o la dermatitis atópica mediante la exposición, en pequeñas dosis, de radiación de tipos UV-A y UV-B. Esta práctica se conoce como fototerapia, y también es utilizada para tratar a pa-

cientes con trastorno afectivo estacional, ya que la vitamina D que proporciona la luz de forma natural estimula la serotonina (*5-hidroxitriptamina* o 5-HT) del cerebro. Este problema suele afectar, por lo general, en aquellas estaciones del año donde hay menos horas de luz, de ahí su nombre. Además, es más frecuente en las personas que viven más alejadas del ecuador, como los países nórdicos. Una afección frecuente en recién nacidos es



Vórtice de luz coherente ultravioleta.

cierto tipo de ictericia que se trata con rayos UV-A en las propias unidades de neonatos. Además, en este 2021 un equipo de Investigación liderado por la química inorgánica María Villet-Regí ha desarrollado una nueva técnica capaz de tratar la fibrosis de una forma menos invasiva: se introduce una nanocápsula en el tejido fibrótico con una determinada cantidad de colagenasa, una enzima capaz de romper los enlaces pépticos del colágeno causante de esta patología. Mediante luz ultravioleta las cápsulas se abren, liberando la enzima de un modo no invasivo y más duradero. La fototerapia con irradiación de luz ultravioleta permite reducir el grosor y la rigidez de la piel, lo cual aumenta la producción natural de colagenasa en el tejido epitelial.



Laura Rego Cabezas, del Grupo ALF-USAL.

Manipulando el nanomundo

En junio de 2019, el Grupo de Investigación en Aplicaciones de los Láseres y Fotónica (ALF) de la Universidad de Salamanca descubrió una nueva propiedad de la luz, el auto-torque. Su trabajo, centrado en los vórtices de luz coherente ultravioleta, llegó a ser portada de la revis-

ta *Science*. El principio mediante el cual se crean vórtices de luz es similar al que rige fenómenos como un torbellino de viento o un remolino de agua, solo que producido por dos haces de luz muy concentrados, los cuales han sido generados por láser. Laura Rego Cabezas, investigadora integrante del grupo que publicó el trabajo, destaca que “lo que nos permite el láser es controlar con mucha precisión cómo hacer un vórtice con una rotación determinada gracias a que es una luz muy limpia”.

La investigación en fotónica basada en vórtices no es reciente, pero lo que hasta ahora se desconocía era el auto-torque, una nueva propiedad de la luz que hace que su momento angular orbital (OAM por sus siglas en inglés) varíe con el tiempo. Sobre el proceso mediante el cual el equipo de Laura Rego observó por primera vez el auto-torque, la física explica: “Mientras estudiábamos estos vórtices, pensamos que estaría bien añadirle el grado de libertad que te da también una evolución temporal. Lo que sucede en estos vórtices que tienen auto-torque es que esta rotación acelera con el tiempo. Es decir, es como si rotara cada vez más rápido o más despacio de forma controlada”.

Existe un enorme interés por estudiar los vórtices de luz en el rango ultravioleta, ya que al ser las longitudes de onda tan pequeñas y su luz tan energética los investigadores pueden operar a escala nanométrica: “Una de las características de los vórtices en los rangos habituales, por ejemplo en el infrarrojo, es que tienen aplicaciones en la transferencia de información, ya que puedes almacenar información dentro de esta rotación. También puedes atrapar una micropartícula y transferirle su rotación. Los vórtices en el UV extremo, al ser una frecuencia muy alta, nos permite interactuar con la materia a escala nanométrica, con átomos. Además,

son ultracortos en el tiempo y pueden interactuar con dinámicas electrónicas muy rápidas”.

Los vórtices de luz tienen aplicaciones en telecomunicaciones, en computación cuántica o en el estudio de materiales magnéticos. Por otra parte, la polarización de la luz se emplea ya en objetos más cotidianos, como las gafas polarizadas o el cine en 3D. Si además esta polarización se produce con una frecuencia muy pequeña, en el UV, se puede estudiar la composición de distintos fármacos, así como las simetrías de sus moléculas. La combinación de estas dos

atravesar la atmósfera y alcanzar nuestros telescopios terrestres. Los primeros satélites que realizaron observaciones desde la órbita terrestre (*Orbiting Solar Observatory* y *Orbiting Astronomical Observatory*) fueron testigos de que el cielo nocturno era de todo menos aburrido. Como indica Armando Gil de Paz, astrofísico e investigador del Grupo de Astrofísica Instrumental y Extragaláctica de la Universidad Complutense de Madrid: “El rango ultravioleta era una ventana estratégicamente importante en los 70 porque si había cualquier tipo de prueba en el espacio de los rusos o

observando a las estrellas que se han formado en periodos más recientes. Esto nos permite ser testigos del desarrollo de estas estrellas y conocer mejor sus condiciones. Además, indica Gil de Paz, podemos detectar fenómenos energéticos que desde la Tierra no podemos estudiar “como la colisión de dos estrellas de neutrones, que son eventos que suelen emitir mucho en UV”. También podemos recabar información sobre el gas que rodea cierto tipo de agujeros negros, “cuando hay emisiones de luz, digamos, ordinaria, porque el núcleo está activo y emite mucho en esta frecuencia” o sobre

NASA



La Galaxia Espiral M31 (Andrómeda) observada en el rango de luz ultravioleta.



CORTESÍA DE ARMANDO GIL

El astrofísico Armando Gil de Paz.

particularidades, vorticidad y polarización, podría traer nuevos usos o nuevas formas de analizar la materia en una escala tan pequeña.

A la caza de jóvenes estrellas

La mitología latina designó a nuestra galaxia como Vía Láctea en honor al blanquecino color de la leche que había sido derramada en el pecho de Juno, la reina de los dioses. Desde la Tierra, el cielo estrellado se compone de una paleta tenue, casi mortecina y aburrida. Hasta el inicio de la exploración espacial de los años 60 y 70 del pasado siglo no se comenzó a estudiar el cosmos en el rango ultravioleta, ya que solo una diminuta porción de esta es capaz de

de los americanos, serían eventos muy energéticos, observables en el rango de los ultravioleta”.

Debido a que su elevada energía, suelen proceder de objetos muy calientes. Una estrella que emita en este rango debe estar al menos a unos 10.000 K de temperatura, como mínimo (la superficie del Sol está a 6.000). Las estrellas con esta característica suelen ser las de mayor masa y su combustión es muy rápida, por lo que su ciclo de vida es relativamente corto, de unos diez millones de años, mientras que nuestra estrella, que está en el ecuador de su vida, tiene casi 5.000 millones de años.

Por ello, cuando estudiamos el universo en el espectro de rayos UV estamos

quásares, fuentes que emiten, sobre todo, en el ultravioleta. Como no todos los objetos del universo son tan energéticos, la astronomía ultravioleta nos permite buscar determinados fenómenos concretos de una forma más sencilla y eliminar así el ruido que puedan producir otros objetos que emitan en frecuencias más largas.

El ser humano siempre ha sentido fascinación por la luz. Primero fue la incandescencia, el Sol, el baile del fuego ante la mirada atónita de nuestros antecesores. Ahora la búsqueda continúa hacia aquello que nuestro ojo no detecta, pero la curiosidad del hombre sigue intacta. La fluorescencia nos enseñará nuevos trucos de tahr sin cartas. ©

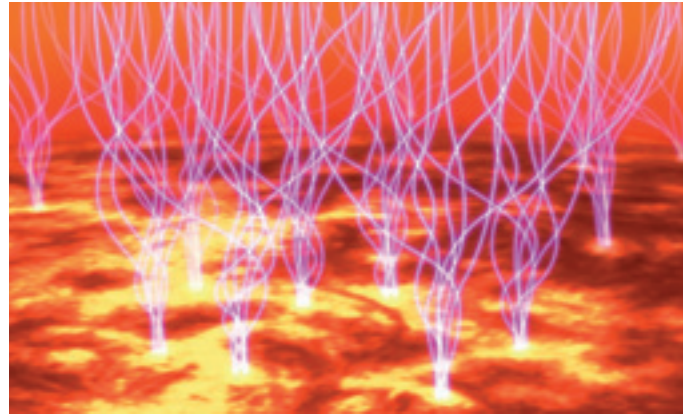
Reacción en cadena

■ Texto: **Lucía Casas** |

NOTICIAS

El campo magnético solar de la cabeza a los pies

Pese a estar relativamente cerca y depender de él, algunas características del Sol permanecen todavía como incógnitas. Esto se debe a su frenética actividad, causante de imágenes increíbles y de algún que otro problema tecnológico. Estudiar el campo magnético de la atmósfera solar es vital para entender lo que sucede en la corona de este astro. Las observaciones de la misión CLASP2 de la NASA, en la cual participa el Instituto de Astrofísica de Canarias



GABRIEL PÉREZ DÍAZ, SMIM (IAC)

(IAC), han permitido cartografiar por primera vez el campo magnético solar a distintas alturas, desde la fina capa de la fotosfera hasta la ardiente base de la corona.

Los resultados de este nuevo mapa respaldan la teoría de que el campo magné-

tico es el encargado de calentar la atmósfera superior de la estrella, impulsando su actividad. Las observaciones muestran que la fuerza del campo magnético en las capas más superficiales de la cromosfera está íntimamente relacionada con la presión que

los electrones ejercen en estas mismas capas.

“Es imposible entender la atmósfera solar si no logramos determinar los campos magnéticos de la cromosfera, especialmente en sus capas más externas, donde la temperatura del plasma es del orden de diez mil grados y las fuerzas magnéticas dominan la estructura y dinámica del plasma”, comenta Javier Trujillo Bueno, científico responsable del grupo del IAC que participó en este estudio. La cromosfera ha sido siempre objeto de interés científico: al ser una región intermedia entre la fotosfera y la corona esta podría esconder la solución

Aprender del lémur para llegar a Marte

El lémur enano de cola gruesa (*Cheirogaleus medius*), una especie endémica de Madagascar, puede pasarse hasta siete meses al año en estado de letargo. Este pequeño primate utiliza la grasa almacenada en su cola para poder sobrevivir a los meses más fríos empleando la mínima ener-

gía posible. Con el fin de estudiar los mecanismos que permiten al lémur enano hibernar, el centro de investigación Duke Lemur en Carolina del Norte (EE. UU.) ha estado recreando en sus instalaciones las fluctuaciones estacionales típicas de su hábitat natural. Como respuesta al cambio de las temperaturas, la luz y la comida, estos animales en cautiverio han comenzado a comportarse del mismo modo en que lo hacen sus parientes salvajes en Madagascar. Esto permite a los investigadores estudiar sus trastornos metabólicos sin tener que desplazarse. Marina Blanco, investigadora principal del proyecto, dice que “no decepcionaron. La hibernación está, literalmente, en su ADN”.

Según Lydia Greene, coautora del estudio, el siguiente paso será utilizar técnicas no invasivas, como el análisis de metabolitos, para comprender cómo se prepara el cuerpo de los lémures para entrar en letargo y recuperarse después de forma efectiva. Esta línea de investigación podría conducir, señala, a nuevos tratamientos para ataques cardíacos, accidentes cerebrovasculares y otras afecciones que continúan siendo mortales para el hombre. Sin embargo, Blanco va más allá: “¿Qué pueden enseñarnos estos animales acerca de cómo poner el cuerpo humano en pausa de forma segura y ralentizando los procesos del cuerpo el tiempo suficiente como para, digamos, una cirugía que salve vidas o incluso un viaje espacial?”



DUKE LEMUR CENTER

a muchos problemas persistentes de la física estelar, entre ellos qué mecanismos exactos causan las fulguraciones y protuberancias en la atmósfera solar.

El límite aC/dC

Será una tarea difícil tratar de olvidar la pandemia. Varios estudios adelantan secuelas psicológicas en la población. También el planeta tendrá una cicatriz, solo que esta será en formato arqueológico. Al igual que el límite Cretácico/Paleógeno (K/Pg) señala el momento de la historia en que los dinosaurios se extinguieron, podríamos hablar del margen que diferencia el mundo antes del coronavirus del de después; es decir, la capa antes y después de la covid-19 (aC/dC). Según un estudio de las Universidades de York, Tasmania y Sunshine Coast, la covid-19 está creando un archivo viral



MARCO VERCH-FLICKR-CREATIVE COMMONS

en nuestra historia. El aspecto más alarmante es, sin duda, la contaminación ambiental fruto del uso de los equipos de protección personal, las

mascarillas y los guantes desechables, que se han convertido en la insignia de 2020, aunque tardarán algo más en desaparecer.

Los autores del estudio destacan la necesidad de incorporar un enfoque arqueológico para tratar de solventar los problemas medioambientales. John Schofield, arqueólogo de la Universidad de York, explica que “comprender los comportamientos humanos a través de la cultura material que dejan atrás es lo que hacen los arqueólogos, ya sea en la prehistoria, en el período medieval o ayer. Creemos que este enfoque centrado en el objeto proporciona una perspectiva distinta y útil sobre el problema de la contaminación ambiental”. Se calcula que pueden pasar mil años para que un plástico se degrade por completo, pero lo más seguro es que el mismo se acabe descomponiendo en pequeños trozos hasta convertirse en un microplástico infiltrado en los ecosistemas. ▮

EFEMÉRIDES ► HACE 200 AÑOS... 1821

Descubierto el principio del motor eléctrico

Michael Faraday (1791 - 1867) fue uno de esos genios puros que causan fascinación a quien tropieza con algún libro donde se narra su historia. Pese a haber recibido una educación formal muy pobre, este físico inglés disponía de lo necesario para persistir en la frontera de la ciencia: intuición.

El descubrimiento del electromagnetismo por Oersted en 1820 había mostrado una nueva ruta para la experimentación, y Faraday quiso aprovecharla. Utilizando dos alambres y dos imanes, puso en funcionamiento un circuito eléctrico para observar qué ocurría cuando se fijaba uno de estos dos objetos y se dejaba el otro libre. El resultado fue que cuando la corriente eléctrica atravesaba el alambre móvil este se desplazaba hasta el imán fijo y el imán móvil se desplazaba hacia el alambre que había sido fijado. Un



año después del descubrimiento de Oersted Faraday demostraba que las fuerzas eléctricas eran capaces de generar movimiento. El descubrimiento llevaría al desarrollo de los motores eléctricos.

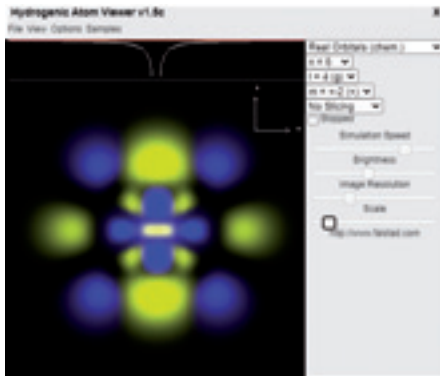
Este hallazgo llevó al físico a pensar en los fenómenos eléctricos y

magnéticos como campos a partir de los cuales se transportaba la energía en lo que él denominó líneas de fuerza. Faraday no solo tenía razón, sino que además estaba introduciendo un concepto que hoy día consideramos una propiedad fundamental de la física: la distribución espaciotemporal de las magnitudes físicas en campos. ▮

EN RED

En la intimidad de los átomos

La palabra *cuántico* se ha utilizado en contextos tan distintos —delirantes en no pocas ocasiones— que, con razón, muchas personas reniegan de la naturaleza cuántica. Suena a desconocido, a magia inabarcable para la mente humana. Como si

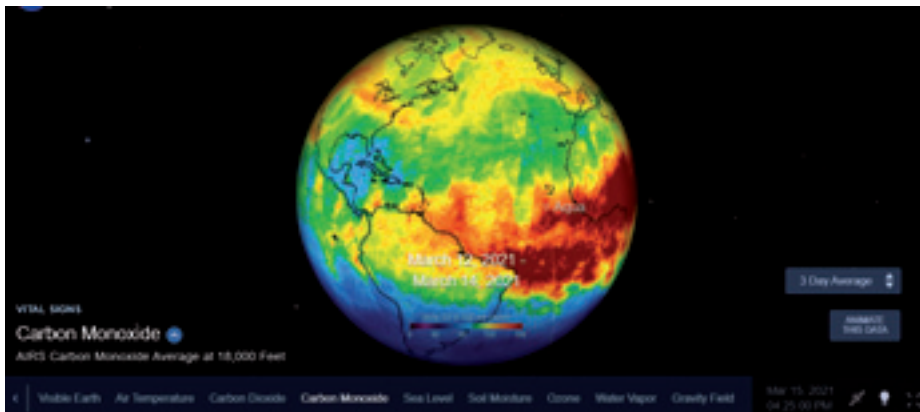


uno dejara de cruzar puentes porque no cree en ingenieros ni arquitectos. Aunque no es sencillo comprender los principios poco intuitivos de la física cuántica, quien realmente esté interesado en la naturaleza de *las pequeñas cosas* puede comenzar por observar cómo se comportan los átomos fuera de la interpretación clásica. Y para lograr esta empresa, páginas como <http://www.falstad.com/qmimo/> son de gran ayuda: a través de Falstad se puede observar cómo es la estructura de un átomo de hidrógeno y cómo evolucionan sus orbitales. De forma interactiva, esta pá-

gina permite familiarizarse con las magnitudes asociadas a los números cuánticos (n , m y l) y abandonar de una vez la extendida convicción de que forman pequeños sistemas solares.

Vigilando la salud del planeta

El cambio climático ha conseguido lo impensable: que la humanidad se ponga de acuerdo en algo. Un informe publicado en 2018 por el Pew Research Center mostraba que el 67% de las personas que participaron en su estudio consideraban el calentamiento global como el problema más grave al cual se enfrenta el planeta, por encima de los ciberataques, los programas nucleares o los grupos terroristas. Con el fin de dar acceso a contenidos relacionados con esta problemática ambiental, la NASA pone a disposición pública el programa *Global Climate Change: Vital Signs of the Planet*. A través de la página <https://climate.nasa.gov/> cualquier usuario puede acceder a artículos académicos, explicaciones sobre las causas y evidencias del cambio climático y determinados contenidos específicos para divulgadores, educadores o científicos. Uno de los recursos más interesantes que ofrece la página es *Earth now*, una animación 3D mediante la cual se pueden explorar en tiempo real distintas cuestiones relacionadas con la Tierra, como la capa de ozono, la concentración de dióxido de carbono y el nivel del mar, por citar solo unos ejemplos. ▶



REDES



@emulenews

Usuario del informático, físico, matemático y divulgador Francis Villatoro (Francis Naukas). Publica y reacciona a toda la actualidad y a curiosidades científicas.



Instituto de Física Teórica IFT

Este Centro de Excelencia ofrece distintos contenidos a través de sus listas de reproducción, desde conferencias de física fundamental hasta secciones donde los investigadores aclaran las dudas que los usuarios registran por comentarios, como IFT Responde.



Science

Página donde la revista científica publica a diario mostrando las noticias más relevantes. Los posts se enlazan con la noticia real o con los estudios que cita.



@geologylife

Cuenta de un estudiante de geología donde se comparten imágenes de distintos lugares de interés para esta disciplina, así como curiosidades y datos.



Clowntifics

Canal del grupo de científicos divulgadores 'Big Van Ciencia'. Comentan curiosidades, llevan a cabo pequeños experimentos y tratan cuestiones científicas en clave de humor. ▶

AGENDA

Un encuentro vegetal

Disponible desde el 27 de mayo hasta el 19 de septiembre

La Casa Encendida (Madrid), coproducida junto a Wellcome Collection (Londres)

<https://www.lacasaencendida.es/>,
<https://wellcomecollection.org/>

La actual crisis ambiental impone la necesidad de reconsiderar qué lugar ocupa el ser humano en la Tierra. Alcanzar el ideal del *Planetary health* (la convivencia saludable entre la civilización moderna y los sistemas naturales) depende, en parte, de comprender la importancia de todos los organismos que conviven en el planeta. Ningún ser es reemplazable ni prescindible. Como resultado de esta concepción, la exposición *Un encuentro vegetal* muestra el reino de las plantas como algo más que un mero producto para el consumo humano.

Esta colaboración entre La Casa Encendida (Madrid) y el museo Wellcome Collection de Londres repasa las obras botánicas históricas de Wellcome y de otras instituciones españolas con el ob-



WELLCOME COLLECTION

© PATRICIA DOMÍNGUEZ

© INGELA IHRMAN

© PATRICIA DOMÍNGUEZ

jetivo principal de recontextualizar el legado de las grandes expediciones científicas del siglo XVIII. La exposición pone de manifiesto además que una nueva forma de entender la relación entre el ser hu-

mano y el mundo vegetal es posible a través del arte, gracias a la colaboración de los artistas Ingela Ihrman (desde Suecia), Eduardo Navarro (de Argentina) y la chilena Patricia Domínguez.

LIBROS

Cómo evitar un desastre climático

Bill Gates

Plaza y Janés, 2021, 318 páginas, 21,90 euros

El cambio climático según Bill Gates

Que una de las mayores fortunas del mundo se preocupe por el cambio climático es, sin duda, una buena noticia. Y que ponga su dine-



ro para combatirlo, mejor. Si, además, escribe un libro a la vez amable e implaca-

ble para concienciar al mundo tanto de los riesgos como de la necesidad de actuar, mejor que mejor. Bill Gates analiza el funcionamiento de los sectores económicos y sociales más emisores —energía, transporte, construcción, infraestructuras— y propone diversas maneras para convertirlos en neutros en la emisión de gases de efecto invernadero. Sin perder de vista las injusticias del desequilibrio

mundial, estudia para cada caso el coste de la prima verde, la diferencia entre hacerlo como hasta ahora y sin emisiones. Confiando en la tecnología —sin ella no será posible, pero solo con tecnología, tampoco— propone políticas, actitudes, comportamientos y reflexiones para que, en 2050, y más allá, el mundo pueda seguir siendo un lugar habitable para los humanos. |

Antonio Calvo Roy

Panorama

El presidente del CSN comparece en el Congreso sobre las presiones recibidas para la aprobación del proyecto minero de uranio de Retortillo (Salamanca)

José María Serena i Sender compareció el 12 de abril en la Comisión para la Transición Ecológica y Reto Demográfico del Congreso de los Diputados con el fin de informar sobre las presiones que el regulador ha estado recibiendo durante los úl-

cedentes de distintas entidades relacionadas con la empresa minera australiana Berkeley. Serena i Sender apuntó que resultaba conveniente para el CSN hacer llegar la realidad de estas misivas y rendir cuentas con la Comisión, ya que “la

diciembre de 2020), de la World Federation of Investors o WFI (31 de diciembre de 2020) y, por último, de la directora ejecutiva de la Asociación Española de Accionistas Minoritarios de Empresas Cotizadas o AEMEC (7 de enero de 2021).

En estos documentos se realizaron, según informó Serena i Sender, “alusiones improcedentes” tales como asegurar que el CSN toma sus decisiones atendiendo a criterios políticos y no técnicos, o que la Ley de Cambio Climático y Transición Energética es ‘manifiestamente ilegal’ y que, de no pronunciarse el CSN previamente a la aprobación de esta, se reclamarían cuantas posibilidades ampare el Estado de Derecho español. Además, según notificó el presidente del Consejo, en las cartas se insistía en que el regulador precise cuándo se tomará finalmente la decisión de convocar al Pleno del CSN

timos meses con respecto al proyecto minero de la empresa Berkeley, a través de escritos cuyo contenido se estima que pretende coaccionar al CSN para agilizar el permiso para el proyecto de puesta en marcha de una planta de uranio en Retortillo (Salamanca).

El pasado 26 de enero, el presidente del Consejo remitió una carta al presidente de la Comisión para la Transición Ecológica en la cual se informaba sobre las presiones que el regulador había estado recibiendo mediante cinco cartas pro-

independencia, la credibilidad y el buen quehacer técnico e institucional del organismo que presido deben quedar fuera de toda duda”.

Los documentos descritos por el presidente del CSN corresponden a cinco misivas, en concreto: una procedente del director general de Energía y Minas de la Junta de Castilla y León (con fecha 8 de julio de 2019), otra del presidente ejecutivo de Berkeley en España (16 de octubre de 2020), de un despacho de abogados contratado por Berkeley (10 de

para la emisión del informe de la planta en Retortillo. Serena i Sender destacó en su comparecencia que “la misión legalmente encomendada al Consejo es la de garantizar la protección de los ciudadanos, los trabajadores y el medio ambiente frente a los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes”, y que la competencia de autorizar o no la construcción de una planta de procesados de uranio en Salamanca corresponde exclusivamente al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.





Nuevo acuerdo de colaboración entre el CSN y la Sociedad Española de Protección Radiológica

El presidente del Consejo, Josep María Serena i Sender, y el de la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR), Ricardo Torres Cabrera, suscribieron el 9 de marzo un acuerdo que permitirá a ambas entidades aprovechar el conocimiento y las experiencias acumuladas por cada uno de los organismos con el fin de formar e informar en materia de protección radiológica, así como fomentar actividades relacionadas con la misma. Según este acuerdo de colaboración, el intercambio de información entre el CSN y la SEPR tendrá lugar mediante reuniones, sesiones y jornadas. Para la realización de acciones concretas se negociarán convenios específicos, contemplados en el acuerdo general. Esta colaboración estrecha lazos entre ambas entidades, que ya han mantenido una relación regular, que en 2014 dio lugar a la creación de la plataforma nacional de I+D en protección radiológica (PEPRI) por parte de la SEPR. El CSN participa en ese foro como organismo regulador y representante del cuerpo técnico, el cual preside la plataforma en la actualidad.

Reuniones de encomiendas de funciones en Navarra, Murcia, Asturias y Cataluña

El CSN ha celebrado durante los meses de febrero y marzo y de manera virtual las reuniones de encomienda de funciones con las comunidades de Navarra, Murcia, Asturias y Cataluña. La realización de funciones de inspección y control durante la pandemia en las distintas instalaciones radiactivas centró el interés de los encuentros. Estos acuerdos de colaboración se refieren a instalaciones de segunda y tercera categoría y a sus funciones en los ámbitos de investigación, diagnóstico y tratamientos médicos, usos industriales de fuentes y equipos radiactivos e instalaciones que utilicen aparatos de rayos X, así como a la inspección de transportes con material radiactivo. En todas las reuniones se destacó la buena ejecución de estas funciones pese a la situación vivida durante los últimos meses y a la necesidad de llevar a cabo ciertas tareas de forma telemática. El objetivo de los acuerdos de encomienda es conseguir una mejor ejecución de las funciones propias del CSN utilizando las capacidades de las comunidades autónomas, prestando, por lo tanto, a los administrados y a la sociedad en su conjunto un servicio más eficaz y aproximando los órganos administrativos a los ciudadanos.



El Consejo asiste a la primera Conferencia de Información Reguladora virtual

El CSN ha participado este año en la trigésima tercera Conferencia de Información Reguladora (RIC), cele-

brada entre el 8 y el 11 de marzo, organizada por la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos (NRC por sus siglas en inglés), que en esta ocasión y a causa de la pandemia ha tenido que desarrollarse, por vez primera, de forma virtual. A los distintos encuentros de la RIC han asistido, como representantes del CSN, el presidente y consejeros del mismo,

así como algunos otros miembros del Consejo. Además de cuestiones relacionadas con la situación actual y aspectos técnicos, el presidente de la NRC Christopher T. Hanson destacó la importancia de la transparencia y la comunicación con el público, vitales en el sector nuclear para mantener la confianza de la sociedad en los organismos reguladores.



El presidente destaca en la Asamblea General de la AMAC el compromiso con la transparencia

Josep María Serena i Sender, presidente del CSN, protagonizó la clausura de la Asamblea General de la Agrupación de Municipios en Áreas de

Centrales Nucleares y almacenamiento de residuos radiactivos (AMAC) en una jornada celebrada vía telemática el pasado 18 de marzo. El presi-

dente ha destacado la función que el Consejo realiza con respecto a la formación en materia de seguridad de las instalaciones nucleares, una obligación contemplada en el propio Estatuto del CSN y que tiene por finalidad informar y formar a la población, al Gobierno y al Parlamento, así como a los entes autonómicos y a la AMAC. Con respecto a esta labor informativa, Serena i Sender señaló que “La buena comunicación y la transparencia deben ser nuestras banderas insignia”. Fruto de la relación entre el Consejo y la AMAC surgieron los comités locales de información, que cuentan con la presencia del regulador tanto en reuniones como en jornadas divulgativas de puertas abiertas. ▶

Encuentro del OIEA sobre el impacto de la pandemia en los reguladores de Latinoamérica

Una delegación del Consejo de Seguridad Nuclear, encabezada por la consejera Elvira Romera, participó el 18 de marzo en una reunión de expertos internacionales organizada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) sobre el impacto que la pandemia ha causado en la actividad de los órganos reguladores latinoamericanos. Durante el encuentro, que se celebró de forma telemática, la consejera expuso la experiencia vivida por el CSN durante la pandemia y las medidas llevadas a cabo por el organismo, destacando la efectividad del teletrabajo y de las inspecciones virtuales. En cuanto a las dificultades presentadas a causa

de la situación generada por la covid-19, todos los asistentes han coincidido al señalar el acceso a las instalaciones, la falta de infraestructuras para realizar conexiones remotas, el transporte de fuentes y la seguridad física como principales inconvenientes. ▶

Comités de información en Trillo, José Cabrera, Garoña, Ascó y Cofrentes

Durante los meses de enero, febrero y marzo han tenido lugar comités de información local en los entornos de las centrales nucleares de José Cabrera (Guadalajara, el 20 de enero), Trillo (Guadalajara, el 3 de febrero), Santa María de Garoña (Burgos, el 20 de febrero), Ascó I y II (Tarragona, el 23 de febrero) y Cofrentes (Valencia, el 10 de marzo). Todos los comités se han llevado a cabo de manera telemática y han contado, en todos los casos, con la presencia del subdirector general de Energía Nuclear del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), José Manuel Redondo, y con representantes del Consejo de Seguridad Nuclear. Los comités de información local, conforme a lo dispuesto en el artículo 13 del Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas (RINR), tienen por objeto informar a las distintas entidades de la zona y a la población sobre el desarrollo de las actividades reguladas, así como tratar de forma conjunta las cuestiones que resulten de interés para todos. ▶





Resultados del Sistema Integrado de Supervisión de Centrales en 2020

El 26 de abril se dieron a conocer los resultados del Sistema Integrado de Supervisión de Centrales (SISC) correspondientes al cuarto trimestre de 2020 y también los del año

2020 completo. De forma global, a lo largo del pasado año se realizaron 71 inspecciones a las centrales nucleares y se identificaron 86 hallazgos de inspección, clasificados todos con el color verde. Todas las centrales se mantuvieron dentro de la columna de “respuesta del titular” en la matriz de acción, a excepción de la central nuclear de Trillo (Guadalajara), que en el primer trimestre se encontró en la columna de “respuesta reguladora” debido a un hallazgo de inspección del segundo trimestre de 2019 que fue categorizado como blanco, es decir “de baja o moderada importancia”, que permanecen en el sistema cuatro trimestres desde su entrada en el mismo. En los posteriores trimestres de 2020 la central volvió a la columna de “respuesta del titular”. Teniendo en cuenta los resultados, el CSN ha concluido que no es necesario adoptar ninguna acción adicional a las establecidas por los titulares en ninguna de las centrales.

Los resultados trimestrales, el histórico y los detalles sobre el funcionamiento del SISC pueden ser consultados en la web del Consejo: <https://www.csn.es/sisc/index.do>.



Jornada de la SNE sobre las centrales nucleares durante el año pasado

El CSN, representado por el consejero Javier Dies, participó en la clausura de la 32ª Jornada de la Sociedad Nuclear Española (SNE) que este año ha tenido como tema principal Las centrales nucleares en 2020. Experiencias y perspectivas. Dies recorrió los hitos desempeñados por el Consejo en 2020 sobre los aspectos tratados en esta jornada, destacando los exhaustivos procesos de evaluación llevados a cabo por el regulador sobre las solicitudes de renovación de las autorizaciones de explotación

de las centrales nucleares Almaraz I y I y Vandellós II. El consejero también mencionó la reciente apreciación favorable para la renovación de la autorización de explotación de Co-frentes, así como los procesos de licenciamiento que actualmente se encuentra en curso, como la autorización de construcción de una mina de uranio en Retortillo (Salamanca), la autorización de explotación de Ascó I y II y otros aspectos relacionados con la gestión del combustible gastado.

WENRA aborda los niveles de referencia en seguridad y su armonización

El consejero Javier Dies y el director de Seguridad Nuclear, Rafael Cid, representaron al CSN en la reunión de la Asociación Europea de Reguladores Nucleares

(WENRA), celebrada telemáticamente los días 13 y 14 de abril. El presidente de WENRA, Olivier Gupta propuso actividades para asegurar la consistencia de los niveles de referencia en seguridad, incrementando la interacción entre los grupos integrantes de WENRA. En la reunión se analizaron las especificaciones técnicas asociadas a la próxima revisión temática de seguridad según la Directiva de Seguridad Nuclear, que deberán completarse en los siguientes cuatro años y según la cual tendrán que aplicarse los niveles de seguridad en cualquier instalación nuclear. El CSN participará en la definición de dichas especificaciones técnicas como representante de España a nivel técnico. Dies apeló a la necesidad de la neutralidad tecnológica al definir los objetivos de seguridad, lo cual debería posibilitar la utilización de combustible tolerante a accidentes y al incremento de enriquecimiento. También informó de la existencia de una empresa española que participa en el diseño de la tecnología de reactores modulares pequeños.

Principales acuerdos del Pleno

Renovación de la autorización de explotación en la central nuclear Cofrentes

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear aprobó por unanimidad en su reunión telemática del 17 de febrero informar favorablemente la solicitud de renovación de autorización de explotación de la central nuclear Cofrentes, en Valencia. El informe será remitido al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, órgano competente para autorizar la renovación, según establece el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas o RINR en el 23º artículo. La solicitud contempla un periodo de explotación de nueve años y medio, por lo que la central podría seguir funcionando de forma efectiva, si la solicitud es aprobada por el Ministerio, hasta el 30 de noviembre de 2030. El Consejo ha fundamentado su decisión en el correcto funcionamiento de la central, el mantenimiento a un nivel adecuado de la seguridad de la misma y en la constatación de una respuesta adecuada del titular a los requisitos normativos aplicables. La evaluación favorable del CSN contempla diversas propuestas de mejora de la seguridad, en gran medida identificadas en la Revisión Periódica de la Seguridad (RPS). En concreto, el informe favorable está condicionado al cumplimiento de cinco Instrucciones Técnicas Complementarias. La central nuclear de Cofrentes cumplirá 40 años de operación en 2024, entrando por tanto en la denominada Operación a Largo Plazo (OLP) a partir de entonces. El Pleno también informó favorablemente el Plan de Gestión de Residuos Radiactivos y del Combustible Gastado

asociado a dicha operación a largo plazo. Una vez aprobado, constituirá la revisión 11 de dicho Plan.

El CSN autoriza la primera instalación de rayos X para la esterilización de sangre

En su reunión del 17 de marzo, celebrada telemáticamente, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear aprobó autorizar la primera instalación radiactiva dedicada a esterilización de sangre, antes de ser transfundida, mediante un equipo de rayos X. La solicitud fue presentada por el Banc de Sang i Teixits del Servei Català de la Salut, en Barcelona, que pasará a disponer en sus instalaciones del primer equipo de esterilización de estas características que se instale en España. Este sistema supone un menor riesgo que las técnicas de esterilización de sangre aplicadas hasta ahora.

Modificación del diseño de una compuerta de ventilación en la central nuclear Trillo

El pasado 3 de marzo y mediante videoconferencia el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear informó favorablemente, con condicionamiento expreso, la solicitud del titular de la central nuclear Trillo (Guadalajara) para la modificación de diseño de varias compuertas de ventilación, así como su correspondiente actualización en el Estudio de Seguridad. La desclasificación de estas compuertas, categorizadas como estancas en el Estudio de Seguridad, supondría la no realización de pruebas de fugas periódicas, requeridas por la Instrucción Técnica Complementaria 14, asociada a la autorización de explotación de la central. La evalua-

ción de la Dirección de Seguridad Nuclear contempla esta desclasificación siempre que se cumplan las medidas compensatorias comprometidas por el titular.

Programa de protección contra incendios de Almaraz

El Pleno del CSN informó favorablemente, en su reunión del 24 de febrero, la propuesta presentada por el titular de la central nuclear Almaraz (en Cáceres), quien solicitaba un cambio en las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento de la unidad II, relativas a las válvulas de aislamiento de la contención. Este cambio implica la actualización de las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento tras la modificación del sistema contraincendios del edificio de contención, que se implantará en la próxima recarga de la unidad II, por la que se anula el suministro a contención de agua contraincendios desde el sistema de agua desmineralizada, pasando a conectar la actual acometida al propio sistema de protección contraincendios.

Por otro lado, en su reunión telemática del 10 de marzo, el Pleno informó favorablemente la solicitud presentada por el titular de la misma central sobre requisitos del programa de protección contra incendios, incluidos en la Instrucción de Seguridad IS-30, para que se pueda considerar el cumplimiento equivalente del artículo 3.2.2 de dicha Instrucción, en lo relativo al conjunto de estructuras, sistemas y componentes importantes para la seguridad en caso de incendio, con lo establecido en el Análisis de Riesgo de Incendios (ARI) que se llevó a cabo conforme a la norma NFPA-805.



Publicaciones



La Metodología de Análisis de Causa Raíz MORT (Management and Oversight Risk Tree). Propuesta de Modernización y Adaptación a la Realidad Española
Colección Otros Documentos
43.2020



Guía de Seguridad 10.10 (Rev. 1)
Cualificación y certificación de personal
que realiza ensayos no destructivos



Instrucción IS-44, sobre requisitos de planificación, preparación y respuesta ante emergencias de las instalaciones nucleares

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: 91 346 05 58 / peticiones@csn.es

La información facilitada por usted 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.

Abstracts

REPORTS

6 Radiations for a sustainable world

The United Nations 2030 Agenda consists of 17 Sustainable Development Goals (SDG), at least nine of which might benefit from the use of nuclear and radiological technologies allowing for the production of energy without the emission of greenhouse gases, for the sterilisation of insects causing plagues or spreading disease, the eradication of tumours, the conservation of foodstuffs and the disinfection of closed spaces, among other things.

12 The miracle of new vaccines

Immunity as a means of eradicating disease is not a novelty resulting from the current pandemic; what is, however, is the fact that in just a few months it has been possible to develop several vaccines to combat covid-19; some of them based on biological mechanisms not used to date that offer new ways of responding to the coronavirus and to possible future infections.

34 The telescope of the poets

Under the ice of the South Pole, at a depth of between 1,500 and 2,540 metres, is installed a gigantic neutrino detector whose specific mission is to track these ghostly particles, which are hardly able to interact with matter. The device in question is known as IceCube and is made up of more than 5,000 light sensors that take advantage of the pristine Antarctic ice to detect the footprint of these elusive interstellar travellers, which have been passing through the Earth since the dawn of the universe.

41 Interactome, the social medium of proteins

Interactome is the name given to the map that traces the molecular interactions that take place between human proteins inside cells. Following the sequencing of the human genome and the proteome, the interactome now opens a window onto the study of cell behaviour from a new perspective, which will allow diseases to be understood and new treatments to be found through the application of new nanotechnology and biomedical techniques.

55 Light that is invisible to the eye but not to the skin

The fact that light is not only made up of what the human eye is capable of seeing implies a number of things, among them that the universe is much more colourful than what we perceive, and that

technology can see and exploit what is beyond the visible spectrum. Ultraviolet light in particular provides for very curious applications, such as the study of the cosmos, the treatment of skin diseases or the elimination of pathogens in public spaces by means of certain types of radiation, as has been the case for the prevention of infection during the pandemic.

RADIOGRAPHY

26 Requests for CSN licences

People who work at radioactive and radiodiagnosis facilities require a licence issued by the CSN. Explained here are the steps to be adhered to in order to obtain such a licence.

INTERVIEW

28 Pilar Lucio Carrasco, CSN counsellor

"Improving communication with the general public and the information provided is one of the Council's main challenges".

TECHNICAL ARTICLES

18 New requirements in 2021 on the transport of radioactive material

As a result of the changes made in the 2018 edition of IAEA standard SSR-6, significant modifications to the requirements relating to the transport of radioactive material are coming into force in Spain in 2021. These novelties are applicable mainly to the concept of radiation levels, to the testing of BAE-III materials and packages, as regards both labelling and transport, and to large contaminated objects. Transport in the nuclear sector is the area most affected by these new requirements.

47 Radiological protection in hospitals during the pandemic

The pandemic has posed a challenge for hospitals across the country, and especially for services such as Radiotherapy Oncology, Medical Physics and Radiological Physics. A number of healthcare professionals explain here the difficulties they have had to overcome in recent months, from the treatment of high-risk patients to the cleaning and disinfection of radiological specimens and including remote working, worker and area dosimetry and the pressure brought to bear on intensive care and resuscitation units.



Video visita guiada al Centro de Información del CSN

Debido a la suspensión de las visitas al Centro de Información del Consejo de Seguridad Nuclear, derivado de la situación creada por la covid-19, el CSN ha elaborado un vídeo simulando una visita guiada por la instalación de unos 25 minutos de duración, a la que se puede acceder a través del siguiente enlace: <https://www.csn.es/video-visita-guiada>

También se puede acceder a los diferentes módulos de la exposición a través del canal del CSN en YouTube.

YouTube

