



El auge de los radioisótopos en medicina

Del laboratorio a la mesa: mejorar la salud humana y ambiental a través de la alimentación

Nuria Oliver, directora de ELLIS Alicante: “Necesitamos la inteligencia artificial para sobrevivir como especie”

El plan de restauración del emplazamiento y su aplicación a la central nuclear José Cabrera



Trabaja con nosotros

El CSN convoca nuevas plazas para el cuerpo de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica.

Más información en www.csn.es



El auge de los radiofármacos

La demanda de radioisótopos para su uso en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades (principalmente, el cáncer) crece de manera persistente y regular en todo el mundo. Pueden utilizarse directamente o unidos a una sustancia terapéutica, formando lo que se denomina radiofármacos y sus indicaciones se amplían. Algunos de estos radionúclidos se producen de forma artificial en reactores nucleares y otros en ciclotrones, pero son pocos los países que los generan, por lo que urge garantizar la seguridad de suministro incrementándose el número de productores. Según el OIEA se dedican a la producción de isótopos con fines médicos tan solo 25 reactores de todo el mundo, destacando Canadá y Países Bajos, junto a unos 1.300 ciclotrones, pero será necesario incrementar estas cifras para atender la creciente demanda. En este número de *Alfa* dedicamos un reportaje a este tema.

Otro reportaje está dedicado a las convenciones internacionales dentro del mundo nuclear y radiológico, donde juegan un papel importante. Estos acuerdos fueron creados para armonizar y homogenizar al alza los criterios aplicados por parte de la mayor cantidad posible de países. Impulsados por el OIEA, el desarrollo y aplicación de estos acuerdos se va actualizando mediante las reuniones periódicas de los países e instituciones firmantes.

En este número de *Alfa* también se aborda la producción alimentaria. Su desarrollo depende cada vez más de los laboratorios de investigación, de donde proceden alimentos con efectos beneficiosos para la salud y otros más respetuosos con el medio ambiente, como la carne cultivada. A través de otro reportaje de la revista descubrimos la ciencia ficción del siglo XXI y cómo la rapidez con la que la tecnología cambia la realidad hace que las propuestas surgidas

Según el OIEA es necesario aumentar el número de productores de isótopos con fines médicos para garantizar el suministro ante la creciente demanda

de la imaginación se queden con frecuencia obsoletas enseguida. Analizamos también el fenómeno de la ciencia ciudadana, la creciente implicación de la sociedad en los proyectos de investigación y la participación en su desarrollo. El pasado mes de junio el Consejo de Seguridad Nuclear acogió una jornada centrada precisamente a este tema. Por último, dedicamos a Severo Ochoa, el

segundo premio Nobel español en apartados científicos, dentro de la sección Ciencia con nombre propio. Se recoge su trayectoria, sus aportaciones esenciales y su influencia en el desarrollo de la ciencia española.

La Entrevista en este número recoge las opiniones de Nuria Oliver, directora de la Fundación ELLIS Alicante, un centro de investigación sobre inteligencia artificial (IA) y sociedad que forma parte de la red europea ELLIS, formada por instituciones de excelencia en este ámbito. Aun reconociendo los riesgos que la rápida expansión de la IA supone, considera que su desarrollo y aplicación es imprescindible para afrontar los retos que tiene ante sí la humanidad.

Entre los apartados más técnicos de la revista, la sección Radiografía aborda los efectos de las radiaciones sobre las mujeres gestantes, a partir del documento informativo que el CSN publicó el año pasado sobre embarazo y radiación. Un artículo técnico se aproxima al análisis de accidentes mediante la descripción de las metodologías BEPU (Best Estimate Plus Uncertainties). El otro trata de los planes de restauración de emplazamientos nucleares y su aplicación concreta a la central nuclear José Cabrera. Por último, la sección CSN I+D, recoge un proyecto de la Universidad de Santiago de Compostela sobre la comunicación de riesgo. En concreto la percepción pública y la información ciudadana sobre el radón. 

ALFA

Revista de seguridad nuclear
y protección radiológica
Editada por el CSN
Número 56
Diciembre 2023



Comité Editorial

Juan Carlos Lentijo Lentijo
Pilar Lucio Carrasco
Francisco Castejón Magaña
Elvira Romera Gutiérrez
Teresa Vázquez Mateos
Javier Zarzuela Jiménez
Ignacio Martín Granados
J. Pedro Marfil Medina
Ignacio Fernández Bayo

Comité de Redacción

J. Pedro Marfil Medina
Natalia Muñoz Martínez

Vanessa Lorenzo López
Adriana Scialdone García
Arturo Fernández García
Verónica Crespo Val
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, Alamy,
DepositPhotos, iStock.

Impresión

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

Fotografía de portada

Fabricación de radiofármacos.

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 El auge de los radioisótopos en medicina

La demanda de radionúclidos con fines diagnósticos y terapéuticos se está incrementando en todo el mundo. Son elementos producidos en reactores nucleares o en ciclotrones y su producción está restringida a unos pocos países, lo que amenaza con problemas futuros para atender toda la creciente demanda.

11 Un viaje por la ciencia ficción en el cine del siglo XXI

La tecnología actual avanza con tal rapidez que las pretensiones de la ciencia ficción por describir el futuro se ven superadas rápidamente por una realidad que corre mucho más deprisa que en los tiempos de Julio Verne e incluso se adelanta a la imaginación.



33 Del laboratorio a la mesa

La ciencia investiga alternativas alimentarias para mejorar la salud humana y medioambiental. Nuevas fuentes de proteínas, superalimentos que ayudan al organismo, dietas genéticamente personalizadas. Uno de los avances más prometedores es la carne cultivada para sustituir a la ganadería.

38 Compromisos internacionales para garantizar un mundo nuclear y radiológico más seguro

El OIEA ha impulsado en las últimas décadas numerosas convenciones internacionales en diferentes aspectos de la seguridad tecnológica y física del ámbito nuclear, con el objetivo de conseguir los mayores niveles de seguridad global posibles.



52 Ciencia ciudadana: el abrazo de la sociedad y la investigación

Cada vez se presentan más proyectos de investigación que contemplan la posibilidad de que los ciudadanos participen en todo el proceso de su desarrollo. Es una manera de incrementar el interés y la valoración de la investigación científica por parte de la sociedad e incluso realizar tareas que serían inviables de otra manera.

57 Severo Ochoa: La emoción de descubrir

El segundo español premiado con un Nobel en materias científicas transitó la evolución de la biomedicina desde la histología hasta la biología molecular. Entre sus numerosas aportaciones destacan sus trabajos en bioquímica, su aportación al desciframiento del código genético y la síntesis de ácidos nucleicos en laboratorio, que le valió el premio.

RADIOGRAFÍA

24 Embarazo y radiación. ¿Qué necesito saber?

Muchas mujeres gestantes deben exponerse a radiaciones ionizantes por causas médicas. Para facilitarles información adecuada sobre el tema, el CSN editó en 2022 un documento explicativo.

ENTREVISTA

26 Nuria Oliver, directora de la Fundación ELLIS Alicante

“Necesitamos la inteligencia artificial para sobrevivir como especie, para afrontar los retos del siglo XXI”

ARTÍCULOS TÉCNICOS

17 Una descripción de las metodologías BEPU de análisis de accidentes

El análisis determinista de seguridad se centra en la simulación computacional a partir de cálculos realizados con modelos predictivos con magnitudes físicas cuyos resultados están afectados por incertidumbres. Para el análisis de estas incertidumbres se utilizan metodologías BEPU (best estimate plus uncertainty).

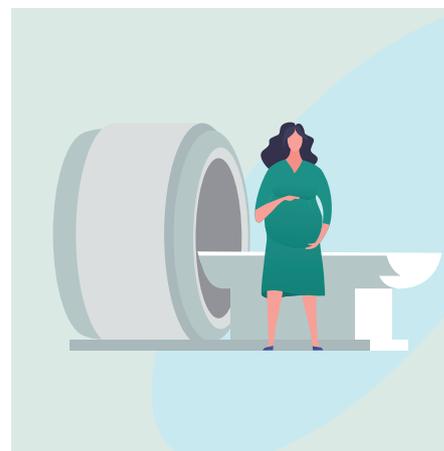
42 El plan de restauración del emplazamiento y su aplicación a José Cabrera

El desmantelamiento de una instalación nuclear tiene como objetivo que el terreno sea radiológicamente seguro para las personas y el medio ambiente y pueda destinarse a cualquier otra actividad. Para ello se elabora un plan de restauración y en este artículo se describen las acciones que conlleva y su aplicación en el caso de la central nuclear José Cabrera.

CSN I+D

50 Periodismo y opinión pública en la comunicación de riesgo: el caso del gas radón

Desde la Facultad de Ciencias de la Comunicación de la Universidad de Santiago de Compostela están llevando a cabo un estudio para conocer la percepción pública de los riesgos asociados al radón y las estrategias de comunicación para mejorar el conocimiento de la ciudadanía del problema.



63 **Reacción en cadena**

70 **Publicaciones**

67 **Panorama**

71 **Abstracts**



Se incrementa la demanda de radionúclidos tanto con fines diagnósticos como terapéuticos

El auge de los radioisótopos en medicina

El auge de la medicina nuclear en el diagnóstico y tratamiento del cáncer ha hecho aumentar la demanda de radioisótopos. Estos elementos son obtenidos de forma artificial en reactores nucleares o en ciclotrones. Sólo 25 reactores en todo el mundo, como los de Canadá o Países Bajos, se destinan a la producción de isótopos con fines médicos, mientras que unos 1 300

ciclotrones, según datos del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), operan en más de 100 países. Los expertos prevén que las posibilidades de la medicina nuclear seguirán en aumento en el futuro y que garantizar la seguridad de suministro de radioisótopos será indispensable para su evolución.

■ Texto: **Noemí Trabanco** | periodista de ciencia ■

La medicina nuclear debe su nombre a la utilización de isótopos radiactivos o radionúclidos para el diagnóstico y tratamiento de diversas patologías, especialmente del cáncer. Los radioisótopos son formas inestables de elementos químicos que, para llegar a una forma más estable del átomo, emiten radiación. En medicina normalmente van unidos a determinadas moléculas, conformando así

los radiofármacos. Uno de los usos más generalizados en medicina es en el diagnóstico por imagen a partir de esa radiación emitida. La unión del radiofármaco a moléculas específicas de la patología permite a los profesionales médicos detectar las regiones afectadas. En otros casos, estos radiofármacos pueden servir, por ejemplo, para eliminar células tumorales, como es el caso de la teragnosis. Estas

pequeñas dosis de radiactividad son prácticamente inocuas para los pacientes y apenas causan efectos secundarios.

Dependiendo del radionúclido, estos pueden emitir diferentes tipos de radiación: alfa, beta o gamma. Las radiaciones alfa y beta son muy potentes y no recorren mucha distancia, por lo que son principalmente utilizadas en tratamiento de pacientes, para dañar y matar células tu-

morales. La radiación gamma alcanza mayor distancia y es utilizada para diagnóstico por imagen. Estas imágenes se obtienen por tomografía computarizada o TAC o mediante técnicas más novedosas como la tomografía por emisión de positrones (PET) y la tomografía computarizada por emisión de un solo fotón (SPECT). En los últimos años los procedimientos de medicina nuclear se han incrementado, especialmente debido a los avances en teragnosis en casos de cáncer avanzado, lo que supone también un aumento de la demanda de radioisótopos con fines médicos.

Radioisótopos en medicina nuclear

“En medicina nuclear el 85 % de nuestra actividad es el diagnóstico por imagen, aunque con el auge de la teragnosis esto va a cambiar y habrá un mayor peso de la parte de tratamiento. En ambos casos necesitamos radiofármacos, con diferentes tipos de isótopos radiactivos”, explica el doctor Diego Becerra, jefe de Medicina Nuclear del Hospital Clínico San Cecilio (Granada) y presidente de la Sociedad Española de Medicina Nuclear e Imagen Molecular (SEMNUM). “El principal campo de nuestro servicio es el oncológico, pero también tiene una gran importancia en cardiología, para la valoración del infarto de miocardio o la angina de pecho; en nefrología, para la valoración de la función renal; o en neurología, para la función cognitiva. Especialmente en este último caso se va a producir un salto al estilo de la teragnosis, ya que van a aparecer alternativas terapéuticas”, explica Becerra. “Y también se utiliza en patología benigna, como en traumatismos o degeneración articular, entre otras. Las aplicaciones son muchísimas”. Otros radiofármacos basados en el bombardeo de partículas en los tejidos diana son los utilizados para el tratamiento del dolor óseo en etapas tardías de metástasis del tumor en el hueso, conocidos como agentes paliativos de dicho dolor,



Diego Becerra.

así como fármacos radiactivos utilizados para tratar el dolor en articulaciones, causado por enfermedades inflamatorias, conocido como radiosinovectomía.

El crecimiento de estas aplicaciones es ya patente en las unidades de medicina nuclear, donde los profesionales están sufriendo la sobrecarga de los servicios. Los hospitales españoles se han ido preparando, en parte, para este crecimiento. Casi todos cuentan con equipos PET. “Gracias

al Plan INVEAT se ha producido una renovación importantísima de los equipos, pasando a tener equipos PET digitales de primera”, explica Diego Becerra. “Aun así, nuestros servicios no están dimensionados para la actividad que ya existe y la que se prevé. La aparición de nuevos radiofármacos permitirá ampliar la aplicabilidad de los distintos procedimientos diagnósticos y terapéuticos. Las exploraciones de medicina nuclear se están situando a la cabeza a la hora de tomar decisiones sobre los pacientes, mientras que antes era más frecuente que se dejasen para casos más avanzados, en los que se habían agotado otras opciones”. Esto supondrá, por tanto, un aumento de la demanda de radionúclidos como el flúor-18, uno de los más utilizados en imagen PET.

Según el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), actualmente se producen unos 35 radioisótopos distintos con fines médicos. El más utilizado a nivel mundial es el molibdeno-99 (Mo-99) que, a su vez, permite la obtención de tecnecio-99m (Tc-99m), necesario en gammagrafía convencional. El OIEA calcula que este isótopo se utiliza en unos 50 millones de procedimientos al año en todo el mundo. El yodo-131 es otro de los isótopos ampliamente utilizados, tanto para diagnóstico como para tratamiento, en casos de cáncer de glándula tiroides, seguido



Planta de radiofármacos que la empresa Novartis tiene en La Almunia de Doña Godina (Zaragoza).

Proceso de producción de un radiofármaco

1
Se irradia uranio con haces de neutrones durante una semana en un reactor nuclear.



2
Durante el proceso químico se produce la separación del molibdeno del uranio.



3
Se obtiene Mo-99 de alta pureza.



4
El Mo-99 es depositado en el generador de Mo-99/Tc-99m y enviado a los servicios de medicina nuclear.



5
En el servicio, cuando es preciso, se realiza la dilución del generador, proceso que resulta de la separación del "radionúclido padre" (Mo-99) del "radionúclido hijo" (Tc-99m)



6
El Tc-99m es marcado con un fármaco que posee afinidades con el órgano que interesa examinar, pasando a ser llamado radiofármaco, el cual deberá ser administrado al paciente.



de otros, como el lutecio-177 (Lu-177), utilizado en teragnosis para el tratamiento de tumores neuroendocrinos y del cáncer de próstata. En España este último está a la espera de ser aprobado por la Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios. Tras su aprobación, se prevé que un gran número de pacientes puedan beneficiarse de esta terapia y, por tanto, un aumento de la demanda de este radioisótopo.

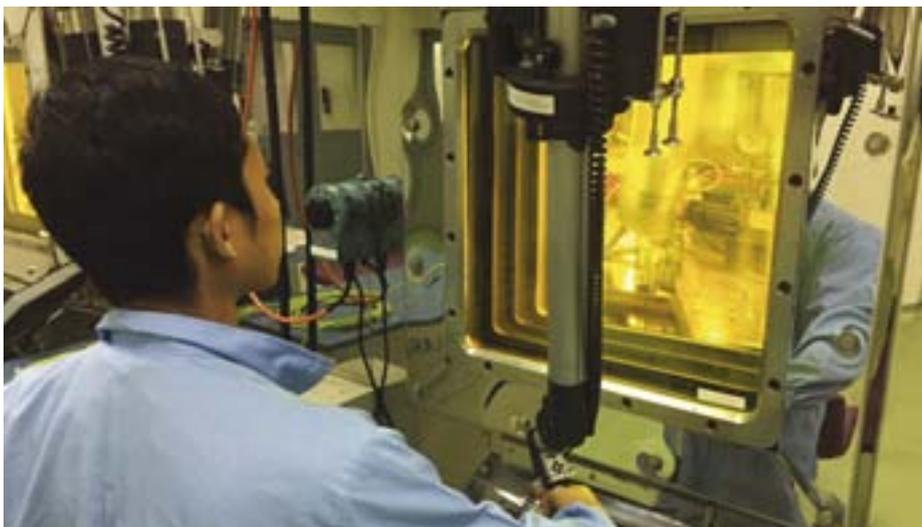
Producción de radionúclidos

Los isótopos radiactivos pueden producirse en dos tipos de infraestructuras: ciclotrones o reactores nucleares, mediante captura de neutrones o fisión. En la cap-

tura de neutrones el núcleo del elemento absorbe un neutrón, creándose así el isótopo radiactivo. En el caso de la fisión, la ventaja es que se pueden obtener muchos isótopos diferentes y, con un procesamiento adecuado, pueden obtenerse actividades específicas más altas. Un ejemplo de radioisótopo producido en reactores es el Mo-99, que tiene una vida útil relativamente larga. A partir de este, el Tc-99m puede ser producido en los propios hospitales en lo que se denominan generadores Mo-99/Tc-99m, que contienen el molibdeno. "En función de la actividad que tenga el servicio de medicina nuclear pueden llegar uno o dos generadores a la semana y nosotros vamos pro-

duciendo el tecnecio mediante un proceso de dilución", explica Diego Becerra.

Por su parte, los ciclotrones son aceleradores de partículas cargadas, generalmente iones de hidrógeno (es decir, protones) que chocan con el material utilizado como blanco y producen un nuevo elemento con propiedades radiactivas, que se utiliza en la obtención de radiofármacos para imagen PET. Estos isótopos tienen una vida media mucho más corta, lo que facilita la gestión de residuos radiactivos de los servicios, pero también supone que deban dispensarse al paciente en poco tiempo desde su producción. Por ello, contar con ciclotrones en los propios centros facilita el acceso a radionúclidos de las unidades de radiofarmacia. El galio-68, utilizado en teragnosis como trazador para diagnóstico por imagen, el flúor-18 y el yodo-123 son algunos de esos isótopos producidos en ciclotrón. En Europa "cuanto más al norte nos vamos, más común es que exista producción propia en los hospitales. Por esto, en algunos países europeos tienen acceso a radionúclidos a los que nosotros no tenemos porque son capaces de producirlos ellos mismos", señala Diego Becerra. Cuando los radionúclidos no se producen en el mismo lugar en el que se utilizan han de transportarse con mucha rapidez, debido a su corta vida útil. "Esto implica una logística muy precisa", añade



Instalación de fabricación de radioisótopos en Indonesia, propiciada por el OIEA.

Becerra. “En España ahora mismo solo existen ciclotrones en tres hospitales: la Clínica Universitaria de Navarra, Marqués de Valdecilla en Santander y el Infanta Cristina de Badajoz”, indica el doctor Iván Peñuelas, director de la Unidad de Radiofarmacia y de la Unidad de Investigación en Imagen Molecular Traslacional de la Clínica de la Universidad de Navarra. “Tener un ciclotrón propio o un generador de galio-68, nos ofrece cierta independencia con respecto a los productores comerciales. En este momento tampoco existen demasiados ciclotrones comerciales en España, pero la disponibilidad y la variedad de radiofármacos emisores de positrones, ha aumentado bastante a lo largo del tiempo”, explica Peñuela. “Es cierto que nos harían falta más ciclotrones, dado que el incremento del número de cámaras PET en nuestro país ha sido muy importante en los últimos años y hay un riesgo de que no podamos llegar a los pacientes porque



Iván Peñuelas.

no existan ciclotrones y laboratorios suficientes para sintetizar los radiofármacos PET necesarios. No obstante, esto requiere de una gran inversión, ya que los labora-

torios son extremadamente complejos y se necesita personal especializado, dado que no existen muchos radiofarmacéuticos en este momento en nuestro país”, añade.

Debido al auge de la medicina nuclear y la aparición de nuevas aplicaciones, diversas empresas farmacéuticas han creado líneas específicas para terapia con radio-ligandos. Una de esas empresas es Novartis, a través de la división ‘Advanced Accelerated Applications’, con la que ha desarrollado, entre otros, tratamientos utilizados para el cáncer de próstata metastásico y para tumores neuroendocrinos, denominados Pluvicto y Lutathera, respectivamente. “Los isótopos que utilizamos en nuestros radiofármacos se producen principalmente en Canadá, que cuenta con uno de los mayores reactores del mundo, y Países Bajos y posteriormente se envían a las instalaciones de Novartis, donde se unen a los ligandos específicos. Esos radiofármacos se someten a un control de calidad

Radiofarmacia hospitalaria

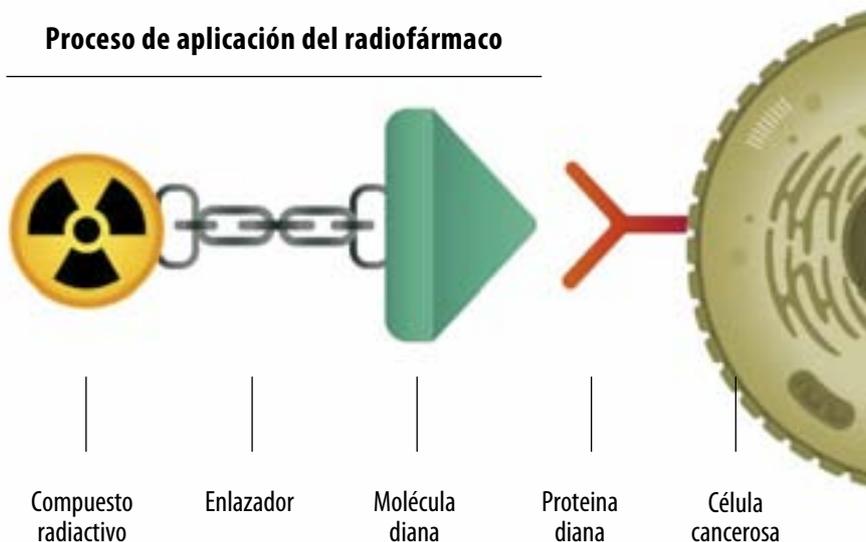
Las unidades de radiofarmacia son las que se encargan de preparar las dosis para cada paciente, que son totalmente personalizadas. “En función de los pacientes que hay cada día, los médicos hacen la prescripción y desde radiofarmacia se preparan los radiofármacos con la dosis correspondiente para cada uno de los pacientes. Hay algunos que se pueden preparar en viales multidosis y, por lo tanto, una única preparación puede utilizarse para varios pacientes y hay otros que necesariamente tienen que ser de monodosis”, explica Iván Peñuelas. “En el caso de radiofármacos para PET se preparan en las unidades de radiofarmacia o se reciben desde los laboratorios comerciales”, añade. La coordinación entre las unidades de radiofarmacia y medicina nuclear es indispensable, pues en muchos casos la vida útil de algunos radioisótopos es extremadamente corta (por ejemplo, 110 minutos para fármacos marcados con flúor-18). “Un retraso de 20 minutos puede suponer que la dosis que llega al paciente no es la adecuada”, expone Peñuelas.

En cuanto a la gestión de material radiactivo, cada centro hospitalario cuenta con sus protocolos de protec-

ción radiológica. Estos procedimientos han de estar validados por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), como también a la hora de autorizar instalaciones. “Una vez la instalación ya está autorizada y consolidada es siempre el inspector autonómico el que viene a realizar las inspecciones”, aclara Peñuelas. Lo cual es cierto en el caso de comunidades con las que el CSN mantiene acuerdos de encomienda de funciones.

La Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR) promueve también que las medidas de protección en estas unidades se optimicen mediante la celebración de jornadas y cursos, la formación de grupos de trabajo y la elaboración de protocolos. “También servimos de nexo entre instituciones, empresas de servicios, reguladores y profesionales, para la mejor coordinación entre ellos, persiguiendo siempre la mejora en las condiciones de protección radiológica de profesionales, pacientes y público en general”, explican desde la SEPR. “Hemos elaborado una guía sobre criterios de protección radiológica en instalaciones radiactivas médicas que puede servir de orientación a los servicios de protección radiológica de los hospitales para definir sus procedimientos”, añaden. ▀

Proceso de aplicación del radiofármaco



para garantizar su pureza y eficacia y, una vez comprobado, se prepara la dosis para la terapia dirigida, en forma de solución líquida para infusión en el paciente”, explican fuentes de la compañía en España. “Las dosis pasan por otra prueba de calidad antes de ser envasadas en contenedores especiales de plomo para su transporte a los centros de tratamiento, donde han de ser utilizadas en pocos días desde su fabricación”, añade. Entre sus centros de producción en diferentes países, la empresa cuenta con uno en La Almunia de Doña Godina (Zaragoza) y tienen previsto abrir una nueva planta en Salamanca. “Somos una de las farmacéuticas pioneras en el avance de este campo clínico y en impulsar la producción de medicina nuclear en España, como centro abastecedor para Europa y otras partes del mundo”, declaran.

Problemas de suministro

El OIEA estima que unos 25 de los 40 reactores de investigación que hay en el mundo están produciendo activamente radioisótopos con fines médicos. Generalmente esos radionúclidos son utilizados en el mercado del propio país. “Solo un pequeño número de países exporta a nivel regional o mundial y un número

aún más reducido lo hace en grandes cantidades”, explican desde el OIEA.

En cuanto a las necesidades de molibdeno de uso clínico, en Europa existen dos reactores de investigación de alta potencia: el HFR de Países Bajos y el BR2 en Bélgica, que son los primeros en abastecer de este compuesto a nivel mundial, junto con el Safari 1 de Sudáfrica y el OPAL de Australia. También Polonia y República Checa son productores en Europa. El problema de los reactores europeos es que la mayoría son viejos. “En 2022 estuvimos un mes sin suministro de molibdeno. Supuso un gran parón en los servicios a nivel global. Uno de los reactores tenía una parada programada y el que iba a compensar ese parón, se estropeó. El año anterior también hubo otro parón, aunque más corto”, dice Diego Becerra. Con las nuevas aplicaciones de la teragnosis, los profesionales también esperan un aumento importante de la demanda de Lu-177. “En este momento no hay problemas de disponibilidad, pero a medio plazo podríamos encontrarnos en una situación de carencia, aunque es pronto para prever esto”, explica Iván Peñuelas. “Hay dos vías de obtener Lu-177: a partir de iterbio-176 o del lutecio-176. La más común es la segunda, ya que el iterbio es un isótopo bastante raro

del que sí hay problemas de disponibilidad, aunque de la segunda forma se produce una actividad específica menor”, añade.

Países Bajos ha aprobado recientemente la construcción de un nuevo reactor, previsto para echar a andar en 2026, cuya misión principal será la producción de radioisótopos. Desde el OIEA expresan que no es necesario que existan reactores de investigación en cada país, pero sí que se necesita capacidad de respaldo para garantizar el suministro. Otros países también están considerando la posibilidad de construir nuevos reactores. En España, en abril de este año se dio a conocer que las empresas energéticas propietarias de las centrales nucleares de Almaraz y Trillo, junto con la empresa de origen francés Framatome, habían comenzado un proyecto para evaluar la viabilidad de producir Lu-177 en la de Trillo. Según fuentes de la central, a día de hoy se siguen realizando pruebas, aunque no existen aún resultados concluyentes sobre la viabilidad del proyecto.

El interés de los países en la utilización de la energía nuclear para estos fines es una realidad, debido precisamente a los avances de la medicina nuclear, lo que abre un debate sobre la necesidad de crear nuevos reactores nucleares o de dar nuevos usos a los ya existentes. “Desde el OIEA apoyamos a los estados miembros en los esfuerzos por aprovechar las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear, entre los que está la producción de radioisótopos con fines médicos, mediante publicaciones de orientación, la organización de reuniones técnicas y de proyectos de investigación colaborativos”, aclaran desde el organismo. Está claro que la medicina nuclear tiene un peso cada vez más importante en el manejo de casos clínicos en múltiples patologías y se espera que esto siga aumentando en los próximos años, por lo que la capacidad de los países para producir radioisótopos de uso clínico será una ventaja en el desarrollo de esta medicina del futuro. ©

Interstellar.

Un viaje por la ciencia ficción en el cine del siglo XXI

Cuando Georges Méliès llevó a los espectadores a la Luna a comienzos del siglo XX, el cine, un recién nacido, era casi visto como ciencia ficción en sí mismo, e hicieron falta 67 años más para que el hombre pusiera definitivamente el pie en nuestro satélite. En cambio, en el siglo XXI parece como si viviéramos ya en el futuro. Resulta fascinante mirar el último cuarto de siglo de películas de ciencia fic-

ción y ver cómo los cineastas intentan mantenerse un paso en el futuro ante una realidad que corre mucho más deprisa que en los tiempos de Julio Verne para atraparles y se acelera y a veces incluso adelanta a la imaginación. La ciencia ficción de nuestro tiempo poco tiene ya que ver con la del siglo XX.

■ Texto: **Sergio Ariza** | periodista ■

En 2013 Spike Jonze nos contaba en *Her* como un humano se enamoraba de una inteligencia artificial, y apenas diez años después, a comienzos de 2023 una empresa, Replika, ha tenido que desconectar algunos aspectos románticos y sexuales de su aplicación, porque muchos humanos estaban llevando un paso más

allá su relación con la IA, con algunos usuarios llegando a comentar que, cuando se produjo dicha desconexión, «fue el equivalente a estar enamorado y que tu pareja se someta a una maldita lobotomía».

Lo mejor que nos ha dejado el cine de ciencia ficción en el siglo XXI (hasta

el momento) ha sido aquel que ha conectado sus ideas futuristas con las preocupaciones reales y universales que tiene la humanidad hoy. Nuestro lugar en el universo, la ética de la tecnología, la inteligencia artificial y nuestra propia naturaleza que nos hace ser un peligro para nosotros mismos y para todo lo que vive



Fotogramas de *Origen*, *Olvidate de mí* y *Oppenheimer*.

y, al mismo tiempo, nos coloca como la última esperanza de salvación.

Y aunque puede resultar reductivo, he decidido hacer este repaso al mejor cine de ciencia ficción del siglo XXI agrupando las películas en cuatro grandes bloques: viajes en el tiempo, inteligencia artificial, futuros distópicos y viajes espaciales, aunque muchas de ellas puedan tocar varios, como una de las más interesantes de estos años, el *Interstellar* de Christopher Nolan que está localizada en un futuro distópico y casi apocalíptico, tiene viajes en el espacio y en el tiempo, y también cuenta con la inteligencia artificial de CASE y TARS.

Y es que Nolan es una de las principales figuras de la ciencia ficción en este siglo, si bien *Interstellar* es su obra más ambiciosa y fascinante (y nos servirá de guía), la más redonda puede que sea *Origen*, y su arquitectura de los sueños. Se trata de una montaña rusa onírica y emocional, en la que la perfección técnica está al servicio de las emociones y personajes que pueblan este mundo de sueños. Tras varios visionados (es imposible no querer volver a verla) el espectador se seguirá preguntando, cual moderno Segismundo: «¿Qué es la vida? Una ilusión, una sombra, una ficción, y el mayor bien es pequeño: que toda la



vida es sueño, y los sueños, sueños son». Claro que Nolan, al contrario que Calderón, ya ha visto cómo el potencial de las experiencias de realidad virtual iba aumentando y cómo un grupo de científicos ha explorado el uso de algoritmos de IA para descodificar y predecir el contenido de los sueños.

Inteligencia artificial

La inteligencia artificial (IA) se ha convertido en uno de los temas más discutidos en la tercera década del siglo XXI gracias a un desarrollo que no parece tener freno. Hasta el propio Nolan, que este año ha estrenado *Oppenheimer*, la convincente recreación de la vida del científico del título y del Proyecto Manhattan, ha hecho el paralelismo entre la bomba atómica y la IA, recordando una amenaza que ya se vislumbraba en uno de los clásicos rotundos de la ciencia ficción del siglo XX, *Terminator*, cuyo futuro distópico presentaba un futuro en el que máquinas inteligentes se rebelaban contra sus creadores y que en 2023 se ha convertido en una amenaza creíble, a la que los propios crea-

dores de IA piensan que hay que poner freno.

Claro que los avances en la inteligencia artificial son tan grandes que hacen que la maravillosa premisa de *¡Olvidate de mí!*, otra de las mejores películas de este siglo, rodada en 2003,

ya no suene tan lejana, y es que, si en *Origen* podíamos sumergirnos en sueños ajenos para implantar “ideas”, en la película de Michel Gondry, con maravilloso guion de Charlie Kauffman, podemos borrar recuerdos y personas de nuestra memoria. Así entre el genio visual de Gondry y el lírico de Kauffman construyen una de las más bonitas historias de amor del siglo, partiendo de una relación que se ha destruido. Pero ¿qué pasa si los recuerdos de esa relación son tan fuertes que se niegan a ser eliminados?

El resultado final es la reconstrucción de esa historia de amor en la mente del protagonista, mientras le va siendo arrebatada recuerdo a recuerdo. El estilo visual de Michel Gondry se adapta perfectamente al guion de Kauffman y consigue sacar, una vez más, un prodigio de actuación de Kate Winslet, algo que no parecía difícil, y de Jim Carrey, algo que un par de años antes de su realización casi todo el mundo hubiera tildado de, bueno ya saben, ciencia ficción.

Claro que otra de las grandes historias de amor del siglo ha sido la vivida entre el escritor de cartas personales a pedido Theodore Twombly (interpretado

con la solvencia habitual por Joaquin Phoenix) y una inteligencia artificial, dotada con la voz de Scarlett Johansson, en *Her*.

Tras este planteamiento, Jonze muestra la relación que existe entre hombre y tecnología, si estar más conectados nos hace sentirnos menos solos o no, el protagonismo cada vez mayor de esa tecnología en nuestra sociedad, en la que los humanos están cada vez más perdidos, a pesar de esa supuesta conectividad, incapaces de mantener relaciones unos con otros, pero sí con esa tecnología que es la que les mantiene aislados. Jonze, en su brillante doble rol como guionista y director, intenta también buscar respuestas sobre qué es el amor y por qué nos enamoramos. Puede que no las encuentre, pero hace que el espectador se plantee las preguntas adecuadas.

Modernos Frankenstein

También centrada en la inteligencia artificial se encuentra *Ex Machina*, la primera película de otro de los protagonistas de la ciencia ficción en este siglo, un Alex Garland que debutaba en la dirección para plantear otras cuestiones, principalmente la responsabilidad como creadores sobre esas criaturas. Garland monta un drama moral sobre la inteligencia artificial totalmente humano, en el que los diálogos son tan importantes o más que los excelentes efectos especiales. Se beneficia además de una nueva exhibición de Oscar Isaac, que da vida a un extraño científico a mitad de camino entre Steve Jobs y Victor Frankenstein.

Las conversaciones entre esos modernos Frankenstein y su criatura logran que el espectador se pregunte si lo que hay debajo de cada uno es carne y hueso o metal y, lo que es más importante, si eso realmente importa. Aunque puede que esa responsabilidad del ser humano sobre su creación y sobre si se la puede llegar a considerar humana o no llegue a su conclusión con otras dos fascinantes obras, *Inteligencia artificial* de Steven Spielberg y *Moon* de Duncan Jones.

En la primera, un proyecto de Stanley Kubrick que terminó realizando Spielberg tras la muerte del director de 2001, el sentimentalismo del creador de E.T. se ve atacado por el cinismo de Kubrick (ambos palabras mayores en el género), la forma en que los planteamientos de ambos cineastas luchan entre sí durante las más de dos horas de duración es muy interesante, contraponiendo a unos humanos capaces de tirar a la basura como un juguete roto a una máquina de inteligencia artificial que encuentra más calor humano entre otras máquinas. Eso sí, es irregular y al final Spielberg mete un desenlace que no parece que hubiera convencido a Kubrick.

La segunda trata sobre un hombre que está realizando trabajos en solitario en la Luna para una empresa y mezcla inteligencia artificial, la máquina es la única interlocutora del per-



De arriba a abajo, fotogramas de *Her*, *Ex Machina*, *Inteligencia artificial* y *Moon*.

sonaje interpretado por Sam Rockwell, con clonación, y es que el giro fundamental de la película nos lleva a ver que una compañía está utilizando clones para trabajar sin descanso en la Luna y conseguir valiosos materiales. Lo que pasa es que para que estos clones trabajen bien se les proporcionan unos recuerdos, casi al revés que en *¡Olvidate de Mí!*, y una esperanza: terminar su trabajo para poder volver a la Tierra para reunirse de nuevo con su mujer y su hija.

La compañía no los ve como humanos y los va reemplazando unos por otros como si fueran las piezas de un engranaje, pero cuando uno de ellos es puesto

De izquierda a derecha, fotogramas de *Elysium*, *Snowpiercer* y *Sunshine*.



en marcha sin haber acabado con el previo, estos descubren el engaño, para uno de ellos es evidente, el otro se aferra a ser el humano original. Duncan Jones se quita, con su espléndido debut cinematográfico, la etiqueta de hijo de David Bowie para convertirse en un referente del género.

Cambio climático y distopías

Moon plantea un mañana distópico, lo que nos mete en un nuevo bloque de películas que imaginan un futuro no demasiado halagüeño para la humanidad.

Con las consecuencias del cambio climático cada vez más presentes en el día a día y los países industrializados sin tomar grandes medidas es normal que declaraciones como la del secretario general de la ONU, António Guterres, diciendo que «hemos abierto las puertas del infierno» se conviertan en películas como *Snowpiercer* del aclamado director coreano Bong Jong Hoo.

Aquí se imagina un futuro postapocalíptico en el que los últimos supervivientes de

la humanidad sobreviven a una Tierra congelada alejándose a supervelocidad en un decadente tren propulsado por el “motor sagrado». Lo malo es que la sociedad no ha mejorado y sigue dividida en clases o, si lo prefieren, en el dinero que tiene cada uno. En la parte delantera del tren van los ricos con capacidad para comprar un billete de primera clase, a pesar de que obviaron todas las pistas del cambio climático y permitieron que el mundo se fuera al garete. En la parte de atrás viven apilados casi todos los demás, incluidos los trabajadores pobres a los que se les intenta con-

vencer de que deberían estar agradecidos de poder poner el carbón que hace funcionar la “santa máquina” mientras son alimentados con sus propios residuos reciclados.

Es algo parecido a lo que imagina Neill Blomkamp en *Elysium*, una película en la que las élites ricas de la Tierra han abandonado el planeta y viven en una estación espacial llamada Elysium, con su propia atmósfera y campo «electromagnético», además de aire limpio, agua y todo lo necesario para vivir de forma segura, saludable y confortable. Algo que no tienen los pobres que viven en un planeta arruinado, lleno de residuos nucleares y heri-

do de muerte por el cambio climático.

En cambio, en *Sunshine*, dirigida por Danny Boyle con guion de Alex Garland, no es la Tierra la que se está muriendo, sino el Sol. En el argumento existe una teoría que dice que explotando en el Sol una bomba nuclear del tamaño de la isla de Manhattan se podría reactivar. Así que, tras un primer intento fallido, por causas desconocidas, se lanza una segunda nave para completar la misión, aunque esta vez es el último intento ya que en la fabricación de la bomba se ha utilizado todo el material fisionable restante de la Tierra.

Aunque puede que la mejor película que se haya hecho este siglo sobre una

Tierra devastada sea una con un mensaje que se abre a la esperanza y que tiene la mejor hora inicial de cine puro del siglo XXI, casi mudo. Se trata de *Wall-E*, de los estudios Pixar, y comienza con un planeta devastado en el que ya no crece nada. Los humanos hace tiempo que lo abandonaron y ahora viven como obesos consumistas en una nave espacial en la que no hay nada que hacer más que comprar y mirar pantallas.

en la que un humano desencantado vive en una Tierra donde las mujeres han dejado de tener hijos, pero una misión le dará la oportunidad de recuperar su antiguo humanismo en una cinta maravillosa y sombría, que imagina una Gran Bretaña militarizada y cerrada a la inmigración en la que es difícil encontrar esperanza.

La esperanza, eso sí, no va con Lars Von Trier que en *Melancolía* convierte

que permitiría el éxodo desde la Tierra a nuevos planetas. Mientras que el plan B es llevar 5 000 embriones congelados para colonizar un planeta habitable y asegurar la supervivencia de la humanidad. Eso sí, el logro de la película es cómo se consigue, viajes en el tiempo incluidos.

Lo segundo, encontrar vida inteligente, es lo que buscan en *Ad Astra*, una especie de adaptación de *Apocalypse*



Fotogramas de *Wall-E*, *Hijos de los hombres*, *Melancolía* y *Ad Astra*.

Pero en la Tierra todavía queda un viejo robot que parece más humano que sus creadores y que colecciona pequeñas cosas mientras sigue imparabile con su tarea, amontonar cubos de basura. Una crítica social muy acertada en la que la humanidad se ve redimida por su creación. Y es que, si somos capaces de crear algo tan adorable como *Wall-E*, entonces, quizás, no merezcamos extinguirnos, ¿verdad?

Es lo que piensa también Alfonso Cuarón en otra de las cintas imprescindibles de estos años, *Hijos de los hombres*,

el fin de la Tierra y de la humanidad (con el choque con el planeta del título) en una de las secuencias más impresionantes del cine de los últimos tiempos.

Viajes interestelares

Así que, como parece claro que nuestro planeta no va a durar para siempre, uno de los objetivos de la ciencia ficción es encontrar planetas habitables o seres inteligentes que nos puedan ayudar. Lo primero es lo que buscan en *Interstellar*, donde tienen dos opciones, el Plan A, una teoría gravitatoria de la propulsión

Now y *El Corazón de las Tinieblas* al espacio, protagonizado por Brad Pitt, en la que la Tierra también se ve amenazada por unas extrañas radiaciones que parece estar lanzando la misión que se envió para encontrar otros seres vivos en la galaxia. Como ocurría en *Sunshine* la forma de responder a ello involucrará una bomba nuclear y un poco de complejo de Edipo...

Claro que si existen otras formas de vida en el universo estas también pueden encontrarnos a nosotros. Esto fue una de las claves del cine de ciencia ficción de

mediados del siglo pasado, los aliens que nos invadían. De ello bebe una de las películas más interesantes de esta década, *Nop* de Jordan Peele, una especie de mezcla de *Encuentros en la tercera fase* con *Tiburón*, metiendo en el guiso un poquito de *spaghetti-western* de Leone.

Pero también pueden venir en son de paz y que se acaben dando la vuelta las tornas y seamos nosotros los que seamos la amenaza, no en vano somos la

tiempo, ya que no está contada en estricto sentido temporal.

Viajes en el tiempo

Y eso nos lleva al último bloque, el de los viajes en el tiempo, algo que nos lleva fascinando desde los tiempos de Julio Verne y H. G. Wells, a los que podríamos considerar como los padres del género, aunque fuera la teoría especial de la relatividad

do de la adolescencia, pero a día de hoy se sigue discutiendo sobre si va sobre un viaje al interior de la cabeza de una persona con esquizofrenia o sobre viajes en el tiempo, agujeros negros y universos paralelos...

La que sí que se mete, literalmente, a fondo en un agujero negro es, nuevamente, el *Interstellar* de Nolan, esta vez buscando conseguirlo todo, entreteni-



Fotogramas de *Nop*, *Distrito 9*, *Donnie Darko* y *La llegada*.

especie que creó Auschwitz o el *apartheid*. Esto último viene totalmente al caso en la película del sudafricano Neill Blomkamp, *Distrito 9*, donde los alienígenas acaban reclusos en campos de concentración.

Eso sí, también pueden venir para ayudarnos y que seamos lo suficientemente inteligentes para no destruirlos, que es lo que pasa en *La llegada* de Denis Villeneuve, la tercera figura referencial, junto a Nolan y Garland, del género en este siglo. Una fascinante película que juega con el lenguaje y el

de Einstein la que le diera probabilidad científica.

Claro que *Looper*, la tercera película de Rian Johnson, juega con los viajes en el tiempo sin preocuparse mucho por Einstein y su relatividad; vamos, sin que haga falta una licenciatura en Físicas para entenderla, decantándose claramente por el entretenimiento y logrando una película muy disfrutable en la que es mejor no entrar en lo realista que sea científicamente. Por su parte, *Donnie Darko* es una película irregular y fascinante que retrata a la perfección el mun-

do, sentimiento y precisión científica. Lo que pasa es que, aunque los agujeros negros son uno de los reclamos favoritos del género, es complicado conocer sus características por las dificultades para detectarlos y estudiarlos. Según la teoría general de la relatividad de Einstein son posibles, así que la fascinante película de Nolan podría ser una de sus explicaciones, una en la que la humanidad hubiera logrado, gracias a ellos, trascender la dimensión del tiempo y podido escapar de ese ineludible fin que, como en este artículo, siempre acaba por llegar. ©

Exterior de la central Cofrentes.



Una descripción de las metodologías BEPU (best estimate plus uncertainty) de análisis de accidentes

El estudio de escenarios base de diseño (DBS) es el elemento esencial del llamado análisis determinista de seguridad (DSA) de plantas nucleares. Se centra en la simulación, mediante modelos computacionales (también llamados códigos de cálculo) del comportamiento de las plantas durante los DBS. Es la autoridad reguladora nuclear quien define los escenarios y las cantidades físicas de seguridad que deben calcularse con los códigos, e impone los criterios de aceptación para esas

cantidades calculadas (que llamaremos aquí criterios reguladores de aceptación, CRA). El DSA se basa en cálculos. Y todo cálculo, realizado con modelos predictivos y utilizando cantidades físicas, da lugar a resultados afectados por incertidumbre. En este artículo hablaremos del análisis de incertidumbre para los cálculos de escenarios base de diseño en centrales nucleares.

■ Texto: **Rafael Mendizábal Sanz** | consejero técnico del Área de Ingeniería del Núcleo ■

Los cálculos son esenciales en ciencia e ingeniería. Y es importante conocer la fiabilidad de sus resultados, su fidelidad a la realidad, que depende de dos cosas:

— La calidad de los modelos compu-

tacionales, que tiene que ver con su capacidad para predecir la realidad analizada.

— La dificultad para conocer el valor real de los datos de entrada al cálculo.

Estas limitaciones introducen incerti-

dumbre en el cálculo; el calculista no tiene la seguridad de que sus resultados describan la situación real que intenta simular. La incertidumbre tiene su propia definición en ciencia. Así, se puede decir que la incertidumbre de una cantidad

numérica es una representación matemática de la dispersión de los valores que se le pueden atribuir. La representación matemática tiene luego una traducción numérica; es decir, la incertidumbre se define matemáticamente, pero se calcula numéricamente.

Clásicamente se distingue entre dos tipos de incertidumbre. Existen magnitudes físicas cuyo valor es difícil de conocer, porque exhiben una gran variabilidad; por ejemplo, en el tiempo y/o el espacio. Este tipo de incertidumbre se denomina aleatoria. Y existe, por otra parte, una incertidumbre atribuible al observador o usuario de la magnitud, a su desconocimiento o falta de información sobre su valor. Esta incertidumbre se denomina epistémica, y claramente es subjetiva, ya que depende del observador. Además, se puede reducir, a base de aumentar la información del observador, y por eso se la denomina a veces incertidumbre reducible. En contraste, la incertidumbre aleatoria es irreducible, porque un aumento de información no la puede rebajar.

En definitiva, la incertidumbre de una magnitud física representa la falta de fiabilidad en su valor, ya sea por su variabilidad o por el desconocimiento de su observador o usuario.

Modelos e incertidumbre

Los modelos computacionales, también llamados códigos, producen resultados con incertidumbre. Un motivo básico es que los modelos son representaciones matemáticas simplificadas de la realidad física, y por tanto son imperfectos. Y por ello son inexactos: el valor calculado con un modelo de una magnitud física no coincide, en general, con su valor real, sino que existe un sesgo o error. Los sesgos no se pueden conocer a la perfección; de lo contrario, permitirían una predicción exacta de la realidad; o sea, un modelo perfecto. Por tanto, el conocimiento imperfecto del

error del modelo produce incertidumbre epistémica en sus resultados.

Por otra parte, los modelos transforman variables de entrada en resultados. Las variables de entrada pueden, y suelen, tener incertidumbre. Operar con datos inciertos lleva a resultados inciertos. Se dice que la incertidumbre de las variables de entrada se propaga, a través del modelo o del cálculo, a los resultados.

En definitiva, son los modelos y sus variables de entrada las dos fuentes básicas de la incertidumbre de las cantidades calculadas.

Modelos deterministas y aproximación de caja negra

Todo modelo o código de cálculo define una correspondencia *input-output*. En lenguaje matemático, se trata de una correspondencia desde un espacio de entrada a otro de salida. Cada punto en el espacio de entrada representa un posible conjunto numérico de entrada al código (en inglés *input deck*), que, alimentado al código, produce un cálculo cuyo resultado es un punto del espacio de salida (figura 1).

Aquí trataremos de los modelos y

códigos denominados deterministas, que cumplen la condición de que, aplicados a un punto concreto del espacio de entrada, dan siempre como resultado un mismo punto del espacio de salida. Esta propiedad de repetibilidad puede parecer trivial, pero no lo es tanto, porque existen modelos que incluyen el uso de números aleatorios, de forma que los resultados pueden variar de un cálculo a otro, aunque el conjunto de entrada sea el mismo.

En matemáticas, una correspondencia entre conjuntos que asigna a cada punto origen un solo punto imagen se denomina aplicación o función. Por tanto, todo modelo determinista tiene asociada una función numérica *input-output*.

Cuando un modelo determinista se identifica con su función *input-output* asociada, se dice que hay una “aproximación de caja negra” al modelo. En este artículo contemplamos los modelos deterministas como cajas negras. No significa este enfoque que haya un desconocimiento real de los modelos; es decir, de su estructura matemática, sus ecuaciones o algoritmos asociados. Simplemente, no se utiliza ese conocimiento, o

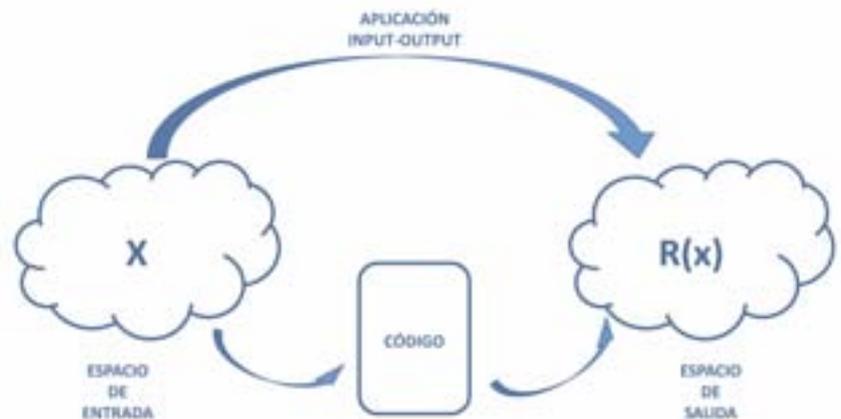


Figura 1: Aproximación de caja negra a un código determinista.

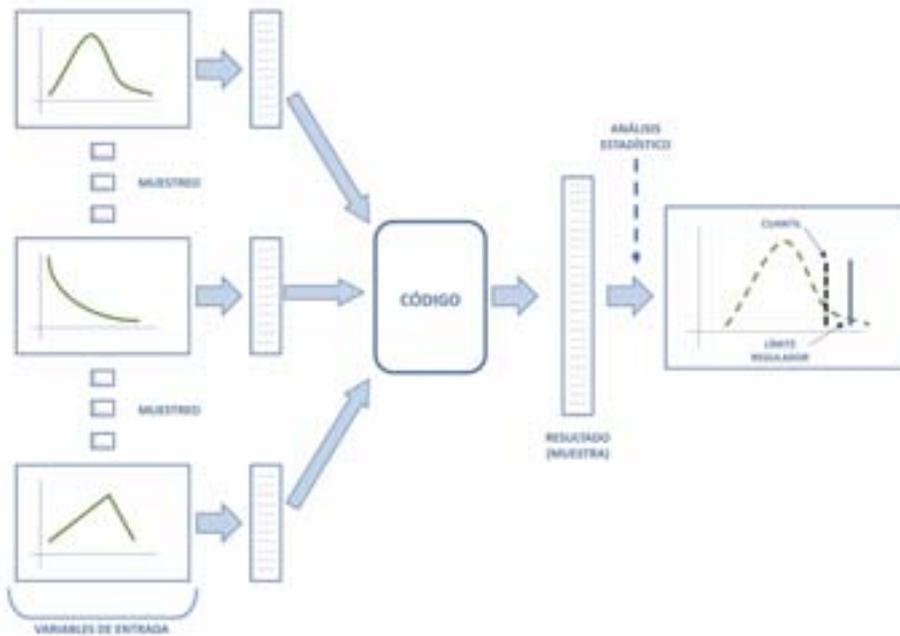


Figura 2: Propagación de incertidumbre en un análisis BEPU.

se hace mínimamente, a la hora de realizar el análisis de incertidumbre.

Metaincertidumbre

Hemos visto que toda cantidad calculada tiene incertidumbre, que surge del modelo de cálculo y de sus variables de entrada. Pero la incertidumbre también se debe modelar y calcular, y eso significa que, una vez modelada y calculada, también es una magnitud incierta [4]. Existe, por tanto, la incertidumbre de la incertidumbre, un concepto al que cuadra bien el término metaincertidumbre, aunque a veces se utiliza el menos imponente de incertidumbre de segundo nivel. De ella hablaremos más adelante.

Existen varias maneras de modelar matemáticamente la incertidumbre. Dos maneras clásicas, utilizadas ambas en seguridad nuclear, son las distribuciones de probabilidad y los intervalos o regiones. En el primer método, la cantidad numérica incierta se considera una variable aleatoria, y la incertidumbre se identifica con la distribución de probabilidad.

Menos sofisticada es la modelación de la incertidumbre con intervalos o re-

giones numéricas. En este caso, la cantidad incierta se describe mediante una región que engloba sus posibles valores. Para variables escalares, esa región es típicamente un intervalo numérico, y para variables multidimensionales es una región también multidimensional.

La forma de modelar la incertidumbre también se propaga a través del cálculo. Si se modela mediante distribuciones de probabilidad, su propagación da lugar a distribuciones de probabilidad de los resultados; si se modela mediante regiones, su propagación produce regiones para los resultados.

Representación probabilista de la incertidumbre

En las metodologías tradicionales (llamadas conservadoras) de análisis de accidentes de la seguridad nuclear, la modelación de la incertidumbre se realiza mediante intervalos unilaterales. A los parámetros de entrada que son significativamente influyentes en los resultados de seguridad se les asigna un valor numérico pesimista, de acuerdo con la severidad del resultado. Típicamente, incluso, se recurre

a valores “muy pesimistas”, con lo que se obtienen resultados también muy pesimistas. El objetivo es sobrestimar la incertidumbre del resultado para tener gran certeza de que cubre los valores de hipotéticos accidentes reales. La propagación de la incertidumbre es aquí muy sencilla; en esencia, se hace un cálculo con las variables inciertas en sus valores pesimistas y el resultado se compara con los límites de aceptación definidos por el regulador.

Las metodologías conservadoras fueron necesarias cuando la fenomenología de los escenarios base de diseño no se conocía en profundidad y los modelos eran necesariamente simples y, a veces, bastante empíricos. Cuando el conocimiento experimental de la fenomenología y la capacidad teórica y computacional aumentaron lo suficiente, se abrió la puerta al uso de modelos predictivos realistas (llamados también best estimate) en el análisis de accidentes [1]. Las metodologías basadas en cálculos con estos códigos, suplementados por el análisis de incertidumbre de sus resultados, se denominan BEPU (Best Estimate Plus Uncertainty), y suponen un importante avance con respecto a las metodologías conservadoras. La gran mayoría de las metodologías BEPU existentes son probabilistas, y a veces se designan como metodologías estadísticas.

¿Cómo se analiza la propagación a través de un cálculo de la incertidumbre descrita por distribuciones de probabilidad? El procedimiento clásico es el método de Monte Carlo. En esencia, se obtienen muestras aleatorias de los parámetros inciertos, a partir de sus distribuciones de probabilidad. Alimentando el modelo con los sucesivos conjuntos de entrada se obtiene la correspondiente muestra aleatoria de los resultados del código, a partir de la cual se estiman, mediante técnicas estadísticas, sus distribuciones de probabilidad (figura 2).

La estadística es el arte de estimar distribuciones de probabilidad a partir

de muestras aleatorias. Éstas tienen, obviamente, tamaño finito y dan una información incompleta sobre la distribución de origen; por ello, las estimaciones estadísticas tienen incertidumbre y existe un término clásico bien conocido para describirla: la confianza estadística. Esta, recordando un término introducido previamente, describe un tipo de metaincertidumbre.

Criterios de aceptación con incertidumbre

Los criterios reguladores de aceptación (CRA) son condiciones que deben cumplir los resultados de los análisis deterministas de seguridad. Los escenarios base de diseño (DBS) se clasifican en categorías, y, para cada una de ellas, la autoridad reguladora establece los resultados de seguridad que tienen que calcularse y sus criterios reguladores de aceptación (CRA). El cumplimiento de los criterios implica que las consecuencias de los DBS no producen daños inaceptables. Lógicamente, los CRA deben tener en cuenta, en su formulación, la incertidumbre de cálculo de los resultados de seguridad, y la manera en que se modela.

Supongamos que en el análisis DBS se calcula un resultado de seguridad V escalar, continuo y con valores positivos, y tal que, a mayor valor de V , más severas las consecuencias del escenario. Entonces, el regulador impone sobre la V calculada un límite superior de aceptación L . Para metodologías tradicionales, la forma del CRA para V es, por tanto:

$$V_C < L \quad (1)$$

El subíndice C en (1) indica que V se ha calculado de manera conservadora.

Cuando se utiliza una metodología BEPU probabilista, el resultado V se modela como una variable aleatoria y el criterio de aceptación se hace probabilista, de la forma

$$PR_V\{V < L\} \geq P_0 \quad (2)$$

En el primer miembro de (2) aparece la probabilidad (que aquí tiene el sentido de “certidumbre”) de que V sea menor que L , calculada con la distribución de probabilidad de V . El criterio establece que dicha probabilidad es grande, porque P_0 es un valor de probabilidad cercano a 1, establecido también por el regulador, y llamado nivel regulador de probabilidad. El valor estándar de P_0 es 0.95.

La forma (2) se puede simplificar, recurriendo al concepto de cuantil de una variable aleatoria. Para la variable aleatoria continua V , el cuantil de orden P (donde P es un valor real comprendido entre 0 y 1) es el valor V_P de la variable tal que la probabilidad de que V esté por debajo de V_P es P . Es obvio que, cuanto más grande es P (más cercano a 1), más grande es el valor V_P dentro de la población.

Utilizando el concepto de cuantil, (2) se puede reescribir como

$$V_{P_0} < L \quad (3)$$

Así que la introducción de la incertidumbre probabilista conlleva sustituir un valor conservador de V (con conservadurismo no cuantificado, pero que se considera “suficiente”) por un cuantil de orden alto y conocido de la cantidad.

En (3) está la incertidumbre de cálculo, pero no “toda” la incertidumbre. Es un hecho que, en general, no se conoce a la perfección la distribución de probabilidad de V , porque la propagación de incertidumbre a través del modelo se hace de forma parcial. El procedimiento típico de propagación es la técnica de Monte Carlo, de manera que, en la aproximación de caja negra, todo lo que se conoce de V es una muestra finita de valores; a partir de ella, lo más que puede obtenerse son estimaciones estadísticas de su distribución de probabilidad. Las estimaciones tienen una incertidumbre estadística, que

es la incertidumbre de segundo nivel de V , de carácter epistémico.

Si una distribución de probabilidad es incierta, también lo es cualquier cantidad calculada a partir de ella. Es decir, tanto la probabilidad que aparece en el primer miembro de (2) como el cuantil que figura en (3) son, en ese caso, cantidades inciertas. Esta incertidumbre de segundo nivel puede modelarse de varias maneras; por ejemplo, mediante intervalos o distribuciones de probabilidad. En este último caso, se añade a (2) una segunda “capa” de incertidumbre, en la forma

$$PR_S\{PR_V\{V < L\} \geq P_0\} \geq C_0 \quad (4)$$

Si, como es frecuente, la propagación de incertidumbres se hace mediante un análisis de Monte Carlo puro, se obtiene una muestra aleatoria simple (MAS) de valores de V . En ese caso, la probabilidad en (2) o el cuantil en (3) tiene distribuciones ligadas al proceso de muestreo (*sampling* en inglés, de ahí el subíndice S en (4)), y la probabilidad externa en (4) se denomina confianza, un término clásico en estadística.

También C_0 es un valor alto de probabilidad (cercano a 1), establecido por el regulador (con valor estándar de 0.95) y denominado nivel regulador de confianza. El par (P_0, C_0) se denomina nivel regulador de tolerancia estadística. Su valor estándar es (0.95, 0.95) y, con él, los criterios de aceptación se califican de “criterios 95/95”.

(4) no tiene una forma sencilla, con dos probabilidades anidadas. Su escritura es complicada, pero se lee con facilidad, como “ V es menor que L con probabilidad mayor o igual a P_0 y confianza mayor o igual a C_0 ”.

(4) se puede simplificar, utilizando de nuevo los cuantiles de V

$$PR_V\{V_{P_0} < L\} \geq C_0 \quad (5)$$

Alguien experto en estadística traduciría (5) como sigue: un límite superior

de confianza de nivel C_0 del cuantil P_0 de V debe ser menor que L . O diría, equivalentemente, que un límite superior de tolerancia de nivel (P_0, C_0) de V debe ser menor que L , expresado como:

$$V_{(P_0, C_0)} < L \quad (6)$$

Los criterios (1), (3) y (6) tienen complejidad creciente, debido a la introducción de los dos niveles de incertidumbre. En (1), la figura de mérito (FOM) que se compara con L es un valor conservador de V ; en (3) es un cuantil de orden alto de V , y en (6) la FOM es un límite superior de confianza, de nivel alto, del citado cuantil. Se puede decir que las expresiones (4)-(6) representan el criterio regulador de aceptación para metodologías BEPU.

La confianza estadística aparece en el CRA debido al tamaño finito de la muestra disponible de valores de V . Si aumenta el tamaño, la incertidumbre de segundo nivel decrece, y puede hacerse despreciable para tamaños muy grandes. En ese caso límite, la distribución de probabilidad de V y el correspondiente cuantil de orden P_0 se pueden conocer con gran precisión, y el CRA tiene las formas (2)-(3). Esta posibilidad se da cuando los cálculos con el código consumen muy poco tiempo (y otros recursos) de ordenador, y se pueden realizar de manera masiva.

Verificación del cumplimiento de un criterio de aceptación

El paso definitivo del análisis BEPU de un DBS es la comprobación del cumplimiento del criterio regulador de aceptación. Si se cumple, hablamos de “diseño seguro”. Si no se satisface, el diseño de seguridad debe modificarse hasta que se verifique el cumplimiento.

¿Cómo se hace esta comprobación? Es fácil cuando el criterio tiene la forma (3), porque basta con generar una muestra aleatoria muy grande de valores de V , calcular a partir de ella, de forma tri-

vial, el cuantil de orden P_0 y compararlo con el límite L .

Cuando la incertidumbre de segundo nivel no se puede despreciar, el criterio toma la forma (6). La comprobación se hace, entonces, calculando un límite superior de tolerancia de nivel (P_0, C_0) y comparándolo con L . Este procedimiento es un caso particular del llamado “método de los intervalos de tolerancia” para comprobar (6). Dada la variable aleatoria V , una MAS de V de tamaño N y dos números reales P y C comprendidos entre 0 y 1, se define un intervalo de tolerancia IT de nivel (P, C) de V como un intervalo en el rango de V tal que un nuevo valor de V (independiente de la MAS) está contenido en IT con probabilidad mayor o igual a P y confianza estadística mayor o igual a C [3].

Llamemos intervalo de aceptación de V al conjunto de sus valores que están por debajo del límite regulador L . El método de los intervalos de tolerancia para comprobar (6) se basa en el siguiente resultado. Si, a partir de una MAS, se construye un intervalo de tolerancia para V de nivel regulador (P_0, C_0) , y dicho intervalo resulta estar contenido en el intervalo de aceptación de V , entonces se cumple el criterio de aceptación (6).

Los intervalos de tolerancia pueden ser uni o bilaterales. La desigualdad (6) viene a decir que un intervalo unilateral de tolerancia de nivel (P_0, C_0) está contenido en el intervalo de aceptación de V .

La diferencia básica entre la comprobación de los criterios (3) y (6) es que, en el primer caso, la figura de mérito (FOM) que se compara con el límite L es un cuantil de V , una cantidad fija que solo depende del código y de las distribuciones de probabilidad de las variables de entrada. Y, en el segundo caso, la FOM es un límite de tolerancia, que depende también de esos dos elementos y, además, de la muestra aleatoria utilizada. Si cambia la muestra, cambia la FOM.

En consecuencia, para verificar el cumplimiento de un CRA son necesarios métodos de cálculo de intervalos de tolerancia y métodos de estimación de cuantiles por intervalos. Existen muchas clases de procedimientos estadísticos de este tipo; aquí nos centraremos en el conocido como método de Wilks.

El método no paramétrico de Wilks

El matemático tejano Samuel S. Wilks (1906-1964) fue uno de los más notables estadísticos de la primera mitad del siglo XX. Una de sus principales aportaciones la desarrolló en respuesta a un requerimiento formulado por Walter A. Shewhart (el creador del control estadístico de calidad en procesos de fabricación), y fue el desarrollo, en 1941, de su método no paramétrico para construir intervalos estadísticos de tolerancia [8, 9]. Este método ha constituido una técnica muy conocida y aplicada. A finales de la década de 1980, la organización alemana GRS comenzó a utilizarlo en los análisis BEPU de termohidráulica nuclear [2]. A partir de ahí, el método comenzó a aplicarse masivamente en el análisis de incertidumbre de cálculos de seguridad nuclear, basándose en MAS de resultados de los cálculos. Los intervalos que genera son “libres de distribución” (*distribución free* en inglés), también llamados no paramétricos, significando que el procedimiento de construcción es el mismo cualquiera que sea la distribución de la variable aleatoria en cuestión.

El método de Wilks se basa en muestras aleatorias simples (MAS), y utiliza como extremos de los intervalos de tolerancia los llamados estadísticos de orden (OS), un concepto de definición sencilla. Se parte de una variable aleatoria V continua y escalar y con la llamada función de distribución acumulada (cdf) continua. Dada una MAS de tamaño N de V , sus elementos pueden ordenarse de menor a

mayor, y entonces se les asigna un subíndice que representa su ordinal: $V(1) < V(2) < \dots < V(N-1) < V(N)$. Por tanto, $V(1)$ y $V(N)$ son, respectivamente, el mínimo y máximo muestral; $V(2)$ y $V(N-1)$ son el segundo mínimo y segundo máximo de la muestra y así sucesivamente.

El valor de cada estadístico de orden depende de la muestra obtenida. Dados dos OS $V(r)$ y $V(s)$, con $r < s$, consideremos el intervalo entre ellos ($V(r), V(s)$) y definamos su cobertura como la probabilidad de que un nuevo valor de V , elegido al azar e independiente de la muestra previa, caiga dentro del intervalo. Es evidente que la cobertura depende de la muestra utilizada, y, por tanto, es una variable aleatoria con distribución asociada al muestreo. Wilks demostró que la cobertura de tal intervalo tiene una distribución que siempre es la misma y no depende de la propia variable V ; es la llamada distribución beta, con unos parámetros que sólo dependen de los ordinales r y s . Consecuencia de este resultado es que se puede obtener una condición para que el intervalo ($V(r), V(s)$), derivado de una MAS de V de tamaño N , sea un intervalo de tolerancia de nivel (P, C) . Esa condición se denomina fórmula de Wilks y se demuestra que, fijado el nivel de tolerancia y los ordinales de ambos OS, existe un valor mínimo del tamaño de muestra N que satisface dicha fórmula.

El método de Wilks permite construir tanto intervalos unilaterales, con extremo en un OS (llamado límite inferior o superior de tolerancia, según el caso) como bilaterales (delimitados por dos OS). Para cada una de esas modalidades existe una fórmula de Wilks diferente, dando lugar a tamaños mínimos de muestra que, a igualdad de otros factores, son menores para la modalidad unilateral que para la bilateral.

En definitiva, el método de Wilks permite hacer una propagación de in-

certidumbre de menor coste computacional que un análisis convencional de Monte Carlo. Para ello, utiliza tamaños moderados de muestra, que no permiten obtener con precisión la distribución de probabilidad de los resultados, pero sí construir intervalos de tolerancia para ellos, suficientes para comprobar el cumplimiento de los CRA.

La gran aceptación del método de Wilks se debe a su simplicidad y a su mínimo número de hipótesis [5]. Es un método frecuentista, que no necesita establecer ni justificar una distribución prior. Es método exacto, así que no tiene que justificar ninguna aproximación. Es libre de distribución y, por tanto, no necesita



Samuel S. Wilks.

demostrar que la población sigue una distribución paramétrica específica. Además, se basa en un MAS del modelo o código original, con lo que no necesita otros tipos de muestreo, ni la construcción de ningún metamodelo o emulador.

Incluso uno de los defectos del método de Wilks, que es su poca eficiencia (es decir, una significativa variabilidad de sus estimadores), puede resultar una ventaja a ojos del regulador, porque tiende a dar resultados más conservadores que otros métodos de estimación de cuantiles.

Aún así, se han aplicado numerosos métodos alternativos al de Wilks, que pueden encontrarse en la literatura es-

tadística. Los hay paramétricos y no paramétricos, aproximados y exactos, frecuentistas y bayesianos, basados en MAS o en otros tipos de muestreo. Algunos hacen la propagación de incertidumbre a través del código original, y otros la hacen a través de modelos sustitutivos simplificados (llamados también meta-modelos).

El problema multivariante

Se ha descrito en detalle el análisis de incertidumbre de la situación más sencilla: una sola cantidad escalar y continua, sujeta a un criterio de aceptación. Sin embargo, no es raro que un DBS tenga asociadas varias cantidades escalares de seguridad, cada una sometida a su CRA. Este es un problema multidimensional o, en lenguaje estadístico, multivariante. Los conceptos de intervalo de aceptación e intervalo de tolerancia son fácilmente generalizables a regiones de varias dimensiones [3]. Para verificar el cumplimiento simultáneo de múltiples CRA escalares, se utiliza el método de regiones de tolerancia, extensión del método de intervalos de tolerancia, citado previamente. Si se construye, a partir de la MAS multivariante, una región de tolerancia de nivel regulador y ésta resulta estar contenida en la región de aceptación, se concluye el cumplimiento de los criterios de aceptación con el nivel regulador de tolerancia.

El método de Wilks es aplicable sólo a variables aleatorias escalares, pero el matemático húngaro Abraham Wald publicó en 1943 una extensión del método a variables multivariantes, que permite construir regiones de tolerancia multidimensionales no paramétricas mediante estadísticos de orden [7].

No obstante, la extensión de Wald no es el único procedimiento para tratar el problema multivariante. El método de Wilks se puede aplicar al problema. Basta con hacer un adecuado cambio de variables, que transforme la cantidad multidimensional en una única variable escalar.

mensional en una escalar, y aplicar a ésta el método de Wilks. El límite de tolerancia obtenido se convierte, mediante la transformación inversa, en una región de tolerancia multidimensional [6]. Esto significa, además, que el problema multivariante se puede reducir al sencillo problema escalar que hemos descrito en este artículo.

Epílogo: Licenciar con probabilidades...

Cuando se utilizan metodologías BEPU, el análisis determinista de accidentes adquiere carácter probabilista. El regulador decide el nivel de tolerancia estadística para el cumplimiento de los criterios de aceptación. El valor estándar de (95, 95) significa que se permite una probabilidad de hasta 0.05 de que no se cumpla el CRA, con confianza 0.95 ¿Es suficiente el uso del nivel estándar, o el regulador debería imponer valores más altos?

En la elección del nivel regulador de tolerancia deben ser claves los conservadurismos que lleva aparejado el DSA. Para empezar, los DBS se establecen para maximizar sus consecuencias negativas, de forma que cubran las de cualquier escenario de accidente dentro de su categoría. Por otra parte, los límites reguladores de aceptación se establecen también de manera pesimista, para asegurar un margen notable hasta el verdadero umbral de daño a la correspondiente barrera de seguridad. Y, además, las metodologías BEPU no son puramente realistas, sino que contienen un cierto número de conservadurismos. El regulador puede permitir un nivel de tolerancia no excesivamente alto a cambio de la existencia de otros márgenes de seguridad significativos.

...y con números aleatorios

La suficiencia de los niveles de tolerancia no es el único problema regulador que plantea el uso de las metodologías

BEPU. Están, además, las implicaciones de utilizar métodos estadísticos. En este artículo hemos comprobado que la figura de mérito (FOM) que se compara con límites reguladores se construye a partir de una muestra aleatoria de valores de la cantidad; si cambia la muestra cambia el valor de la FOM. Así que este valor de licencia es, en puridad, un número aleatorio, el resultado de un sorteo. Si la FOM no cumpliera el criterio de aceptación, alguien podría tener la idea de probar fortuna con otra muestra, y esa acción invalidaría el análisis de seguridad.

Por ello, el regulador debe controlar el proceso de generación de la muestra aleatoria. Típicamente, para obtener una muestra se utilizan generadores de números pseudoaleatorios, que obtienen secuencias de números deterministas que emulan números aleatorios. Cada secuencia parte de una semilla numérica; si se repite ésta, se repite la muestra. A su vez, la semilla se elige de una manera automática, o se introduce arbitrariamente. El regulador debe cerciorarse de que la elección de semilla no está dirigida a obtener una muestra favorable, y lo puede hacer, por ejemplo, imponiendo su valor, o comprobando que el valor proviene de un proceso automático no controlado por el analista.

No sabemos si Shakespeare pudo presagiar esta relación del análisis de seguridad con una “semilla” cuando hizo exclamar al rebelde Hotspur... *but I tell you, my lord fool, out of this nettle, danger, we pluck this flower, safety.* ©

Referencias

- 1 Code of Federal Regulations, 10 CFR 50.46, “Acceptance criteria for emergency core cooling systems for light-water nuclear power reactors”.
- 2 H. Glaeser, “Uncertainty evaluation of thermal-hydraulic code results.” Proceedings of International Meeting

on Best Estimate Methods in Nuclear Installation Safety Analysis (BE-2000), Washington, D.C., (2000).

- 3 K. Krishnamoorthy, Thomas Mathew, “Statistical Tolerance Regions: Theory, Applications, and Computation”, Wiley Series in Probability and Statistics. John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- 4 R. Mendizábal (2016), “Contribución al estudio de las metodologías de cálculo realista con incertidumbre (“BEPU”), dentro del análisis determinista de seguridad de plantas nucleares”, Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos. Madrid, febrero de 2016. https://oa.upm.es/39524/1/RAFAEL_FEDERICO_MENDIZABAL_SANZ.pdf
- 5 R. Mendizábal, “Bayesian perspective in BEPU licensing analysis”, Nuclear Engineering and Design, Volume 355, 2019, 110310, ISSN 0029-5493, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110310>
- 6 R. Mendizábal, “The fulfilment of multiple acceptance criteria by safety outputs of BEPU calculations”, 19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-19), 6-11 de marzo de 2022. Congreso virtual.
- 7 A. Wald, “An Extension of Wilks' Method for Setting Tolerance Limits”, Annals of Mathematical Statistics, Vol. 14, No. 1 (Mar., 1943), pp. 45-55.
- 8 S.S. Wilks, “Determination of Sample Sizes for Setting Tolerance Limits”, Annals of Mathematical Statistics, vol. 12, pp 91-96, 1941 <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120552614>
- 9 S.S. Wilks, “Statistical Prediction with Special Reference to the Problem of Tolerance Limits”, Annals of Mathematical Statistics, vol. 13, pp 400-409, 1942 <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:119838468>

Embarazo y radiación ¿Qué necesito saber?

Muchas mujeres gestantes deben exponerse a radiaciones ionizantes por causas médicas. De hecho, las radiaciones ionizantes se utilizan a diario para realizar una gran variedad de estudios diagnósticos.

■ Texto: **Ana Blanes Tabernero (IREM) y M^a Dolores Rueda Guerrero (STPR)** ■

La falta de información puede causar preocupación a las mujeres que se deben someter a estos estudios clínicos estando embarazadas.

La difusión de conocimientos básicos sobre este tema de una manera clara y comprensible es una de las tareas

a encarar por parte de los organismos que trabajan en el campo de la protección radiológica de los trabajadores expuestos, del público y del medio ambiente.

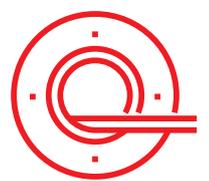
Por ello, en el año 2022 el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) publicó

el documento *Embarazo y Radiación ¿Qué necesito saber?*, desarrollado en el marco del Foro sobre Protección Radiológica en el Medio Sanitario, formado por el CSN, la Sociedad Española de Protección Radiológica y la Sociedad Española de Física Médica.

Este documento va dirigido tanto a las mujeres gestantes, sus familiares y allegados, como a los profesionales de la salud que las atienden y a la ciudadanía en su conjunto.

En él se pretende, por un lado, dar respuesta a las dudas más frecuentes sobre las pruebas diagnósticas con radiaciones que se pueden realizar durante el embarazo y sobre cuestiones que nos podemos plantear en nuestra vida diaria como:

- ¿A qué radiaciones estamos expuestos?
- En qué tipo de pruebas diagnósticas se utilizan las radiaciones ionizantes?
- ¿Las mujeres embarazadas pueden realizarse pruebas diagnósticas con radiaciones?
- ¿Supone la radiación algún riesgo para el feto?
- Si mi pareja o yo nos hemos hecho una exploración diagnóstica con radiaciones y me quiero quedar embarazada ¿debo tomar alguna precaución?
- ¿Qué pasa si decido no realizarme la prueba?
- ¿Está justificado interrumpir un embarazo a causa de una exposición médica a radiaciones ionizantes?



Y, por otro, hacer hincapié en los conceptos más importantes relacionados con la gestación y la exposición a la radiación ionizante, como son los siguientes:

- **La realización de pruebas diagnósticas habituales con radiaciones ionizantes no supone un riesgo para el feto.**
- Antes de realizarse la prueba, el médico especialista habrá valorado su justificación e idoneidad; es decir, que la realización de dicha prueba produzca un beneficio superior al posible riesgo que conlleve.
- **Cualquier exposición médica durante el embarazo es previamente evaluada y planificada por los profesionales responsables, que tienen en cuenta los posibles riesgos.**
- Si se toma la decisión de no realizarse la prueba indicada por el médico, el riesgo para la salud de la madre y/o la del feto puede ser mayor que si se le realiza.

- **Que la madre esté bien es importante tanto para la propia madre como para el feto, por lo que no hacer una prueba solicitada por su médico puede suponer un riesgo mayor que hacerla.**
- Las dosis recibidas por el feto debidas a la mayoría de las pruebas diagnósticas con radiaciones suponen un daño despreciable para el mismo. Por tanto, no está justificada la interrupción del embarazo.
- No hay evidencia de que la exposición a las radiaciones ionizantes de los padres antes de la concepción produzca ningún efecto en la salud de los futuros hijos.

- **Además, el documento incluye un código QR con referencias bibliográficas que permiten a cualquier persona interesada profundizar en el tema y obtener información detallada sobre el embarazo y la exposición a las radiaciones ionizantes**

- El tríptico “Embarazo y radiación ¿Qué necesito saber” está disponible en el Departamento de Publicaciones del CSN así como en formato electrónico en la siguiente dirección www.csn.es



Acceso al tríptico Embarazo y radiación. ¿Qué necesito saber?



Nuria Oliver Ramírez (Alicante, 1970) es una reconocida experta española en inteligencia artificial y directora de la Fundación ELLIS Alicante, miembro de la red europea ELLIS de institutos de investigación en este ámbito. Tras graduarse en Ingeniería Eléctrica e Informática en la Universidad Politécnica de Madrid se doctoró en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en el año 2000. Su trayectoria incluye 12 años en diferentes centros de investigación de Estados Unidos y otros tantos en España y está llena de logros pioneros, como haber sido la primera mujer directora científica de

Telefónica I+D, la cuarta mujer miembro de la Academia de Ingeniería o la primera científica española distinguida por la Association for Computing Machinery. Especializada en modelos computacionales de comportamiento humano y técnicas de aprendizaje automático, ha realizado contribuciones importantes en el desarrollo de la inteligencia artificial. Ha recibido, entre otros, el Premio Rei Jaume I en Nuevas Tecnologías (2021), el de Científico Europeo de Datos del Año (2019), el Nacional de Informática Ángela Robles (2016) y el de Mujer Digital Europea del Año (2016).

Nuria Oliver, directora de la Fundación ELLIS Alicante

“Necesitamos la inteligencia artificial para sobrevivir como especie, para afrontar los retos del siglo XXI”

■ Texto: **Ignacio Fernández Bayo** | Periodista de ciencia ■

PREGUNTA: *La inteligencia artificial lleva muchos años desarrollándose, pero desde la aparición del ChatGPT, hace un año, se ha convertido en un fenómeno mediático y de masas. ¿Hay razones para esta explosión de interés?*

RESPUESTA: Sí, porque más allá del ChatGPT, en los últimos meses lo que hemos vivido es una irrupción de las

técnicas de inteligencia artificial generativa, es decir, algoritmos que generan contenido, puede ser texto, pero también imágenes, vídeos, audios, con un nivel de competencia similar o superior al de los humanos, algo que nunca antes había sucedido en nuestra historia. Aunque la inteligencia artificial exista desde los años 50 formalmente como disciplina,

es ahora cuando estamos experimentando el impacto que puede tener y estamos también viviendo unos sistemas con unas capacidades nunca vistas. Estas técnicas de inteligencia artificial generativa impactan de lleno también en la comunicación. Y por eso quizás también hay aún más interés en el contexto de los medios de comunicación.



P: *¿Estas técnicas son una evolución de los sistemas expertos que ya había hace 30 años o suponen un punto de ruptura?*

R: No, no es una evolución de los sistemas expertos. Históricamente ha habido dos grandes escuelas de pensamiento con respecto a la inteligencia artificial desde sus inicios, en los años 50. La primera es la escuela *top-down* o simbólico-lógica, que parte de la idea de que los seres humanos tenemos mucho conocimiento y si podemos representar ese conocimiento en las máquinas usando símbolos y aplicamos reglas de la lógica y otro tipo de reglas para derivar conocimiento nuevo a partir de ese conocimiento podríamos alcanzar la inteligencia artificial. Y el ejemplo canónico de este acercamiento a la inteligencia artificial son los sistemas expertos, que fueron la primera comercialización exitosa de la inteligencia artificial desde mediados de los 70 hasta mediados de los 90. La segunda escuela, que es a la que yo pertenezco y la que está experimentando esta revolución, es la que se conoce como la escuela *bottom-up*, o escuela conexionista, y parte de una observación distinta con respecto a los seres biológicos inteligentes: que aprendemos a partir de la experiencia, de las interacciones con nuestro entorno. Aprendemos a partir de datos. De manera que, si queremos inventar inteligencia artificial, tendríamos que ser capaces de desarrollar algoritmos que también aprendan a partir de datos.

P: *¿Y eso cómo se consigue?*

R: El ejemplo canónico de esta escuela serían las redes neuronales que, aunque existen desde los años 40, en los últimos 15 años es cuando están realmente revolucionando. Yo diría que prácticamente todos los sistemas de inteligencia artificial que utilizamos hoy en día, sea generativa o no; desde un sistema para reconocer caritas en las fotos o para reconocer el habla o para hacer reco-

mendaciones de películas, vídeos, libros... son sistemas cuyo componente fundamental es el de aprendizaje basado a partir de datos, utilizando lo que se conoce como el aprendizaje automático y dentro de este el aprendizaje profundo, y se ha conseguido por esta aproximación *bottom-up*.

P: *¿Qué ha cambiado en estos 15 años para esta eclosión?*

“La IA está transformando profundamente la sociedad y enriqueciendo a un oligopolio de empresas tecnológicas”

R: El motivo por el que la inteligencia artificial ha adquirido tanta relevancia en los últimos 15 años es porque se ha producido la confluencia de tres factores que han impulsado de manera exponencial las técnicas *bottom-up*. En primer lugar, la disponibilidad de cantidades ingentes de datos, lo que se conoce como *big data*. Además, datos no estructurados: vídeos, audios, textos, imágenes; datos que son fruto de la ubicuidad de la tecnología y de la huella digital que dejamos en el mundo digital, pero también son fruto de la digitalización del mundo físico, que cada vez más se está produciendo con sensores de todo tipo. El segundo factor es la disponibilidad de grandes capacidades de computación a bajo coste gracias a la ley de Moore. Y en tercer lugar es el desarrollo de modelos de aprendizaje, inspirados en las redes de los años 50, pero muchísimo más complejos, que son redes neuronales profundas o aprendizaje profundo. Y ese cóctel

de tres ingredientes, datos, computación y modelos, es lo que hace que podamos hablarles a nuestros móviles o podamos inferir la estructura de las proteínas en tres dimensiones o ganarle al mejor jugador de Go del mundo. Lo importante es entender que la inteligencia artificial está transformando profundamente la sociedad y generando una riqueza trillonaria, sobre todo para un oligopolio de empresas tecnológicas.

P: *¿Podemos decir que ya se ha superado el test de Turing o es un concepto obsoleto?*

R: Cuando Alan Turing propuso el test había una visión muy limitada y casi unidimensional de lo que es la inteligencia humana. Es un test en el que el humano interacciona con un sistema vía texto y recibe respuestas vía texto. Y si el humano no sabe diferenciar si las respuestas vienen de otro humano o de un sistema de inteligencia artificial, pues se dice que ese sistema artificial es inteligente. Pero ahora sabemos que la inteligencia humana es mucho más que contestar mensajes de texto. Tenemos múltiples inteligencias, muchísimas habilidades. Somos muy inteligentes aún sin utilizar el lenguaje. Evidentemente, la visión del test de Turing de lo que es la inteligencia es muy limitada. Podríamos decir que los chatbots conversacionales actuales, basados en grandes modelos de lenguaje, superan el test de Turing, porque para cualquier humano son indistinguibles de lo que otro humano te podría estar diciendo.

P: *Todo este desarrollo reciente de la inteligencia artificial suscita recelos. ¿Tenemos razones para estos temores?*

R: La inteligencia artificial está en el corazón de la cuarta revolución industrial, que es en la que nos encontramos inmersos. Y esta revolución industrial, igual que las anteriores, está transformando profundamente todos los ámbitos de la sociedad. En cualquier momen-

to histórico en el que hay una revolución industrial, hay más incertidumbre y, por tanto, mayor falta de confianza o de tranquilidad a nivel social. Hay autores que equiparan el papel que jugó la electricidad en la segunda revolución industrial con el papel que está jugando la inteligencia artificial en la cuarta. Porque, al igual que la electricidad, la inteligencia artificial es una disciplina transversal de



Nuria Oliver con otros miembros del ELLIS Alicante.

propósito general, que se puede aplicar a cualquier campo de conocimiento y a cualquier sector. También es invisible y yo creo que ahí los modelos generativos están ayudando, porque hasta hace dos años, si tú le preguntabas a cualquier persona de la calle qué era la inteligencia artificial, probablemente te diría que robots. Aunque en realidad en su móvil ya estaban utilizando constantemente inteligencia artificial. Pero hoy en día, si tú preguntas qué es la inteligencia artificial, probablemente te contesten que es el ChatGPT.

P: ¿Entonces, la inteligencia artificial solo es software complejo?

R: Sí, estamos hablando de software. Porque, en realidad, la inteligencia artificial es invisible, como la electricidad. Es el software que hace que los sistemas sean inteligentes. Pero además la inteligencia artificial tiene dos propiedades

Hacia una inteligencia artificial humanizada

P: ¿En qué consiste la red ELLIS?

R: ELLIS significa European Laboratory for Learning and Intelligence Systems y es una red europea de excelencia científica en inteligencia artificial, creada por la propia comunidad científica y que ahora agrupa a las mejores mentes y a los mejores centros de investigación en este ámbito en Europa, preocupados por la falta de competitividad de nuestro continente y especí-

ficamente en investigación en inteligencia artificial. En este contexto, ELLIS Europa se financia acudiendo a convocatorias competitivas y tiene distintos ámbitos de actuación. Uno de ellos es fomentar la creación de unidades ELLIS y de Institutos ELLIS, que son centros de excelencia en inteligencia artificial.

P: ¿Cómo nació el que usted dirige en Alicante?

R: Nació con el apoyo y el impulso de la Generalitat Valenciana, porque forma parte de la estrategia valenciana de inteligencia artificial. Hicimos una propuesta a ELLIS Europa

para la creación de una unidad ELLIS aquí, que fue evaluada positivamente y conseguimos crear esta unidad ELLIS en Alicante, que además es singular dentro de la Red; en primer lugar, porque es la única unidad creada desde cero, como una fundación de investigación en inteligencia artificial con el objetivo de atraer y retener talento que no vendría de otra manera. Y, en segundo lugar, porque tenemos una temática clara que es inteligencia artificial, ética, responsable y para el bien social.

En la web del centro se especifican algunas de esas implicaciones éticas, entre las que destacan: la violación de la privacidad, la discriminación y los sesgos algorítmicos, la falta de transparencia algorítmica, la manipulación subliminal, la desinformación, el excesivo consumo energético que conlleva y la falta de diversidad.

extremadamente potentes. Nos permite no solamente explicar el pasado o interpretar el presente, sino también predecir el futuro. Y como hemos estado hablando, permite no solamente interpretar patrones, hacer predicciones, detectar o interpretar datos, sino que también nos permite generar contenido. Hay

también un cierto temor hacia la inteligencia artificial, porque hay un desbalanceo entre las visiones apocalípticas de la inteligencia artificial en el contexto de los medios de comunicación y la realidad de esta herramienta. Sabemos que necesitamos la inteligencia artificial para sobrevivir como especie, para afrontar

los grandes retos del siglo XXI. La inteligencia artificial tiene un inmenso potencial para el bien social y por eso trabajamos en ella y por eso yo he dedicado mi vida profesional a trabajar en ello y he contribuido a crear la Fundación ELLIS de Alicante, que tiene como objetivo la inteligencia artificial para el bien social.

P: ¿Entonces no hay nada que temer?

R: Bueno, dicho eso, al mismo tiempo no podemos ser inocentes. Hay que reconocer que la inteligencia artificial no es perfecta, que los sistemas de inteligencia artificial adolecen de una serie de limitaciones y que plantean dilemas y retos éticos que tenemos que abordar para que su potencial para el bien social se convierta en una realidad. Entonces, yo creo que ni todo es positivo, como ocurre con cualquier otra herramienta poderosa, ni todo es negativo. Lo que tenemos que hacer es ver cómo podemos maximizar ese impacto positivo y minimizar el impacto negativo. Y aquí un elemento también muy importante para fomentar o para evitar la manipulación de la formación de la opinión pública, es la educación y la divulgación científico-tecnológica. Es muy importante que la información sobre inteligencia artificial sea rigurosa.

P: Para conseguir esos objetivos ¿es necesario regular el uso y la aplicación de la inteligencia artificial?

R: Es evidente que sí, igual que se regulan todos los productos y servicios que consumimos, para asegurarnos de que el impacto de su uso no va a ser negativo. Lo extraño es que, de momento, no se regulen los sistemas inteligentes de la misma manera que se regulan otros. Es verdad que en algunos sectores regulados los sistemas de inteligencia artificial están sujetos a esa regulación. Pero, como he comentado antes, dado que la inteligencia artificial es transversal y se puede aplicar a cualquier sector, hay muchas lagunas.

Como sabrás, en Europa, la Comisión Europea, en abril del 21, publicó un comunicado donde se proponía una regulación de la inteligencia artificial, conocida como el AI Act, que se espera finalice sus trámites legislativos este año con la Presidencia de España del Consejo de la Unión Europea.

P: Pero este es un fenómeno global y su regulación también debería serlo.

R: Hay otras regiones del mundo que también están trabajando en sus re-



“Es necesario que se regule el uso y aplicación de la inteligencia artificial, como se regula todo lo que consumimos”

gulaciones o que ya las han aprobado, como China, que ha establecido una serie de normas sobre la inteligencia artificial y los sistemas generativos. Esto forma parte de un movimiento mundial. En el ámbito occidental, Europa es la región más adelantada y por eso países como el Reino Unido o Estados Unidos están también muy atentos a ver cómo evoluciona la regulación europea de inteligencia artificial para ver qué lecciones se aprenden, cuáles son las mejores prácticas, qué es lo que funciona, lo que no funciona, etcétera.

P: Hablaba antes de la importancia de una divulgación rigurosa para que la gente sepa realmente qué esperar de la inteligencia artificial y qué temer. ¿Cree que los medios se centran sobre todo en los efectos negativos, como los sesgos de género, de raza y de estatus de los sistemas de IA?

R: Bueno, los sesgos de discriminación algorítmica es un área muy activa de investigación en general y para nosotros en ELLIS Alicante también. Sí, se detectan, y podemos preguntarnos por qué se utilizan algoritmos en áreas tan importantes en la vida de las personas como decisiones judiciales o policiales, concesión de créditos, selección de empleo, acceso a programas sociales, admisiones en colegios o universidades, etcétera. Y la respuesta es porque evidentemente las decisiones humanas tampoco son perfectas. Los humanos somos susceptibles a la corrupción; tenemos amigos y enemigos; podemos tener un mal día; sentimos hambre, sueño... Tenemos unos 200 sesgos cognitivos que impactan nuestra toma de decisiones y que hacen que no sean ni justas, ni equitativas ni óptimas. La idea es que, si tenemos datos y estos son una representación fidedigna de una realidad subyacente, podemos entrenar algoritmos de inteligencia artificial a partir de esos datos y deberían ayudarnos a tomar decisiones que fuesen mejores que las decisiones humanas, que no estuviesen sujetas a esas limitaciones.

P: ¿Los sesgos de la máquina son los que les inculcan quienes las manejan?

R: Lo que hemos encontrado en estos últimos años es que esa hipótesis de que los datos son un reflejo fidedigno de la realidad es incorrecta, que a veces los datos no son un reflejo fidedigno de la realidad, que son datos parciales y contienen sesgos, o que los datos reflejan una realidad sesgada porque el mundo es imperfecto y hay discriminación. Además, a veces se diseñan mal los algoritmos, con lo cual están incorporando sesgos nuevos e incluso se están amplificando los sesgos existentes. Entonces, ese es un área muy activa de investigación, que se llama justicia algorítmica, que contempla distintos mecanismos y estrategias para conseguirla. Además, en la AI Act europea es una de las exigencias

que se contemplan; por ejemplo, para los casos de uso de alto riesgo, como es la medicina, la educación, el transporte, etcétera, tiene que haber garantías de no discriminación.

P: ¿Cómo se puede conseguir?

R: Hay distintas familias de estrategias. Unas se enfocan en mitigar los sesgos en los datos, de manera que cuando aprendes a partir de esos datos, como has eliminado los sesgos, el sistema ya no aprende esos sesgos. Se llaman técnicas

independientemente de que los datos y el modelo estén sesgados el sistema no tiene por qué hacer lo que diga el modelo, y modifican las decisiones para que sean justas. Y eso se conoce como técnicas de *post-processing*. Y obviamente se pueden combinar las tres.

P: ¿Trabajan en alguna de esas técnicas en ELLIS Alicante?

R: Nosotros en el ELLIS Alicante, hemos inventado una técnica de *pre-processing* que se llama Fairshap y estamos

de lo que tú programes y de cómo lo diseñes. Por eso hay que ser consciente en todos los pasos, en los datos, en los algoritmos y en las decisiones, en los tres estadios del desarrollo de un sistema de inteligencia artificial. Puede que los datos estén sesgados, pero también puedes diseñar un algoritmo que esté muy sesgado y también puedes tomar decisiones que estén sesgadas; por ejemplo, porque no está interpretando bien lo que te dicen los modelos y te dejas influenciar por



Nuria Oliver con Felipe VI durante la entrega del premio Rei Jaume I de Nuevas Tecnologías 2021.

de preprocesamiento. Luego, hay familias de técnicas que se concentran en modificar los propios algoritmos para que en la función que optimizan haya un componente de justicia algorítmica, de manera que, aunque los datos estén sesgados, aprendan a tratarlos de manera justa y aprendan a tomar decisiones justas. Estas se llaman técnicas de *in-processing*. Y luego hay otras técnicas que consideran que

trabajando en la combinación de técnicas de *pre-processing* con técnicas de *in-processing*. Es un área muy activa de investigación, donde se están consiguiendo muchos progresos.

P: ¿Podemos decir que el algoritmo es objetivo pero los datos que lo nutren pueden no serlo?

R: Bueno, los algoritmos no tienen tampoco por qué ser objetivos. Depende

de tus propios sesgos humanos. A este respecto, un área mucho menos investigada, pero que es una de nuestras líneas, es cómo la inteligencia artificial nos puede ayudar a los humanos a entender mejor, detectar mejor y mitigar mejor nuestros sesgos. Es decir, por una parte, en el área de la justicia algorítmica, lo que hacemos es inventar algoritmos que no discriminen, pero, por otra parte, la inteligencia

artificial también nos puede ayudar a los humanos a ser mejores humanos de alguna manera.

P: *En esa línea, ¿nos puede ayudar también la inteligencia artificial a entender nuestro cerebro?*

R: Sí, sin duda, porque el estado del arte en la neurociencia al final es digital: los niveles de activación de las neuronas del cerebro se digitalizan. El objetivo del Brain Project era crear una versión digital del cerebro humano. Una vez está digitalizado, al final son datos en un ordenador y eso es el caldo de cultivo, el alimento de la inteligencia artificial *bottom up*, basadas en el aprendizaje a partir de datos. En cualquier ámbito, no solo en el contexto del cerebro, donde se digitaliza un fenómeno subyacente, como sucede en física, en astrofísica, en química, en medicina... se dispone de datos no estructurados, que son susceptibles de ser analizados con inteligencia artificial. De hecho, quizás nuestra única esperanza para darle sentido a esos datos, por su volumen, por su complejidad, por su variedad... es usar inteligencia artificial.

P: *Mirando al futuro, la ciencia ficción nos habla de máquinas con identidad, autoconscientes, con voluntad, emocionales, egoístas...*

R: Eso es ya Inteligencia artificial general. Desde el punto de vista del nivel de competencia, los sistemas de inteligencia artificial se han dividido históricamente en tres niveles. El primero es lo que se conoce como inteligencia artificial específica. Son sistemas muy buenos haciendo una tarea, mejor que el mejor de los humanos, pero solo saben hacer esa tarea y probablemente ni siquiera saben qué significa esa tarea. Toda la inteligencia artificial actual es específica. El siguiente nivel es la inteligencia artificial general, que sería una inteligencia con el mismo nivel de complejidad y de diversidad que la inteligencia humana, incluyendo efectivamente conceptos como son la auto-

conciencia y las emociones. Yo creo que estamos muy lejos de conseguir la inteligencia artificial general. No sé si algún día la tendremos y no sé si como especie es algo que realmente nos interese conseguir. Y luego está el tercer nivel, que defienden autores como Nick Bostrom, de la Universidad de Oxford, que dicen ¿Y por qué nos vamos a detener en la inteligencia humana? Si la capacidad de computación continúa creciendo de manera exponencial, podríamos computa-



“Estamos muy lejos de conseguir una inteligencia artificial general, la que tendría autoconciencia y emociones”

cionalmente superar la inteligencia humana, dando lugar a lo que se conoce como la superinteligencia.

P: *¿Cómo sería esa superinteligencia?*

R: Nosotros no entendemos esa superinteligencia, de la misma manera que una hormiga no entiende nuestra inteligencia, porque es una inteligencia superior a la nuestra. Creo que estamos muy lejos de tener una inteligencia artificial general y aún mucho más lejos de construir, si es que algún día es posible y nos interesa hacerlo, una superinteligencia.

P: *¿Esas propiedades de la inteligencia artificial general serían emergentes? Es decir, ¿nacerían espontáneamente con la creciente complejidad de los sistemas de inteligencia artificial o tendríamos que dotarles nosotros con ellas?*

R: Bueno, a ver. Creo que es difícil definir y medir qué es la autoconciencia,

qué es el sentimiento de la experiencia vital si no eres una entidad biológica. Hay muchas definiciones que tendríamos que redefinir en el contexto computacional. Y creo que es interesante como ejercicio filosófico y en el contexto de la ciencia ficción. Pero también está representando una distracción en la opinión pública, creando esta visión un poco apocalíptica de la inteligencia artificial y este alarmismo, cuando al mismo tiempo, de manera silenciosa, la inteligencia artificial ya ha ido penetrando en muchos ámbitos de nuestra vida sin que nos hayamos dado cuenta y sin que nadie nos haya preguntado. Lo más importante es enfocarnos en lo que ya está sucediendo con la inteligencia artificial, en las oportunidades que nos brinda y también en los retos que tenemos que abordar para que su impacto sea positivo.

P: *La inteligencia artificial generativa ya es capaz de generar dibujos y pinturas, escribir novelas y poemas, pero ¿hay realmente creatividad ahí? Porque el arte es conseguir una nueva forma de expresar emociones, y si no sientes esas emociones, es muy difícil que surja.*

R: Es interesante destacar y llevo ya un tiempo transmitiéndolo, que la creatividad y la creación artística es mucho más que el resultado del proceso, que la obra es el proceso en sí, es la intencionalidad, es el contexto, es el significado que tiene para el o la artista y lo que ha querido transmitir. Enfocar solo el resultado es tener una visión muy limitada de lo que es la creatividad humana y la expresión artística. Con la inteligencia artificial generativa se producen solo resultados; pero en el algoritmo no hay proceso ni intencionalidad ni significado profundo. Solo vemos el poema, la historia o el cuadro. Lo que sí puede ocurrir es que el o la artista humano utilice la inteligencia artificial como instrumento en su proceso creativo. ©



Filetes de buey producidos en laboratorio y a la venta en EE. UU.

Las alternativas que la ciencia ofrece para mejorar la salud humana y ambiental a través de la alimentación

Del laboratorio a la mesa

El constante crecimiento de la población mundial, la presión sobre los recursos naturales, la preocupación por las amenazas ambientales (especialmente el cambio climático) y un creciente interés por la salud hace que nos enfrentemos a grandes desafíos alimentarios. Aunque parte de la solución requiere un cambio de hábitos en el consumo, la ciencia lleva años explorando alternativas de producción, como la carne cultivada y fuentes proteicas basadas en

algas e insectos. También trabaja en el desarrollo de dietas personalizadas —según los genes, la microbiota particular y el estilo de vida— para prevenir enfermedades y evitar el envejecimiento acelerado. Una evolución del modelo forzado por las matemáticas: no disponemos de más Tierras para alimentar a los más de 10 000 millones de bocas que habrá en el planeta a medio plazo.

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

Casi 900 millones de personas pasan hambre en el mundo. El equivalente a los habitantes de 20 Españas. Y tiene visos de aumentar de la mano del actual crecimiento demográfico, tan desbocado que hará que haya 10 400 millones de humanos en la Tierra (un 30 % más que ahora), a final de siglo. Naciones

Unidas considera que, para alimentarlos a todos, los agricultores necesitarán producir un 60 % más de alimentos, forrajes y biocombustibles. Todo un reto para un planeta que cada año agota antes los recursos que tiene disponibles. El 2 de agosto de 2023, entramos en déficit ecológico, un día antes que en 2022 y cuatro meses

antes que en 1970. Necesitamos 1,75 planetas para preservar nuestro actual modo de vida y eso no parece sostenible.

Actualmente, la agricultura ya copa más del 80 % del agua que se consume en el mundo y es el mayor responsable de la eutrofización terrestre y marina. Además, contamina acuíferos hasta ha-

cerlos imbebibles y provoca la erosión del suelo fértil, base de la alimentación. De entre todos los productos alimenticios, la carne y los lácteos son los que llevan aparejado un mayor impacto ambiental, según un informe del año pasado del Ministerio de Consumo. Se debe a que es “altamente intensivo e industrial, fuertemente dependiente del uso de recursos fósiles, de fertilizantes químicos y de grandes cantidades de agua”, resalta el texto.

Para empezar, la cantidad de tierras necesarias para sostener la industria ganadera es enorme: no solo las directamente utilizadas por los animales, sino que la superficie destinada a producir su alimento supone más del 30 % de la totalidad de los cultivos en todo el mundo, según Pete Smith, catedrático de la Real Sociedad de Londres para el Avance de la Ciencia Natural. Este director científico del centro escocés especializado en cambio climático ClimateXChange participó en una reciente revisión científica sobre el tema, promovida por Greenpeace. En ella también aseguraba que “la carne de rumiantes presenta una huella de gases de efecto invernadero hasta 100 veces más elevada que la de los productos alimenticios de origen vegetal”.

Parte de la solución pasa por cambiar los modelos de producción ganadera, para hacerlos más sostenibles. Aunque Smith asegura que “la necesidad de reducir la demanda de productos de origen animal es la actual postura científica dominante”, hay una tercera vía que va perdiendo la etiqueta de futurista: crear la carne en el laboratorio.

In vitro

En 2013, se presentó en Londres la primera hamburguesa cultivada in vitro al módico precio de 330 000 dólares (unos 309 000 euros). Más de un lustro después, en 2020, Singapur permitía la venta de pollo de laboratorio y se convertía en el primer país del mundo en ofrecerlo en

Algas y grillos, nutrientes alternativos

Los consumidores ya empiezan a tener disponibles alimentos basados en algas e insectos, que son una fuente de proteínas alternativa. Las primeras son ricas también en ácidos grasos omega-3 y en otros nutrientes y tienen la ventaja añadida de que, si se cultivan en sistemas de acuicultura sostenible, pueden contribuir a la salud de los océanos al absorber carbono. Por su parte, los insectos, como los grillos, son una fuente de proteínas de alta calidad y de hierro. Además, su producción a gran escala requiere muchos menos recursos que la cría de ganado y emite menos gases de efecto invernadero. El principal reto de esta posibilidad alimenticia es su aceptación entre los consumidores, que en su mayoría son reacios debido a las barreras culturales y psicológicas. ▀



Plato mexicano de chapulines, un insecto de la familia de los grillos.

sus restaurantes más exclusivos por menos de 30 dólares (unos 28 euros). Ahora, EE. UU. se ha sumado a esta corriente: la Administración de Alimentos y Medicamentos americana (FDA, por sus siglas en inglés) autorizó su comercialización en junio de este mismo año. Y aunque todavía cuesta encontrarla en la calle, el célebre cocinero José Andrés Puerta ha prometido ser el primero en incorporar esta carne al menú del establecimiento que regenta en Washington.

La carne cultivada es, en esencia, carne real. Solo que sus células musculares, aunque proceden de un animal vivo —o de un cigoto del mismo—, no crece

en el propio animal sino de manera aislada y asistida, en un recipiente de acero llamado biorreactor. En ellos viven y se multiplican las fibras, suspendidas en un medio acuoso donde tienen disponibles las proteínas, azúcares, vitaminas, sales y grasas que necesitan. Estos componentes son los mismos que le llegarían a través de la alimentación si siguieran formando parte del organismo.

El proceso inicial de producción de pollo artificial implica la obtención de muestras celulares de un huevo fecundado de gallina. De ellas, se eligen las óptimas para mantener una producción continua de carne, lo que da lugar a una línea

celular específica. Éstas se congelan en un banco de células del que se va extrayendo para su replicación. Tras cuatro a seis semanas, el material se captura, se procesa y se utiliza la impresión 3D para obtener la forma y textura deseada.

Resulta un producto muy similar al tradicional en sabor y textura, y promete requerir hasta un 90 % menos de agua y de energía que la producción tradicional a partir de la cría de animales. También, puede reducir en un 80 % los gases de efecto invernadero, proclaman sus defensores. Entre ellos está el chef español, considerado por la revista Time una de las 100 personas más influyentes del mundo. Puerta forma parte de la junta directiva de la empresa Good Meat, una de las dos autorizadas para la venta de carne artificial en EE.UU. Y como expresa en la web de la compañía, “necesitamos innovar, adaptar nuestra alimentación a un planeta en crisis. Necesitamos crear comidas que alimenten a la gente al mismo tiempo que sostenemos nuestras comunidades y el medio ambiente”.

En ese futurible se dibuja una ensoñación: garantizar la seguridad alimentaria. La agricultura de laboratorio, ya sea de células cárnicas o vegetales, pro-



Cristian Moyano.

mete reducir la presencia de patógenos y resto de tratamientos, como antibióticos, en lo que nos llevamos a la boca. También, pretende disminuir el riesgo de desabastecimiento al no depender de animales que puedan padecer epidemias, por ejemplo. Sin embargo, hay desafíos a superar, como la reducción de los costes de producción, para que sea accesible a todos.

Globalizado y energívoro

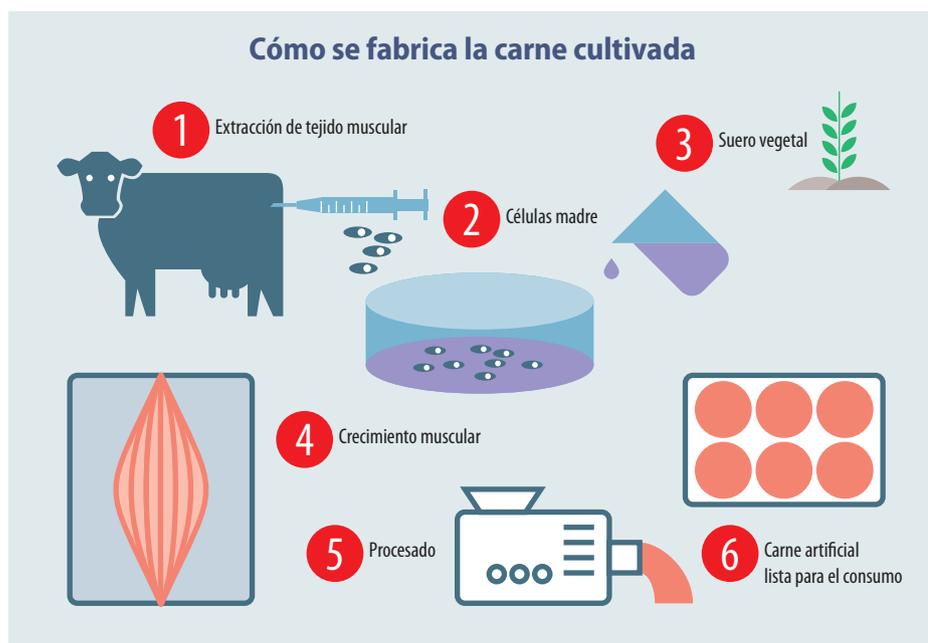
La agricultura celular no queda exenta de controversia. “El alcance de su contribución a una mejor calidad medioambiental gracias a la hipotética reducción

de recursos y de impacto sobre los ecosistemas es dudoso, pues sigue dependiendo de un sistema industrial, globalizado y energívoro, y sigue requiriendo más recursos que la producción de proteínas vegetales”, avisa Cristian Moyano, doctor en ciencia y tecnología ambientales y profesor en el Departamento de Filosofía de la Universidad Autónoma de Barcelona.

Su promesa de acabar con las desigualdades alimentarias y ofrecer alimentos proteicos para todos también es fruto de debate: “aunque el problema de la desnutrición en el mundo realmente fuera una cuestión de ausencia de alimentos y no de un mal reparto o de despilfarro, vender carne de laboratorio sigue desatendiendo el derecho a una soberanía alimentaria”, señala Moyano en una reciente publicación. Actualmente, según estimaciones del Programa Mundial de Alimentos de Naciones Unidas, la producción alimentaria mundial es suficiente para satisfacer las necesidades de toda la población global, sin embargo, existe un desafío crítico de desperdicio alimentario: más de un tercio no llega al plato. Por ello, recalcan que se necesita abordar no solo la producción, sino también la distribución y el uso eficiente de los recursos alimentarios para garantizar el acceso equitativo a la alimentación.

Moyano señala que también es discutible que la producción en laboratorio garantice el bienestar animal. El medio de cultivo para el crecimiento de la carne sintética requiere de suero fetal bovino extraído de vacas inseminadas artificialmente o de biopsias del animal vivo. Esto no aporta “ninguna seguridad por el respeto de su integridad”, concluye el también miembro del Comité de Ética Asistencial del Hospital Trueta de Girona.

Vengan de donde vengan los nutrientes, en lo que sí parece haber consenso es en que la alimentación del futuro va a ser personalizada, con el foco puesto





Planta piloto de producción de carne de laboratorio de la empresa Good Meat, en la que participa el cocinero español José Andrés Puerta.

en la salud y la prevención de enfermedades. La ciencia está volcada en establecer la relación causal entre aporte y beneficio, que no es tarea fácil. “A pesar de que numerosos estudios han encontrado asociaciones significativas entre la alimentación y diferentes enfermedades, establecer una relación entre dieta y salud es sumamente difícil. No sólo la medición de la primera es compleja, sino que existe una variabilidad interindividual considerable”, explicaba Dolores Corella, catedrática de Medicina Preventiva y Salud Pública, durante la conferencia plenaria que ofreció el pasado octubre en el congreso científico internacional Lifestyle, Diet, Wine & Health.

Las personas no responden por igual ante una misma ingesta y esto sucede porque cada organismo transforma los constituyentes de la dieta de manera distinta. Por eso, aunque algunos estudios sugieren que la dieta mediterránea podría asociarse a una menor concentración de glucosa en sangre y a una disminución de probabilidad de padecer un ictus, todavía falta “evidencia científica”, avisa Corella. Por lo mismo que un mismo plato engorda más a unos que a otros.

Así que el primer escollo está en determinar lo que Corella denomina los “fenotipos dietéticos”, que es la caracterización del individuo en función de cómo metaboliza los nutrientes. Y esto

está ligado a la identificación de biomarcadores que delaten predisposiciones en la persona y que puedan medirse a través de un análisis —de plasma, de orina—. “Los primeros que se buscaron se basaron en la genómica”, explica esta pionera de las interacciones genes-dieta.

La genómica nutricional o nutrigenómica estudia el perfil genético de una persona para identificar variaciones que pueden afectar a la forma en que su cuerpo procesa los nutrientes y que la predispone a padecer ciertas enfermedades, como la obesidad y los fallos cardiovasculares. Por ejemplo, si uno decide hacerse vegetariano, igual le convendría saber antes si posee el gen FADS1. Este es

Biotecnología para una alimentación sostenible

La biotecnología se ha erigido en las últimas décadas como una herramienta que anhela producir alimentos más resistentes a plagas, menos consumidora de recursos y con un menor impacto ambiental. Es el caso de los cultivos modificados genéticamente, con menor necesidad de plaguicidas y mayor rendimiento, lo que ahorra insumos. Esta

tecnología pretende prolongar la vida útil de los alimentos para conseguir mayor seguridad alimentaria y reducir el desperdicio que, a nivel global, se sitúa en un tercio de lo que se produce. Esta rama de la ciencia se enfrenta a preocupaciones éticas y ambientales. Entre ellas está la de determinar cuál es su impacto en la cadena trófica y el efecto sobre la diversidad silvestre. ▀



Dolores Corella.

el responsable de que las células produzcan las enzimas implicadas en la asimilación y biosíntesis de Omega-3 y Omega-6, mucho menos presentes en dietas basadas en vegetales en comparación con las omnívoras. La carencia de estos ácidos grasos afecta al desarrollo adecuado del cerebro, así como al control de las inflamaciones y la respuesta del sistema inmunitario. En el caso de carecer del alelo, tendrá que suplementarse.

Otro de los factores que toma cada vez más relevancia es la microbiota intestinal, que es la comunidad de microorganismos presentes mayoritariamente en el intestino, que “participa de forma muy activa en el procesado de los constituyentes de la dieta”, explica Juan Carlos Espín, investigador del Laboratorio Alimentación y Salud, del Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CSIC). Es tan específica y única en cada individuo que “en un crimen en el que se haya visto envuelto uno de dos gemelos idénticos, un análisis convencional de ADN no delataría cuál de ellos lo cometió, pero sí un estudio de su microbiota”, señala.

El grupo de investigación de Spin fue pionero hace 20 años en definir los “metabotipos”, que agrupan a todos los humanos en tres grandes grupos -A, B y O- en función de si son capaces o no de producir ciertas moléculas que son beneficiosas para el organismo”, señala el



Juan Carlos Espín con miembros de su grupo de investigación.

científico, que ha sido señalado como uno de los 14 españoles más citados a nivel mundial por sus estudios sobre los beneficios de los alimentos vegetales en la salud.

“Uno no engorda solo por una causa. La obesidad, como la mayoría de las patologías y procesos de envejecimiento, es multifactorial”, señala Espín. “Una dieta personalizada, dirigida, pensada en este contexto preventivo de salud, no tiene sentido si no se practica ejercicio, por ejemplo”, enfatiza. En este sentido, el monitoreo continuo del individuo puede ser un gran aliado para recabar información valiosa. La tecnología *wearable* y las aplicaciones móviles permiten a las personas realizar un seguimiento en tiempo real de su consumo de alimentos, niveles de actividad y otros datos de salud y estilo de vida. Y, gracias a la inteligencia artificial y al aprendizaje automático es posible analizar esta gran cantidad de datos e identificar patrones y tendencias, lo que puede ayudar a crear recomendaciones dietéticas más precisas.

Con un simple análisis de orina, sabremos si una persona puede aprovechar

y en qué grado, por ejemplo, los famosos polifenoles presentes en la granada, nueces, fresas y frambuesas. Si tu metabotipo es cero, mala cosa. Pero, para saberlo, todavía falta tiempo: “a día de hoy, ninguna rutina clínica integra estas prácticas de prevención”, puntualiza Espín. Porque se trata de prevenir, no de curar. Como él mismo subraya, “no existen los superalimentos, porque ningún alimento cura: ni quitan el dolor de cabeza ni el de articulaciones”. Para desgracia de impacientes e improvisadores, se trata más bien de que el consumo regular de ciertos alimentos y la práctica de buenos hábitos de vida —deporte, dormir bien...— puede aportarnos un mejor envejecimiento a largo plazo. Y eso, en el mejor de los casos.

Lo que parece claro es que la alimentación no se limita a la ciencia y la tecnología, sino que también implica la educación y la toma de decisiones conscientes por parte de los individuos. Su evolución futura será una combinación de avances científicos, desarrollo tecnológico, preferencias personales y conciencia de nuestra salud y la de nuestro entorno. ©

Sala donde se celebró la última reunión de la Convención de Seguridad Nuclear, en la sede del OIEA en Viena.



El sistema de convenciones del Organismo Internacional de Energía Atómica

Compromisos internacionales para garantizar un mundo nuclear y radiológico más seguro

Las convenciones internacionales son acuerdos entre estados y organizaciones internacionales que se rigen por el derecho internacional. Dentro del ámbito de la seguridad nuclear tecnológica y física y la protección radiológica, España cumple con los compromisos contraídos mediante su adhesión a diversas de ellas. Las distintas convenciones suelen referirse a campos concretos y, a través de ellos, los

estados se comprometen voluntariamente a informar de los cambios, en el ámbito de su legislación nacional, de las adecuadas medidas legislativas, reglamentarias y administrativas, así como cualesquiera otras que sean necesarias, para dar cumplimiento a los términos concretos de cada una de ellas.

■ Texto: **Pura C. Roy** | periodista de ciencia ■

Para fomentar y garantizar los estándares de seguridad adecuados dentro del mundo nuclear y radiológico por parte de todos los países, en las últimas décadas se han ido alcanzando acuerdos en diferentes aspectos de estos ámbitos mediante convenciones firmadas por la mayor parte de los países concernidos. El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) ha tenido un papel pre-

ponderante en su impulso y desarrollo, actúa como depositario y tiene el papel de garante del cumplimiento de la convención, pero conviene recordar que no es una de las partes contratantes, sino que son los países firmantes y las instituciones internacionales adheridas. Y, por tanto, tampoco tiene un papel decisivo. Es un organismo neutral que vela por el cumplimiento de las reglas establecidas.

Según Manuel Aparicio, del Área de Relaciones Internacionales del Consejo y Punto de Contacto Nacional para la Convención de Seguridad Nuclear, “el CSN no tiene potestad para firmar ninguna convención, pero hay toda una serie de ellas que nos afectan de una manera u otra”. Los objetivos de dicha convención son conseguir y mantener un alto grado de seguridad nuclear en todo el mundo.

Lo que implica garantizar la seguridad de las instalaciones nucleares y los riesgos radiológicos que pueden conllevar para las personas y el medio ambiente. “Esta Convención es de gran importancia para el CSN. Hasta ahora la han firmado 91 partes contratantes, todos ellos países a los que se une Euratom, que participa como entidad propia. Además, a esta convención no solo se han adherido países con programas nucleares, sino que también participan otros que no las tienen”, explica Aparicio.

Con una periodicidad de tres años, los firmantes de esta convención deben elaborar y presentar un informe sobre las medidas adoptadas para dar cumplimiento a sus obligaciones, que se somete al escrutinio de las restantes partes contratantes de la convención durante un proceso de revisión.

“Al ser muchos los países que participan, estas revisiones inter pares se hacen en grupos y a cada grupo se le asignan entre siete y nueve países para que presenten sus informes y respondan a las preguntas de los demás. Además, y es algo que ocurre con frecuencia, cuando un país está estratégicamente interesado en otro, como le ocurre a España con Portugal, Estados Unidos y Francia aunque no les toque su grupo, pueden trasladar preguntas que sean de su interés, remitiendo las cuestiones al OIEA para su coordinación entre países”.

La última revisión tuvo lugar en Viena, del 20 al 30 de marzo, en la sede de OIEA. Asistieron 900 delegados en representación de las partes contratantes. Entre sus prioridades, compartidas en la octava y novena Reunión Conjunta de Revisión de la Convención sobre Seguridad Nuclear, estaban fortalecer las capacidades reguladoras nacionales, teniendo en cuenta los aspectos de seguridad de las tecnologías nuevas e innovadoras; fomentar la colaboración internacional y las misiones de revisión por pares, así

como el fortalecimiento de los mecanismos de preparación y respuesta ante emergencias.

El director general del OIEA, Rafael Mariano Grossi agradeció en esta reunión el gran compromiso internacional para conseguir un alto nivel de seguridad en tiempos excepcionalmente complejos, como son los actuales. Expresó que “la gestión de las circunstancias sin precedentes que afectan a la operación segura de las instalaciones nucleares se ha vuelto particularmente relevante recientemente, no solo por la guerra en Ucrania sino también por lo sucedido con la pandemia de Covid-19”.

Asistencia mutua

“Después del accidente de la central de Chernobyl, los países firmamos la Convención de Pronta Notificación, al no darse la existencia de una convención general para los Estados. Mediante ella, cuando ocurre un accidente en un país, obligatoriamente se ha de avisar a todos los demás de lo que está sucediendo. Además, junto con la Convención de Asistencia Mutua, se tiene la obligación de ayudar y de asistir al país que está sufriendo el accidente nuclear”, comenta Manuel Aparicio.

La Convención sobre Pronta Notificación y Asistencia Mutua en caso de Accidente Nuclear o Emergencia Radiológica requiere que los estados notifiquen al OIEA sobre sus expertos, equipos y materiales disponibles para brindar asistencia. En caso de solicitud, cada Estado decide si puede prestar la asistencia solicitada, así como su alcance y la forma en que se realiza.

Esta convención fue firmada por España el 26 de septiembre de 1986. El Consejo colabora con la Dirección General de Protección Civil y Emergencias en el desarrollo de los compromisos a que obliga esta convención. Además, es la autoridad competente designada en España

como punto de contacto y alerta, realizando estas funciones a través de su sala de emergencias.

Como apoyo en estas situaciones el Sistema Internacional de Vigilancia de la Radiación (IRMIS) realiza la evaluación de la situación radiológica y proporciona datos críticos para informar de inmediato a los tomadores de decisiones de respuesta a emergencias. IRMIS está diseñado para apoyar la implementación de la Convención sobre la Pronta Notificación de Accidentes Nucleares al proporcionar un mecanismo para informar y visualizar grandes cantidades de datos de monitoreo de radiación ambiental durante una emergencia. El sistema recopila datos de radiación de más de 6.000 estaciones de seguimiento en todo el mundo, que forman parte de redes operadas a nivel nacional. Recientemente Irak, Jordania, Malasia, Arabia Saudita y Tailandia se unieron al sistema, elevando el número total de países participantes a 48.

Gestión segura de residuos

La Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Nuclear Gastado y sobre Seguridad en la Gestión de Residuos Radiactivos es también muy importante para el CSN y su responsable en el Consejo es Marisa Tormo. Fue firmada por España el 30 de junio de 1998. El CSN coopera con el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico en la elaboración de los informes nacionales, en cuya redacción participa también Enresa. Su objetivo principal es alcanzar y mantener en todo el mundo un alto grado de seguridad en la gestión de residuos y del combustible gastado en todas las etapas de su proceso, mediante la mejora de las medidas nacionales y la cooperación internacional, a fin de proteger a las personas y al medio ambiente, tanto en el presente como en el futuro, y prevenir y mitigar los accidentes radiológicos.

En el séptimo informe español se recoge que “del análisis llevado a cabo durante su elaboración, cabe afirmar que, existiendo siempre un margen para la mejora, España cumple con los objetivos, requisitos y medidas contenidos en la convención conjunta, y que se dispone de la infraestructura y la experiencia necesarias para la gestión segura del combustible gastado y de los residuos radiactivos, desde los puntos de vista institucional, administrativo, técnico y económico-financiero”.

El combustible gastado que se gestiona en España procede de los reactores nucleares instalados. Las centrales son, además y de acuerdo con la convención, instalaciones de gestión de residuos radiactivos. A esto hay que sumar los residuos radiactivos de cerca de un millar de instalaciones del ámbito hospitalario, industrial o científico.

Protección física

La Convención sobre Protección Física de los Materiales Nucleares, redactada en Viena y Nueva York en 1980, fue firmada por España en 1986 y ratificada, como Estado miembro de Euratom, en 1991. El término protección física hace refe-

rencia a la manera de prevenir, detectar y responder a tiempo ante robos, sabotajes, actos delictivos o transferencias ilegales de material nuclear, y la responsabilidad en esta materia recae sobre el Gobierno de cada estado. En virtud de esta convención, los países firmantes se comprometen a garantizar durante el transporte internacional la protección de los materiales nucleares dentro de su territorio o a bordo de sus buques y aeronaves. En 2005 las partes aprobaron por consenso una enmienda que entró en vigor en 2016. La convención y su enmienda son los únicos instrumentos internacionales jurídicamente vinculantes a escala internacional en la esfera de la protección física de los materiales nucleares. El CSN es la entidad de contacto de esta convención, junto con el Ministerio del Interior y el Ministerio de Transición Ecológica, con las funciones y competencias que cada uno debe asumir para la protección física de la materiales nucleares.

Para Pedro Lardiez, jefe del Área de Seguridad Física del CSN, “esta convención es el instrumento jurídico vinculante más importante en seguridad física de los materiales nucleares. En estos tiempos complejos tiene una importancia clave

para la protección del material nuclear. Hay que tener en cuenta que la convención actúa sobre materiales y sustancias utilizados con fines pacíficos y se excluyen aquellos materiales que son usados con fines militares”.

La adhesión universal a esos instrumentos y la armonización de los marcos jurídicos y reguladores nacionales pueden contribuir de manera importante a combatir el terrorismo nuclear. A lo largo de los años, Pedro Lardiez reconoce no haber sufrido problemas importantes. “Su control es igual de difícil que en cualquier otro delito. El material nuclear necesita ser protegido mediante los estándares establecidos que cada país tiene que adaptar a su marco legal regulador para implementar con eficacia y eficiencia lo dispuesto en la convención. Trabajamos en contacto con la seguridad del estado. Hay una unidad de respuesta especial de la Guardia Civil entrenada específicamente por si hay algún incidente. Además, disponemos de la parte técnica para la incautación de productos con seguridad”.

El OIEA informa y asesora a los estados sobre los instrumentos jurídicos internacionales correspondientes, y



Manuel Aparicio y Marisa Tormo ante la sede del OIEA.



Pedro Lardiez.

Proteger el medio marino

“Hay otra convención que para nosotros es muy importante: la de Protección del Medio Ambiente Marino del Atlántico Nordeste (OSPAR), dice Manuel Aparicio. “El CSN participa como representante de España en el Comité de Sustancias Radiactivas (RSC) de esta convención, mediante la asistencia de dos técnicos de la Subdirección de Protección Radiológica Ambiental a sus reuniones anuales, en las que se analizan los diferentes aspectos que afectan a los objetivos de la convención y se debaten las posibles actuaciones, incluyendo la creación de grupos de trabajo técnicos específicos para abordar los temas de mayor complejidad e interés”, añade. Dentro del trabajo que se realiza en esta convención, el CSN remite informes anuales con los datos sobre vertidos de efluentes radiactivos, tanto del sector nuclear como de otros sectores no nucleares, así como datos de concentraciones ambientales en la región correspondiente a España, dentro de la cubierta por OSPAR, siguiendo los formatos acordados en el propio RSC.

Esta Convención tiene varios anexos que tratan de las siguientes áreas específicas: Prevención y eliminación de la contaminación de origen terrestre, Prevención y eliminación de la contaminación por vertimiento o incineración, Prevención y eliminación de la contaminación de fuentes marinas, Evaluación de la calidad del medio marino y Protección y conservación de los ecosistemas y la diversidad biológica del espacio marítimo. Quedan excluidos del marco de este convenio cuestiones relativas a la gestión pesquera, y las relacionadas con el transporte marítimo son tratadas por la Organización Marítima Internacional. ▶

alienta a los estados a adherirse a ellos y aplicarlos. Este organismo emite un conjunto de publicaciones, como la Colección de Seguridad Física Nuclear, donde se recogen toda una serie de directrices. Asimismo, prevé una mayor cooperación entre los estados en lo que se refiere a la adopción rápida de medidas para localizar y recuperar materiales nucleares robados u objeto de contrabando, mitigar las consecuencias radiológicas derivadas de sabotajes y prevenir y combatir delitos derivados de estas situaciones. “Hay 134 estados que han firmado la convención, y deberían firmarlo todos los demás para obtener la mayor eficacia en todo el mundo y así paliar el tráfico ilícito entre países, aunque no tengan centrales nucleares. Hay países de tránsito o emisores de materiales que deben protegerlos”, explica Lardiez.

Existen otros instrumentos internacionales que se centran en la seguridad física nuclear. Entre ellos el Convenio Internacional para la Represión de los Actos de Terrorismo Nuclear, que entró en vigor el 7 de julio de 2007, en el que se exponen en detalle los delitos asociados a la posesión y el uso ilícito e intencionado de materiales o dispositivos radiactivos, así como al uso de instalaciones nucleares o los daños causados a estas. Está concebido para fomentar la cooperación entre los países mediante el intercambio de información y la prestación de asistencia en investigaciones y extradiciones. Además, el Consejo de Seguridad de Naciones Unidas aprobó dos resoluciones que abordan, entre otras cosas, la amenaza del terrorismo y la proliferación nuclear. Distintas resoluciones exhortan también a la cooperación na-

cional, regional e internacional para fortalecer la respuesta mundial a estos problemas y amenazas que se plantean con respecto a la seguridad internacional.

El OIEA presta asistencia, previa solicitud, a los comités de Naciones Unidas en relación con esas dos resoluciones y también a los estados miembros, cuando proceda, para cumplir las obligaciones emanadas de esas resoluciones.

Las fuentes radiactivas desempeñan una función indispensable en muchos ámbitos, desde la medicina hasta la agricultura, desde la arqueología hasta la seguridad alimentaria. Las fuentes que se utilizan en estas aplicaciones deben manipularse con adecuadas medidas de seguridad tecnológica y física. Por ello, en mayo de 2023 más de 270 expertos jurídicos y técnicos, procedentes de 128 países y de 4 organizaciones internacionales, se reunieron en Viena para examinar los avances logrados en la seguridad tecnológica y la seguridad física de las fuentes radiactivas y para abordar esferas que requieren mejoras. Para enfrentarse a posibles riesgos, el OIEA ha elaborado un Código de conducta que ha sido aprobado este año. “La prevención mediante controles e inspecciones es fundamental. Trabajamos mucho en estas cuestiones. Hasta ahora se han producido algunos robos en España, pero nunca de importancia”, señala Lardiez.

España es también parte contratante de los Convenios de París y de Bruselas de responsabilidad civil en materia de energía nuclear, suscritos en 1960 y 1964, respectivamente, y que han sido modificados desde entonces y de manera conjunta en varias ocasiones. En estos convenios se establece y acota el alcance de la responsabilidad del explotador de la instalación en la que tiene lugar un incidente nuclear y su obligación de cubrir la misma mediante un seguro o garantía financiera. Asimismo, se dictan reglas especiales que aplican a los daños ocurridos durante el transporte de material nuclear. ©

El plan de restauración del emplazamiento y su aplicación a José Cabrera

El Plan de Restauración del Emplazamiento (PRE) de una instalación nuclear o del ciclo de combustible se refiere al conjunto de estrategias y acciones planificadas que se llevan a cabo durante su desmantelamiento, con objeto de llevar al emplazamiento a un estado radiológicamente seguro para las personas y el medioambiente. Esto permitirá que sea liberado del control regulador, pudiendo ser reutilizado o reintegrado a su entorno natural, bajo un enfoque de perdurabilidad para generaciones futuras. En este contexto, el PRE supone un hito importante al final de la vida de la instalación, de gran complejidad técnico-industrial, que requerirá, por un lado, de conocimientos radiológicos, estadísticos y metrología

avanzados y, por otro, de un gran esfuerzo de coordinación entre múltiples partes involucradas, entre las que se encuentra la comunidad local y las administraciones competentes. En España, con varios PRE actualmente en marcha, ya se cuenta con suficiente experiencia para tener estandarizado su marco regulatorio, que está siendo aplicado actualmente en la fase final del proceso global de desmantelamiento de la central nuclear José Cabrera. ■ Texto: **Sofía Luque** | Jefa de proyecto | **Susana Solís** | Jefa de Área de Instalaciones del Ciclo y Desmantelamiento | **José Luis Revilla** | Coordinador Técnico de Protección Radiológica del Público y Vigilancia Radiológica Ambiental | **Inmaculada Simón** | Subdirectora de protección radiológica ambiental ■

Con el cese de operación de las primeras instalaciones nucleares en los años setenta y ochenta, a nivel internacional empezó a tomarse conciencia clara de que el desmantelamiento de una instalación, incluyendo su liberación del control regulador, era una actividad más de su ciclo de vida normal. El objetivo final de esta actividad era el de restaurar los emplazamientos para cualquier uso ulterior, centrándose en el posible impacto a las personas o al medioambiente que se pudiera producir, lo que también era objeto de creciente preocupación en la época.

En consecuencia, numerosas organizaciones internacionales, como la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE (NEA), junto con el propio sector nuclear, constituyeron diversos grupos de trabajo para analizar la experiencia adquirida, emitir recomendaciones y elaborar guías técnicas y estudios para abordar estas actividades de restauración de una manera segura, eficiente y sostenible.

En España, siguiendo dichas recomendaciones y en combinación con la experiencia propia adquirida, se introdujeron previsiones para la regulación de las autorizaciones de desmantelamiento y clausura de las instalaciones nucleares y radiactivas en el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas de 1999, desarrollando en el texto la documentación a aportar por los titulares.

Uno de estos documentos es el “Plan de restauración del emplazamiento”, tema central de este artículo, que describirá la metodología y actuaciones planificadas para llevar al emplazamiento de un estado físico y radiológico inicial conocido a un estado físico y radiológico final previsto, garantizando que los niveles de radiactividad residual en el emplazamiento, no suponen un riesgo para las personas ni el medioambiente a corto, medio y largo plazo.

El Plan de restauración del emplazamiento

El artículo 30.h) del RINR requiere que para obtener la autorización de desmantelamiento de una instalación, el titular

deberá elaborar y enviar un PRE que incluya una “propuesta y justificación de la metodología para la caracterización radiológica final del emplazamiento, con el objetivo de demostrar el cumplimiento de los criterios radiológicos establecidos para la liberación total, parcial o con restricciones de uso del emplazamiento y se propondrán los medios para que se establezcan y mantengan los controles legales institucionales que garanticen el cumplimiento de los criterios radiológicos”.

En España, el titular responsable de la gestión de los residuos radiactivos y el desmantelamiento de las instalaciones nucleares es la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa), y el Consejo de Seguridad Nuclear es el encargado de aprobar el Plan y supervisar su implementación.

Dado que las tareas de restauración y caracterización de este tipo de instalaciones son complejas, a la hora de llevar a la práctica este requisito surgieron numerosos interrogantes. Algunos de ellos de carácter general. como: ¿Qué criterio radiológico se ha de adoptar? ¿Cómo demostrar su cumplimiento? ¿Dónde está el equilibrio entre una restauración ade-

cuada y las limitaciones técnicas y de recursos? ¿Cómo se puede involucrar a las partes interesadas en el proceso? También surgieron otras cuestiones de detalle de tipo: ¿Cómo aplicar en la práctica un criterio de dosis? ¿Cuántas muestras o medidas se deben realizar para asegurar la representatividad? ¿En qué puntos se deben localizar estas medidas? ¿Con qué equipos y según qué especificaciones?

Para dar respuesta a todas estas preguntas, en la Subdirección de Protección Radiológica Ambiental del CSN se creó en 2005 un grupo de trabajo *ad hoc* que, basándose en la experiencia adquirida, la bibliografía existente y las referencias internacionales, dieron luz a un paquete reglamentario formado por:

- La Instrucción del CSN IS-13 sobre criterios radiológicos para la liberación de los emplazamientos de instalaciones nucleares [1].
- La Guía de Seguridad 4.2. Plan de Restauración del Emplazamiento [2].
- La Guía de Seguridad 4.3 Metodología de comprobación del estado radiológico de un emplazamiento previo a su liberación. Niveles genéricos de liberación [3].

En la Guía 4.2 del CSN se recomendó el contenido básico que debería tener un PRE (Tabla 1).

Los criterios radiológicos se plasmaron en la IS-13. En ella se limita la dosis que puede recibir la población del entorno de la instalación debida a la actividad residual presente en el terreno¹ del emplazamiento, una vez liberado del control regulador, a 0,1 mSv/año; esto es,

¹ En la IS-13, se entiende por terreno aquel espacio que comprende el suelo superficial, las especies vegetales leñosas que permanezcan sobre él y las corrientes de agua superficial que transcurran por él, así como la zona no saturada o subsuelo, y la zona de saturación o de agua subterránea.

Tabla 1.

| |
|--|
| Descripción del emplazamiento |
| Análisis histórico de la instalación durante su fase operativa para identificar fuentes potenciales de contaminación residual |
| Descripción del estado físico y radiológico inicial tras el desmantelamiento de todos los edificios, estructuras, sistemas y componentes que no vayan a permanecer en el emplazamiento |
| Descripción del estado físico y radiológico final previsto que incluya los usos posteriores de la instalación |
| Criterios radiológicos de liberación |
| Proceso de restauración |
| Actuaciones de restauración planificadas para llevar el emplazamiento al estado radiológico final previsto |
| Estudio radiológico final |
| Metodología propuesta y justificación de su aplicabilidad |
| Definición del marco de decisión |
| Requisitos de calidad |
| Diseño y planificación de las medidas |
| Especificación de equipos y métodos de medida, análisis y evaluación de los resultados |
| Proceso de toma de decisiones |
| Plan de garantía de calidad |
| Relación de los procedimientos a utilizar |
| Informe sobre el estado radiológico final |
| Información suficiente para poder determinar que el emplazamiento, o la parte de él que se pretenda liberar, cumple los criterios radiológicos establecidos |

diez veces menos del límite de dosis establecido en la normativa para el público en general (1 mSv/año). Adicionalmente, se requiere que, en caso de liberación con restricciones sujetas a controles institucionales para garantizar dichas restricciones, las actuaciones de restauración deben hacerse de forma que en ningún caso se supere 1 mSv/año, incluso aunque se perdieran dichos controles institucionales. Finalmente, la IS-13 concluye que, si quedan edificios, paramentos y/o estructuras que vayan a permanecer en el emplazamiento tras la liberación, éstos deberán cumplir además los criterios de desclasificación recomendados por la Unión Europea en su publicación Radiation Protection 113 [5], “Recommended radiological protection criteria for the clearance of buildings and building rubble from the dismantling of nuclear installations”.

Como la dosis efectiva no es una magnitud directamente medible, para la aplicación práctica de estos criterios se hace necesario derivar unos valores de comprobación en campo, en términos de concentración de actividad (Bq/g) por cada radionucleido. Estos se denominan Niveles de Liberación (NL) y pueden ser, o bien genéricos, recogidos en la Guía 4.3., o bien calculados con parámetros específicos del emplazamiento en cuestión. La metodología de cálculo recomendada en este último caso también se recoge en la citada Guía 4.3.

Una vez calculados los niveles de liberación y teniendo en cuenta los datos históricos del emplazamiento y los resultados de caracterizaciones previas, se zonifica la instalación en parcelas más pequeñas y manejables, clasificadas preliminarmente en función de su potencial contaminación. Esto permite que la res-



Cálculo de los niveles de liberación: Vías de exposición y metodología.

tauración sea más segura y eficiente, asignando mayores recursos a las zonas que más lo necesitan y menores a aquellas con riesgo muy poco significativo. La restauración, no obstante, consistirá en un proceso iterativo de extracción/remediación de suelo, subsuelo y/o de aguas subterráneas, hasta que los valores de concentración de actividad se encuentren por debajo de los niveles de liberación fijados.

Tras la restauración, llega la comprobación del estado radiológico final. Esta es la parte que culmina el PRE, y sus directrices también se plasmaron en la Guía 4.3. La metodología recomendada es una internacionalmente aceptada, denominada MARSSIM [4], que se caracteriza por ser de un avanzado contenido técnico-estadístico, rigurosa y, lo que es de suma importancia, flexible para hacer frente a las distintas casuísticas que se puedan encontrar. MARSSIM aborda de manera consistente la planificación, realización, evaluación y documentación de las caracterizaciones radiológicas que sirven de base para demostrar el cumplimiento de los criterios radiológicos de liberación del emplazamiento.

Los resultados de la comprobación radiológica del estado final se recogen en un informe radiológico final, que será evaluado por el Consejo de Seguridad Nuclear, quién finalmente informará al Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD) de si el emplazamiento es apto para su liberación total o parcial, sin restricciones o con ellas y, en su caso, con controles institucionales que garanticen el cumplimiento de dichas restricciones.

Esta toma de decisiones por parte del organismo regulador requiere de formación y conocimientos de carácter multidisciplinar. Además de los aspectos reguladores en materia de seguridad nuclear y protección radiológica será necesario contar con expertos en técnicas analíticas de medida y muestreo, estadística y análisis de datos, sistemas de información geográfica, biología, geología, ecología, geoquímica, hidrogeología,

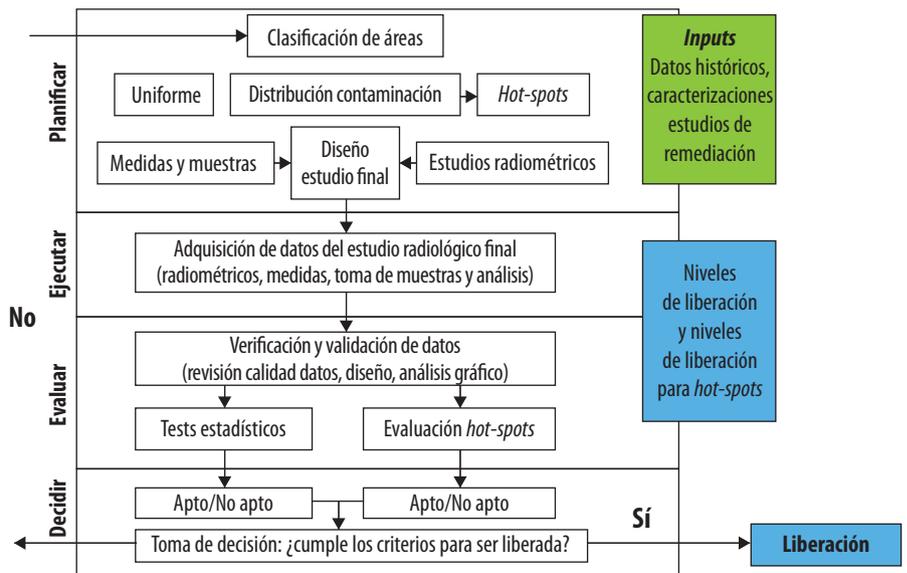


Diagrama de flujo de la metodología de MARSSIM.

etc. Esto hace del PRE uno de los más importantes hitos del desmantelamiento de una instalación nuclear o del ciclo de combustible.

La restauración de instalaciones nucleares y del ciclo en España

A lo largo de las últimas décadas, a nivel nacional hemos acumulado una considerable experiencia en el campo del desmantelamiento, encontrándonos dentro del pequeño grupo de países con un recorrido integral en estos procesos.

En lo relativo a la restauración de emplazamientos que pudieran presentar radiactividad residual, se han llevado a cabo los proyectos contemplados en la Tabla 2. Todos ellos han sido evaluados, aprobados, inspeccionados y supervisados por el Consejo de Seguridad Nuclear. No obstante, no ha sido hasta el proyecto de desmantelamiento de la central nuclear José Cabrera, cuando se han podido aplicar en su totalidad las recomendaciones y directrices establecidas por el CSN en la normativa anteriormente citada. En unos casos, por tratarse de proyectos anteriores a la publicación de dichas normas y, en otros, por tratarse de desmantelamientos singulares (emplazamientos mineros, Ciemat, central nuclear Vandellós 1) que, por sus características, han tenido que implementar un PRE adaptado.

El Plan de restauración del emplazamiento de José Cabrera

La central nuclear José Cabrera, más conocida como Zorita, situada en el término municipal de Almonacid de Zorita (Guadalajara), fue la primera en entrar en operación en España, en 1969, bajo la titularidad de Unión Fenosa (actualmente, Naturgy). Esta central cesó su operación en 2006, tras cerca de 40 años de operación comercial. El 1 de febrero de 2010, el Ministerio de Industria, Tu-

Tabla 2.

| Periodo | Proyecto | Responsable |
|-------------------------|--|-----------------|
| 1991-1995 | Desmantelamiento y restauración ambiental del emplazamiento de la antigua Fábrica de concentrados de Uranio de Andújar (FUA), en Jaén | Enresa |
| 1991-2003 | Desmantelamiento y restauración parcial de la central nuclear de Vandellós I (Tarragona) actualmente en periodo de latencia | Hifrensa-Enresa |
| 1995-2000 | Desmantelamiento y restauración ambiental de las antiguas instalaciones de tratamiento de mineral de Uranio, planta Lobo G (La Haba, Badajoz) | Enresa-Enusa |
| 2001-2004 | Desmantelamiento y restauración ambiental de la antigua planta Elefante (Saelices el Chico, Salamanca), de fabricación de concentrado de Uranio | Enresa-Enusa |
| 2006-2007 | Restauración ambiental de exploraciones y explotaciones de minería del Uranio en Casillas de Flores y Valdemascaño (ambas en Salamanca), | Enresa-Enusa |
| 2004-2009 | Restauración ambiental de las antiguas explotaciones mineras de uranio de Saelices el Chico (Salamanca) | Enresa-Enusa |
| 2004-Hoy | Desmantelamiento de instalaciones obsoletas y restauración ambiental de zonas contaminadas del CIEMAT - Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (PIMIC Desmantelamiento), en Madrid | Enresa |
| 2010-Hoy | Desmantelamiento y restauración ambiental de la central nuclear José Cabrera | Enresa |
| Autorización en trámite | Desmantelamiento y restauración ambiental de la antigua planta Quercus de concentrados de uranio | Enusa |
| 2023- | Desmantelamiento y restauración ambiental de la central nuclear Santa María de Garoña | Enresa |

rismo y Comercio (actual MITERD), otorgó la transferencia de titularidad de la instalación de Naturgy a Enresa y au-

torizó a ésta última para llevar a cabo su desmantelamiento.

La estrategia de desmantelamiento



Ciclo de vida del licenciamiento de la central nuclear José Cabrera.



Planta de lavado de suelos del desmantelamiento de José Cabrera.

seleccionada para esta central fue la recomendada por el OIEA: desmantelamiento total e inmediato (sin periodos de latencia), y se comenzó a ejecutar una vez dispuesto el combustible nuclear gastado en el denominado almacén temporal individualizado (ATI) de la instalación.

Desde entonces hasta junio de 2022 se han llevado a cabo actividades de desmontaje, desmantelamiento, caracterización, desclasificación y gestión de gran cantidad de materiales, tanto radiológicos como convencionales. En 2022, tras la aprobación del PRE definitivo, comenzó esta relevante fase final del proceso.

Planificación de la restauración

A partir del análisis histórico de la información de la instalación desde su construcción hasta la actualidad y de las sucesivas caracterizaciones parciales del emplazamiento realizadas a medida que se desmantelaba, se determinaron los radionucleidos de interés y las zonas con mayor probabilidad de contaminación radiológica debida a incidentes operativos, derrames, fugas o antiguos acopios de material radiactivo previo a su gestión. Esto permitió zonificar el emplazamiento

en las denominadas unidades de liberación (UL), que se clasificaron en clase 1 (rojo), clase 2 (amarillo), clase 3 (azul), o no impactadas (verdes), de mayor a menor potencial de contaminación. Esto sirvió para priorizar las actividades de restauración y caracterización en las zonas más impactadas, frente a las que lo estaban menos.

Para fijar los criterios radiológicos, Enresa propuso y justificó adecuadamente un uso futuro industrial del emplazamiento, puesto que Naturgy, que recuperará la titularidad tras la liberación, considera llevar a cabo proyectos industriales de energías renovables en el lugar. Esto ya supuso una restricción de uso en sí misma, a tener en cuenta a la hora de determinar los niveles de liberación. Adicionalmente, al haber identificado en el análisis histórico de la instalación la presencia de niveles muy bajos de radionucleidos en el acuífero, se propuso también restringir el uso de las aguas subterráneas del emplazamiento. Estas restricciones deberán ser inscritas en el Registro de la Propiedad en el momento de la liberación, como control institucional para garantizar su cumplimiento.

Partiendo de estas premisas y de acuerdo con los criterios de la IS-13 y la metodología de la Guía 4.3, se calcularon los NL, que fueron minuciosamente evaluados y aprobados por los expertos del CSN como parte fundamental del PRE, para poder garantizar que estando por debajo de estos valores no existe riesgo para las personas ni para el medioambiente.

Ejecución de la restauración

A continuación, comenzaron las labores de restauración y caracterización. Las técnicas utilizadas han consistido en la retirada de los contaminantes por extracción de los terrenos y tratamiento de los mismos. Este tratamiento se ha realizado en una planta de lavado de suelos en el propio emplazamiento, en la que se descontaminaron las distintas fracciones granulométricas del suelo mediante lavado acuoso y posterior segregación de la fracción fina (limo-arcilla), que es la que más retiene los contaminantes, de la gruesa (grava-arena). La fracción fina contaminada se gestionó como residuo radiactivo y se envió al Centro de almacenamiento de residuos radiactivos de El Cabril (Córdoba), y los gruesos, una vez limpios y desclasi-



Clasificación de UV en José Cabrera.

ficados radiológicamente, fueron gestionados como residuo convencional. Todo ello, bajo la supervisión y control del CSN.

Para el caso de elementos estructurales o constructivos enterrados (cimientos, tuberías, canalizaciones) que van a permanecer en el emplazamiento tras la liberación por su dificultad de extracción, se ha requerido que cumplan los criterios radiológicos de desclasificación anteriormente citados, previa justificación de que los perjuicios de su extracción superan al beneficio que ello supondría, de acuerdo con uno de los principios fundamentales de la protección radiológica: el de justificación.

En relación a las aguas subterráneas, y dentro de la zona controlada por parte del titular, se detectan en algunas áreas valores estadísticamente representativos, principalmente de tritio, a varios metros de profundidad de la superficie del terreno. Este es un isótopo de muy baja radiotoxicidad pero cuya separación del agua es extremadamente compleja, en consecuencia, se realizan actividades de vigilancia mediante la implantación de numerosos sondeos en todo el emplazamiento, de donde se toman muestras

regularmente para vigilar y controlar su evolución.

Actualmente, la instalación ha ejecutado más del 70 % de las actuaciones del PRE, con algunas zonas ya restauradas y limpias, y otras a falta de actuaciones adicionales.

Comprobación del estado radiológico final

En un futuro próximo, una vez se considere que toda unidad de liberación ha sido debidamente restaurada, se realizará la caracterización final del emplazamiento, que consistirá en una meticulosa campaña de medidas espectrométricas y de toma de muestras y análisis en laboratorio, de suelos, subsuelos y aguas subterráneas, para demostrar el cumplimiento de los criterios radiológicos. Todos estos datos deberán ser debidamente documentados en el informe radiológico final, que servirá para solicitar la liberación parcial o total del emplazamiento.

Como en todas las disciplinas científicas en las que se manejan gran cantidad de datos, el proceso de evaluación de estos puede ser complejo, por lo que hay que utilizar una metodología lo más ajustada

y sistemática posible, con objeto de obtener la información necesaria para tomar decisiones fundamentadas. En el caso de José Cabrera se sigue la metodología recomendada MARSSIM, que implica, a grandes rasgos, los siguientes pasos:

- Verificación de los datos: comprobar que se han utilizado instrumentos de medida adecuados y debidamente calibrados y verificados, que los tiempos de medida y el número y volúmenes de muestra han sido los adecuados y que se han analizado el suficiente número de muestras duplicadas y de control para garantizar la calidad de los resultados.
- Validación de los datos: revisar que los datos estén estructurados, reevaluando los que puedan ser cuestionables o inciertos rechazando aquellos que se consideren valores atípicos.
- Evaluación preliminar: comprobar, mediante métodos estadísticos, que el número de muestras tomado es adecuado y determinar los valores máximo, mínimo, medio, mediano y desviación típica de cada UL, para comprender la distribución de los datos y comprobar que la clasificación inicial por nivel de contaminación fue correcta.
- Representación gráfica: utilizar las herramientas gráficas necesarias para representar los resultados en histogramas, diversos tipos de gráficos o cartogramas georreferenciados para hacerlos más comprensibles.
- Evaluación final y toma de decisiones: comprobar mediante técnicas estadísticas (test del signo si el contaminante no está presente en el fondo radiológico o test de la suma de rangos de Wilcoxon si el contaminante está presente en el fondo radiológico) que se cumple el criterio de liberación, teniendo en cuenta también la contribución a la dosis de las aguas subterráneas y la de los



Medidas espectrométricas y toma de muestras de suelos.

posibles puntos calientes que se hayan podido encontrar.

En caso de que alguna UL no superara todos estos pasos debería ser caracterizada de nuevo, reclasificada, subdividida en unidades más pequeñas, remediada y medida otra vez.

En todo este proceso, el Consejo de Seguridad Nuclear realiza una labor de supervisión continua a través de un sistema de evaluaciones y frecuentes inspecciones. Esta supervisión incluye la toma de muestras y análisis de manera independiente, por parte del regulador, para comprobar la veracidad de los resultados. Además, en aras de la transparencia y la participación pública, el Consejo de Seguridad Nuclear informa con periodicidad anual a la comunidad local de los avances en el desmantelamiento y restauración del emplazamiento mediante la reunión anual del denominado Comité de Información Local, que también cuenta con la participación de la administración nacional, regional y local.

Una vez se haya verificado con éxito el cumplimiento del PRE, así como las demás condiciones técnicas establecidas en el programa de desmantelamiento, el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico podrá emitir la de-

claración de clausura, previo informe del Consejo de Seguridad Nuclear, en la que plasmará las restricciones de uso y posibles vigilancias institucionales que puedan considerarse necesarias. Dicho Ministerio, con carácter previo a la declaración de clausura, dará traslado de la resolución a la comunidad autónoma y a los ayuntamientos competentes, a efectos de que puedan formular las alegaciones que consideren necesarias.

Retos reguladores

El proceso en curso de implementación del primer PRE completo en España en la central nuclear José Cabrera y la experiencia adquirida en el resto de restauraciones llevadas a cabo, ha dado lugar a una gran cantidad de lecciones aprendidas y de desafíos a abordar en un futuro próximo.

Se ha identificado la necesidad de profundizar desde el punto de vista regulador en diversos aspectos, como son: la regulación de liberaciones parciales de emplazamientos nucleares en los que vaya a permanecer un almacén temporal individualizado o en emplazamientos minero-industriales de uranio en los que vayan a permanecer almacenados residuos de muy baja actividad y largo

periodo de semidesintegración; la supervisión y control de las restricciones de uso que, en su caso, puedan establecerse sobre un terreno; la necesidad de adaptar la metodología descrita a zonas mineras en las que los contaminantes a remediar están presentes en el fondo radiológico ambiental; los lazos de interacción y colaboración con otras administraciones competentes y con la comunidad local; la puesta a punto de equipos y tecnologías avanzadas, que puedan hacer de la restauración un proceso menos complejo y costoso; y la importancia de la coordinación del proyecto para hacer frente a las diferentes etapas, entre otras.

Todos estos desafíos deberán ser abordados en el futuro próximo mediante una planificación cuidadosa, experiencia técnica y colaboración con los expertos y las partes interesadas. Y para ello, los técnicos del CSN participan activamente en diversos grupos de trabajo a nivel nacional e internacional, focalizados en esta fase final del desmantelamiento de las instalaciones nucleares y del ciclo de combustible. La futura finalización del PRE y la posterior declaración de clausura de la central nuclear José Cabrera marcarán un hito importante en España en materia de



Diversas tareas realizadas durante la restauración del edificio de la contención.

desmantelamiento de centrales nucleares, garantizando la seguridad y protección de las personas y el medioambiente a largo plazo.

Agradecimientos

Agradecemos a los expertos de las áreas de instalaciones del ciclo y en desmantelamiento, vigilancia radiológica ambiental, impacto radiológico ambiental y ciencias de la tierra del CSN su colaboración y contribución a este artículo.

Referencias

- [1] Instrucción IS-13, de 21 de marzo de 2007, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la liberación de emplazamientos de instalaciones nucleares (BOE nº 109 de 7 de mayo de 2007)
- [2] Guía de Seguridad 4.2. del Consejo de Seguridad Nuclear “Plan de Restauración del Emplazamiento”. Colección Guías de Seguridad del CSN. GS.4.2-2007
- [3] Guía de Seguridad 4.3. del Consejo de Seguridad Nuclear “Metodología de comprobación del estado radiológico de un emplazamiento previa a su liberación. Niveles genéricos de liberación”. Colección Guías de Seguridad del CSN. GS.4.3-2007
- [4] Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM). NUREG 1575. Rev-1. EPA 402-R-97-016, Rev. 1. DOE/EH-0624, Rev. 1. Department of Defense (DOD), Department of Energy (DOE), Environmental Protection Agency (EPA), and Nuclear Regulatory Commission (NRC). USA. 2000.
- [5] Radiation Protection 113 “Recommended radiological protection criteria for the clearance of buildings and building rubble from the dismantling of nuclear installations”. Comisión Europea. Dirección General de Medioambiente. 2000.
- [6] RESRAD. Códigos de cálculo elaborado por el Argonne National Laboratory del US DOE Department of Energy y la US NRC Nuclear Regulatory Commission.

Periodismo y opinión pública en la comunicación de riesgo: el caso del gas radón

■ Texto: **Berta García Orosa** | Catedrática de la Facultad de Ciencias de la Comunicación. Universidad de Santiago de Compostela ■

El gas radón es, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el responsable de entre el 3 y el 15 % de las muertes por cáncer de pulmón. Es un gas incoloro, inodoro e insípido que se libera de manera natural de algunas rocas tan habituales como el granito. Sin embargo, pese a ser un riesgo real e importante no tiene una presencia relevante en los medios de comunicación y la mayoría de los ciudadanos no conoce su existencia.

La agenda mediática tiene un papel relevante en la visibilización de temas (Zhao et al., 2019) especialmente en la representación y percepción de los riesgos (Brantner & Saurwein, 2021). Si se produce un aumento del debate público o de la cobertura mediática sobre un determinado riesgo, puede aumentar la probabilidad de que un individuo perciba ese riesgo (Rowe et al., 2000). Los investigadores han señalado la cobertura de los medios de comunicación como un factor que contribuye a la amplificación social del riesgo y el desarrollo del estigma (Dryhurst et al., 2020).

El riesgo tiene, además, un carácter comunicativo, y no meramente probabilístico: no es tanto el cálculo matemático el que contribuirá a considerar peligrosa una instalación nuclear, sino la historia de los antecedentes, su interpretación cultural y su inserción en los posicionamientos ideológicos del territorio afectado en cuestión (García García, 2014). En un sentido similar, Mairal (2013) indica que al cálculo técnico se le

suma la construcción narrativa por parte de los medios, los movimientos sociales y la población, de la relación de riesgo entre una cosa —una central nuclear— y otra —una población cercana—. Esto implica una ampliación del significado de probabilidad. El autor explica que la matriz narrativa es la memoria colectiva de los hechos peligrosos del pasado, los cuales permanecen en estado de latencia a la espera de una nueva activación ante un nuevo fenómeno que los invoque que suelen ser los medios de comunicación.

Por lo tanto, el riesgo es un constructo social y las percepciones de riesgo son esquemas cognitivos compartidos que se perfeccionan a través de la comunicación mediada y la interacción interpersonal (Young et al., 2021). Se define, se negocia y se configura a través de la comunicación (Rasmussen, Ihlen, 2017). Como ejemplo, podemos ver el caso de los medios de comunicación que construyen riesgos o soluciones que se difunden como la pólvora, que son irreales y llevan a la movilización masiva como la compra de papel higiénico en el inicio de la pandemia o los búnkeres en el caso de un ataque nuclear. Otros, en cambio, como es el caso del gas radón son minimizados o, durante mucho tiempo, ocultados.

En este contexto nace la investigación que presentamos a continuación.

Radón e investigación

Los estudios sobre comunicación y radón son escasos. Por ello, se ha comen-

zado una investigación titulada “Radón en España: percepción de la opinión pública, agenda mediática y comunicación del riesgo” aprobada en la convocatoria de ayudas para la realización de proyectos de I+D, al amparo de la resolución de 28 de mayo de 2021, del Consejo de Seguridad Nuclear (BOE 3 de junio de 2021), por la que se establecen las bases reguladoras, y la resolución de 4 de junio de 2021, del Consejo de Seguridad Nuclear (BOE 11 de junio de 2021), por la que se convocan las ayudas para la realización de proyectos de I+D+i relacionados con las funciones del organismo.

El objetivo principal del proyecto es analizar la percepción pública del radón en España y las estrategias de comunicación existentes para proponer acciones de comunicación dirigidas a diferentes sectores de la sociedad y de las comunidades autónomas más afectadas. Se trata de una investigación llevada a cabo por un equipo multidisciplinar de la Universidad de Santiago de Compostela, coordinado desde la Facultad de Comunicación, que incluye a expertos en inteligencia artificial, comunicación, periodismo, ciencias políticas y educación.

Dentro de este objetivo general se desglosaron los siguientes objetivos secundarios:

1. Analizar la percepción de la opinión pública, cartografiando el conocimiento de la ciudadanía sobre el ra-



Mapa del potencial del radón en España.

- dón en las diferentes comunidades autónomas.
- Determinar las principales estrategias comunicativas empleadas por los medios de comunicación digitales sobre el radón.
 - Analizar la agenda institucional y la información facilitada desde las fuentes institucionales de las comunidades en función de la incidencia de radón.
 - Evaluar la percepción sobre el radón de periodistas, directores de comunicación, políticos y técnicos.
 - Diseñar un plan de comunicación para aumentar la eficacia en la comunicación del riesgo sobre el gas radón a partir de recursos digitales.

Es importante destacar en los objetivos del proyecto dos aspectos. El primero de ellos es la estrategia por comunidades autónomas. El diseño de esta investigación no solo pretende ofrecer resultados aplicables en toda España, sino que tiene interés en conocer las características de la percepción de la ciudadanía sobre el gas radón y su repercusión mediática en lugares con altos niveles

de incidencia. Se considera que solamente con estos datos desglosados sería posible realizar una propuesta de estrategia de comunicación exitosa.

El segundo es la vocación holística de abordar el radón no desde el punto de vista de los expertos o de los medios de comunicación sino a través de la mayoría de los agentes sociales implicados, lo que permite obtener una radiografía y, al mismo tiempo, una propuesta de acción, en este caso comunicativa completa y coordinada. Si no es así, la comunicación no funcionaría en un mundo intercomunicado como el actual.

Se partía del contexto comunicativo que se ha explicado y de las siguientes premisas:

- La relevancia del radón en España, especialmente en algunas de las comunidades autónomas.
- El riesgo del radón para la salud pública.
- La relevancia de los medios de comunicación digitales y de los gabinetes de comunicación institucionales en la divulgación y conformación de la opinión pública.

- La importancia de conocer la percepción de la ciudadanía antes de planificar acciones de comunicación.
- La relevancia de una buena comunicación y divulgación sobre el radón para evitar riesgos para la salud y costes económicos a corto y medio plazo.

Y, además, teniendo en cuenta un contexto social y tecnológico determinado: la cuarta ola de la comunicación digital, con características como la importancia de la inteligencia artificial o la relevancia del compromiso con las audiencias.

En la investigación, se combinan metodologías tradicionales en las ciencias sociales, como una encuesta a toda la sociedad española sobre percepción y opinión pública, entrevistas a expertos e implicados en el tema y el análisis de contenido con otras innovadoras como el *machine learning*.

Ante este escenario, se pretende conocer la percepción de la ciudadanía española sobre el gas radón, la agenda mediática marcada por medios nativos y matriciales, la agenda marcada por las fuentes de información institucionales, la percepción de profesionales implicados y, finalmente, diseñar un plan de comunicación y estrategias que puedan servir para solventar las debilidades encontradas en la percepción de la opinión pública española sobre el radón. De este modo, se podrá diagnosticar la situación real de conocimiento y concienciación, las fortalezas y debilidades en la comunicación y diseñar retos de futuro.

En definitiva, el principal objetivo del proyecto es analizar cómo los actores sociales y políticos ocultan, hacen visibles y, en ocasiones, crean o inventan riesgos inexistentes y proponer retos y soluciones ante el riesgo creciente para la opinión pública. ©



Ibercivis, lanzamiento del globo sonda Servet VIII en junio de 2023.

Ciencia ciudadana: el abrazo de la sociedad y la investigación

Los proyectos de participación convierten a los ciudadanos en protagonistas del progreso científico. Pueden ayudar al avance de la investigación gracias a mediciones, recogida de datos y observaciones sobre el terreno en ámbitos tan variados como la computación, la meteorología, la arqueología o la salud. Codo con

codo con los científicos, estos proyectos proliferan en España y Europa, el número de participantes crece y, aunque aún hay algunos retos pendientes que solventar, cumplen el objetivo principal, que es incrementar de manera profunda el interés de la sociedad por la ciencia.

■ Texto: **Patricia Ruiz Guevara** | periodista de ciencia ■

En la década de 1990, los ordenadores domésticos tenían un aspecto que ahora consideramos *vintage*. En miles de hogares, hubo personas que cedieron esas computadoras personales para que, mientras no se estaban usando, se conectaran para analizar datos en busca de vida extraterrestre. Se llamó com-

putación distribuida. Ordenadores de decenas de miles de terrícolas oteando el universo. Se trataba del programa SETI@home, Search for Extraterrestrial Intelligence, uno de los primeros proyectos que llamó a la participación de los ciudadanos y que dio lugar a lo que hoy conocemos como ciencia ciudadana.

Desde aquella iniciativa, que arrancó oficialmente en 1999 y que echó la persiana digital en 2020, la ciencia ciudadana ha evolucionado hasta colonizar todo el mapa terrestre. No se ha encontrado vida en otros planetas durante estos años, pero sí una forma de impulsar la investigación científica y de acercar la ciencia

a la sociedad en campos tan variados como la meteorología, el estudio de las mareas, la contaminación del aire, la medición de radiación o la computación.

No hay una única definición de ciencia ciudadana. El Libro Blanco de la Ciencia Ciudadana en Europa la define como el compromiso del conjunto de la sociedad en actividades de investigación científica al contribuir activamente a la ciencia con su esfuerzo intelectual o dando soporte al conocimiento con sus herramientas o recursos. ¿Cómo? En el *Green Paper on Citizen Science for Europe: Towards a society of empowered citizens and enhanced research* explican que los participantes en estas actividades proporcionan datos experimentales e instalaciones a los investigadores, plantean nuevas preguntas y cocrean una nueva cultura científica. A cambio, los voluntarios adquieren nuevos aprendizajes y habilidades, y una comprensión más profunda de la labor científica. Como resultado, «se mejoran las interacciones entre ciencia, sociedad y política, lo que conduce a una investigación más democrática, basada en la toma de decisiones fundamentadas en pruebas». Un *win-win* en toda regla.

Desde el Ministerio de Universidades español coinciden en que la ciencia ciudadana debe ser el germen para democratizar el conocimiento y la ciencia que se produce en las universidades. Las semillas llevan años germinando en distintos proyectos a lo largo y ancho de España, Europa y del mundo y, para entender cómo, lo mejor es conocer ejemplos concretos de ciencia ciudadana.

Proyectos en España

España ha tenido y tiene proyectos de ciencia ciudadana para dar y tomar. Mosquito Alert, una plataforma de participación ciudadana para la investigación y gestión de mosquitos que puedan ser vector de enfermedades globales; Wi-

kiesfera, para identificar y corregir las brechas que existen en la representación del conocimiento en Wikipedia; Observadores del Mar, en el que ciudadanos y científicos colaboran para investigar sobre el estado actual del mar; Flora Urbana y Alergias, para recabar datos sobre estas reacciones; LADA-UC3M, laboratorio de ciencia ciudadana para el tratamiento y análisis digital de datos arqueológicos; o D-NOSES, que investiga sobre la contaminación por olor.

Pero no se puede hablar de ciencia ciudadana en España sin hablar de la Fundación Ibercivis, que nació de un proyecto nacional de computación voluntaria y atesora proyectos de referencia a sus espaldas, como Vigilantes del Aire, sobre medición de la calidad del aire a través de plantas de fresa usadas como biosensores, que se ha llevado a cabo en distintas provincias del país. Actualmente, trabajan en proyectos de ciencia ciudadana como Vigilantes del Suelo y ECHO, para medir la salud de los suelos, o Servet, en el que se desarrollan experimentos cercanos al espacio lanzados mediante globos sonda a la estratosfera.

Además, en 2016 pusieron en marcha el Observatorio de la Ciencia Ciudadana en España, cofinanciado por la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (Fecyt) y el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO). En el portal web del Observatorio (<https://ciencia-ciudadana.es/>) se puede encontrar un listado nutrido de proyectos de ciencia ciudadana con participación española categorizados por áreas de conocimiento.

Proyectos europeos

Si escalamos al continente entero, la lista de proyectos de ciencia ciudadana en activo no cabría ni en los márgenes de este reportaje (ya ni hablemos de si nos movemos a otros continentes, pero resulta estimulante buscarlos). Muestra de ello es la plataforma europea EU-Ci-

tizen.Science, para el intercambio de conocimientos, herramientas, formación y recursos para estas actividades. En la sección de proyectos, los curiosos pueden pasar horas buscando iniciativas por país o temática. Marine mammals, para recopilar datos sobre varamientos y avistamientos de mamíferos marinos en Bélgica; un proyecto sobre tiburones y rayas en Grecia y Chipre; o Looking for Cowslips, para buscar primulas en Estonia y Letonia. En Países Bajos, estudian la polarización digital de los motores de bús-



Raül Toran.

queda como Google, gracias al proyecto Digitale Polarisatie.

España participa en muchas iniciativas europeas de ciencia ciudadana. Greengage, para crear observatorios ciudadanos; Decido, de recogida de datos para influir en las políticas públicas; o Socio Bee, para medir la calidad del aire con dispositivos móviles que se pueden llevar en una bicicleta, son algunos de los proyectos en los que participa la Fundación Ibercivis.

Otro proyecto europeo reseñable con participación española es CitiS-Health, dirigido por el Instituto de Salud Global de Barcelona (ISGlobal), del que nos habla Raül Toran, responsable de la Unidad de Cultura Científica del Instituto. «El objetivo es situar las preocupaciones ciudadanas en el centro de la investigación

Ciencia ciudadana en el CSN

La ciencia ciudadana también puede ser una gran oportunidad en la medición de la radiación. Hay casos de éxito, como el proyecto francés Openradiation, que atesora casi 650 000 mediciones realizadas y en el que un contador se conecta al teléfono móvil, lee las medidas y las manda a un repositorio central.

«El objetivo de ese proyecto es conseguir ciudadanos que puedan medir la radiactividad por sus propios medios en sus móviles y que, si hay una emergencia, como una nube radiactiva o un accidente nuclear, puedan ayudar a hacer una detección rápida», explica Francisco Castejón, consejero del Consejo de Seguridad Nuclear.

Pero no hay que irse hasta ese extremo para que un proyecto así sea positivo. Actividades de ciencia ciudadana relacionadas con la medición de energía pueden hacer que «la gente se familiarice con la radiactividad y acabar con ese miedo que puede existir», dice Castejón. Por eso, desde el CSN se busca poner en marcha un proyecto parecido y ya se está analizando cómo.

En junio de 2023, el CSN acogió la jornada Ciencia ciudadana para medición de radiaciones, en la que se analizaron las posibilidades que ofrecen las nuevas tecnologías y su uso colaborativo para el desarrollo de este tipo de proyectos de medición de la radiación a través de dispositivos móviles. «La idea es tener manos de los ciudadanos para conseguir una medida propia independiente de la radiactividad», indica Castejón. Para lograrlo hay distintas posibilidades. Por ejemplo, «si miras rayos gamma con el móvil en la cámara aparecen como puntos blancos, como si se velara la cámara; pues podemos usar un software que cuente esos puntos blancos».

En la jornada del CSN participaron expertos como Jean François Bottollier-Depois, subdirector de Salud del Instituto para la Protección Radiológica y Seguridad Nuclear de Francia, y Francesco D'Errico, experto en radiología e imagen biomédica en la Yale School of Public Health de Estados Unidos, que analizaron diversos casos de éxito en este ámbito.

A la postre, Castejón, entusiasta de este tipo de proyectos, cree que la aportación ciudadana puede sumar a cualquier experimento que necesite muchas mediciones y que, en el



Francesco D'Errico, de la Universidad de Yale, en la Jornada del CSN.

sobre salud pública y medioambiente urbano», y se hizo a través de cinco proyectos piloto sobre cuestiones medioambientales y salud: contaminación atmosférica por tráfico en Barcelona, ruido en Liubliana (Eslovenia), contaminación

debida a la actividad industrial en Lucca (Italia), actividad física y urbanismo en Kaunas (Lituania) y quema de madera en Ámsterdam (Países Bajos).

«La ciudadanía de los cinco lugares participó en todas las fases de la investi-

gación, incluyendo la decisión de las preguntas de investigación, el diseño del estudio epidemiológico, el análisis y la interpretación de los resultados, la difusión de las conclusiones y la evaluación del proyecto», explica Toran. También se desarrolló un kit de herramientas de ciencia ciudadana para involucrar y guiar a las comunidades a desplegar acciones de este tipo. Herramientas que, según Toran, se pueden aplicar a cualquier campo de la investigación: biomedicina, biología, matemáticas o ciencias sociales.

El cambio climático es otro reto que Europa debe enfrentar, y hacerlo desde la ciencia ciudadana tiene sus ventajas: «Hace que los participantes contribuyan en la generación del conocimiento y se empoderen, que sean más conscientes de lo que están investigando, y eso es muy importante para estar preparado y autoprotgerse», considera Montserrat Llasat i Botija, del grupo GAMA de la Universidad de Bar-



Francisco Castejón.

lado contrario de la ecuación, puede ayudar a que el lenguaje de la ciencia se universalice y los ciudadanos no se queden solo en una capa de consumo de divulgación, sino que «puedan ir un paso más allá, participar y contribuir». También en lo nuclear y radiológico. ▶

celona, que investiga en el proyecto europeo I-CHANGE.

Se trata de una iniciativa que promueve la transición verde con el cambio de hábitos hacia comportamientos más sostenibles a través de *living labs* y ciencia ciudadana. «En I-CHANGE se monitoriza la calidad del aire y realizamos campañas para medir y evaluar fenómenos de temperaturas extremas e inundacio-



Andrea Menéndez.



Jean François Bottollier-Depois, de IRSN, durante la jornada celebrada en el CSN.

nes; esto nos permite generar un mapa con observaciones y disponer de más información para comprender lo que pasó», ejemplifica Llasat i Botija.

Europa avanza unida; sin embargo, hay «acusadas diferencias entre países a la hora de hacer ciencia ciudadana», considera Andrea Menéndez, de la Universidad de Oviedo, que ha estudiado la relación de las personas con grupos concretos de la ciudadanía; por ejemplo, grupos de trabajadores migrantes, en España, Francia y Noruega, desde un enfoque de ciencia ciudadana con una metodología participativa. Para Menéndez, lo más crucial es la actitud de la ciudadanía. «No todas las personas lo ven como un derecho ciudadano que tienen la libertad de ejercer. En Noruega, los contribuyentes sienten una responsabilidad con cualquier proyecto de investigación porque saben que es lo que permite a su país avanzar. En cambio, en Francia me encontré que una considerable parte de la población condiciona su participación a cambio de una remuneración económica», cuenta la investigadora.

«En cada país, existe un contexto y una cultura diferentes, así como cambios

en torno a problemáticas comunes», añaden desde Fundación Ibercivis. Por eso, hay variaciones sobre cómo diseñar un proyecto de ciencia ciudadana tanto en diferentes países de Europa como en diferentes regiones de España, señalan, aunque a nivel general las metodologías y las herramientas son adaptables. «A veces la percepción puede variar un poco, pero lo importante es que todos coincidimos en conseguir que la ciudadanía sea la protagonista y el alma de los proyectos», concluyen.

Oportunidades y retos

Los expertos coinciden en que la principal oportunidad de la ciencia ciudadana es realizar investigaciones que, sin la ayuda de la población, no se podrían llevar a cabo. La ciencia ciudadana da «puntos de vista que sin la participación ciudadana pasarían desapercibidos», considera Toran, y ejemplifica casos como detectar especies de insectos invasores o el proyecto europeo Making Sense, en el que vecinos y vecinas ayudaron en la medición e interpretación de ruidos de turistas y clientes de bares, y se tomaron medidas para disminuir el ruido en las plazas.

El papel de la tecnología en la ciencia ciudadana

Desde los ordenadores personales que se usaron en SETI@home, la tecnología ha avanzado eones. Solo pensar en los teléfonos inteligentes que todos llevamos en el bolsillo es un indicativo de cómo la digitalización puede propulsar la ciencia ciudadana. «Sin ninguna duda los móviles han sido una gran revolución. Poder conectarnos desde cualquier lugar del mundo ha supuesto crear una comunidad global y es más sencillo que la ciudadanía pueda participar en los proyectos», afirman desde la Fundación Ibercivis.

Dentro de los smartphones, sus aplicaciones. «Las apps ayudan a desarrollar los proyectos de ciencia ciudadana, ya que facilitan que la gente quiera participar en proyectos científicos y pueda compartir datos. Además, ayudan a visibilizar los datos y a crear mapas colaborativos», considera Raül Toran.

Un ejemplo entre muchos del papel de la digitalización es la aplicación Floodup (dentro del proyecto

europeo I-CHANGE), que se desarrolló para recopilar información sobre los impactos de riesgos naturales y del cambio climático, como inundaciones, y prácticas de adaptación frente a ellos, explica Montserrat Llasat i Botija, responsable de Floodup: «Que la puedas llevar en el móvil hace que sea muy fácil participar, puedes hacer una foto y publicarla geolocalizada mediante la app». RIU.net, una aplicación para evaluar el estado ecológico de un río, o Bee-Path, que registra en una app para móviles la movilidad humana, son otros dos buenos ejemplos.

Los móviles y la conectividad lo facilitan todo, pero desde

Fundación Ibercivis recuerdan que «la ciencia ciudadana es muy anterior a la llegada de Internet» y, desde su experiencia, creen que estos proyectos también necesitan presencialidad y no solo algo virtual: «No debemos olvidarnos de las personas que no tienen acceso a esos medios digitales; su conocimiento también es necesario y valioso». ■



Montserrat Llasat i Botija.

«Para llevar a cabo investigaciones sin participación ciudadana se necesitan muchos más recursos, más tiempo y más esfuerzo para conseguir resultados», valoran desde la Fundación Ibercivis. Por ejemplo, en el proyecto FuenAragón, para localizar fuentes y manantiales en Aragón, personas de la región recogieron información sobre más de 700 fuentes de toda la comunidad en menos de un año. «Hubiese sido imposible que un investigador hubiese logrado esos datos en ese tiempo», afirman.

Como no es ciencia ciudadana todo lo que reluce, también hay que mirar a los retos pendientes. Menéndez considera que, a nivel académico, «la ciencia ciudadana es todavía demasiado marginal» y que hay una carencia en concepción y aún más en su implementación, «especialmente en las ramas de humanidades y ciencias sociales». La investigadora cree

que, aplicada en estos ámbitos, la ciencia ciudadana exige unos ritmos de trabajo muy distintos de otras modalidades de investigación, «un tiempo que, por lo general, en nuestra sociedad innecesariamente acelerada no tenemos».

El dinero también puede ser otro problema, ya que Menéndez considera que un proceso de investigación de ciencia ciudadana es más costoso que otras modalidades, como la investigación de escritorio. Por ello, «es importante fortalecer las partidas presupuestarias con el fin de contribuir a incentivar su implementación en nuestra sociedad», señala la experta.

«Desde las instituciones públicas se está fomentando la financiación y el valor de los proyectos de ciencia ciudadana, pero todavía queda mucho por hacer»,

coinciden desde la Fundación Ibercivis. Para reforzarlo, consideran que «es necesario fomentar la ciencia ciudadana en los planes educativos y reconocer el valor de los datos aportados en proyectos de ciencia ciudadana».

En este camino, Toran recuerda que no hay que perder de vista que lo importante es que «los datos sean de utilidad para el personal investigador y para cualquier persona que quiera utilizarlos en sus propias investigaciones», y que un proyecto de ciencia ciudadana ha de seguir el método científico y los principios éticos.

En definitiva, todo suma: acerca la ciencia a la ciudadanía y mejora la investigación científica gracias a los ciudadanos. Sería un debate cualitativo decidir cuál de las dos partes gana más en esta actividad; baste decir que, si se hace bien, la sociedad y el progreso ganan. ©



Semblanza del segundo y (por ahora) último español que ha ganado el premio Nobel en una modalidad científica

Severo Ochoa: La emoción de descubrir

La ciencia española ha sido reconocida con el premio más prestigioso del mundo, el Nobel, nada más que dos veces. La primera en la figura excepcional de Santiago Ramón y Cajal, en 1906, y la segunda en la de Severo Ochoa, en 1959. En este último caso, incluso, en los anales figura como estadounidense, ya que adquirió esa nacionalidad y en Estados Unidos realizó la mayor parte de su trabajo científico. Mantuvo, no obstante, una intensa relación con España, donde nació y murió, y realizó una destacada labor en apoyo de la ciencia española, impulsando su desarrollo y formando a numerosos y relevantes científicos

españoles. Su trabajo le llevó a transitar toda la evolución que la biomedicina recorrió a lo largo del siglo XX, desde la histología y la fisiología hasta la biología molecular, pasando por la bioquímica, y en todas esas etapas realizó investigaciones fundamentales. Entre ellas cabe destacar sus descubrimientos en enzimología; la síntesis de ARN en laboratorio, que le condujo al Nobel; y sus aportaciones al descifrado del código genético.

■ Texto: **Juan Quinto** | periodista de ciencia ■ Fotografías: **Legado del Dr. Severo Ochoa** | propiedad de Fundación Bancaja ■

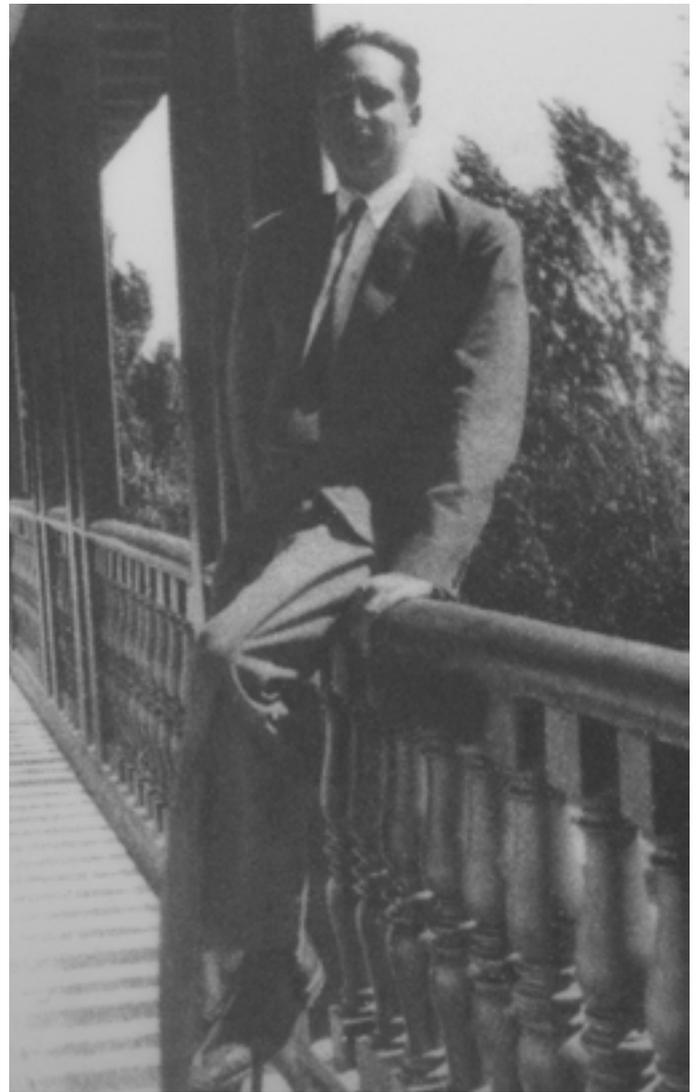
En octubre de 1959 el español Severo José Gerardo Ochoa de Albornoz (Luarca, Asturias, 24-09-1905 – Madrid, 01-11-1993) recibió en su labora-

torio el telegrama más esperado por los científicos más punteros, el que la Academia de Ciencias sueca le envió para comunicarle que había sido galardonado

con el premio Nobel de Fisiología o Medicina de ese año. Tras celebrarlo con sus colaboradores se fue enseguida a su casa. Le encantaba conducir, y solía ir



Reencuentro con su profesor de Química del bachillerato, Eduardo García Rodeja. A la derecha, en la Residencia de Estudiantes, donde inició sus investigaciones.



muy rápido, pero en aquella ocasión iba pisando el acelerador más de la cuenta... hasta que un policía le indicó que se parara. Uno se puede imaginar la escena a partir de las innumerables veces que muestran semejante situación en películas y series estadounidenses, con el policía acercándose lentamente, vigilante, mientras se quita los guantes, hasta colocarse junto a la ventanilla del infractor. El diálogo que se produjo, tras pedirle la documentación pertinente, fue más o menos así:

—¿Sabe usted a qué velocidad iba?

—Iba muy rápido, seguramente, pero tengo una buena excusa.

—¿Y cuál es, si puede saberse?

—Es que me acaban de conceder

el premio Nobel de Medicina y tenía prisa por llegar a casa y contárselo a mi mujer.

—¿Qué le han dado el premio Nobel de Medicina? ¿Y por qué?

La explicación de Ochoa debió ser tan convincente que el policía le dejó marchar, exhortándole a que moderara la velocidad.

En esencia, el premio reconocía la trascendencia de su hallazgo más relevante hasta el momento, que la enzima polinucleótido fosforilasa era capaz de sintetizar en el laboratorio una molécula esencial de todos los seres vivos, el ácido ribonucleico (ARN), célebre en los últimos años por ser el protagonista de las vacunas más innovadoras

y utilizadas contra la Covid-19. Para muchos científicos, el premio sirve de colofón a una brillante trayectoria y apenas realizan nuevas aportaciones de interés. Para Ochoa, en cambio, fue un acicate para seguir produciendo ciencia de alto nivel.

En aquellos primeros años 60 uno de los temas candentes en la biología molecular era determinar cómo la información contenida en el ácido desoxirribonucleico (ADN) del núcleo celular se procesa, a través del ARN, para generar las proteínas que realizan las funciones biológicas del organismo, teniendo en cuenta que al ARN está escrito con solo cuatro letras (A, C, G, U) y las proteínas están formadas por aminoá-



Tres momentos con su mujer, Carmen. A la izquierda, en 1931, el año de su boda. A la derecha, arriba, en su casa de Nueva York; debajo, en Luarca en 1959.



cidos, de los que hay 20 variedades. La clave del misterio era que cada aminoácido se forma con tres letras del ARN, y el objetivo era determinar qué combinación de letras, o tripletes, producían cada tipo de aminoácido. Es lo que se denomina el código genético, y a su resolución contribuyeron numerosos científicos, entre los que destacaron Marshall Warren Nirenberg, Har Gobind Khorana, Robert Holley y Severo Ochoa. Los tres primeros recibieron por ello el premio Nobel en 1968 y Ochoa quedó fuera por haberlo recibido antes y por el límite de tres premiados que establecen las normas de la Fundación Nobel.

El interés de Ochoa por la biología se inició en su infancia, observando la

naturaleza en su Asturias natal y diseccionando animales que capturaba. A los siete años murió su padre y la familia decidió trasladarse la mayor parte del año a Málaga, por los problemas de salud de su madre. Allí estudió el bachillerato y se consolidó su vocación por la influencia de su profesor de química, Eduardo García Rodeja, con quien se reencontró muchos años después, y por el ejemplo de Santiago Ramón y Cajal tras la lectura de su libro *Reglas y consejos sobre investigación científica*.

Estudió Medicina en la Universidad Central de Madrid, aunque sin vocación clínica y decidido a dedicarse a la investigación. Su primeros pasos como científico los dio en el laboratorio de

Juan Negrín en la Residencia de Estudiantes, desde 1925 hasta 1934. Allí también residió entre 1927 y 1931, hasta su matrimonio con Carmen García Cobián, y allí convivió con Lorca, Buñuel y Dalí, entre otros. En 1934 leyó su tesis doctoral, que versó sobre Los hidratos de carbono en los fenómenos químico y energético de la contracción muscular. En esos años destacó ya por sus publicaciones en revistas científicas internacionales, su participación en congresos y sus estancias en laboratorios de Escocia, Estados Unidos y, sobre todo, Alemania, donde trabajó en el equipo de Otto Meyerhoff, su principal maestro, en diferentes etapas entre 1928 y 1933.



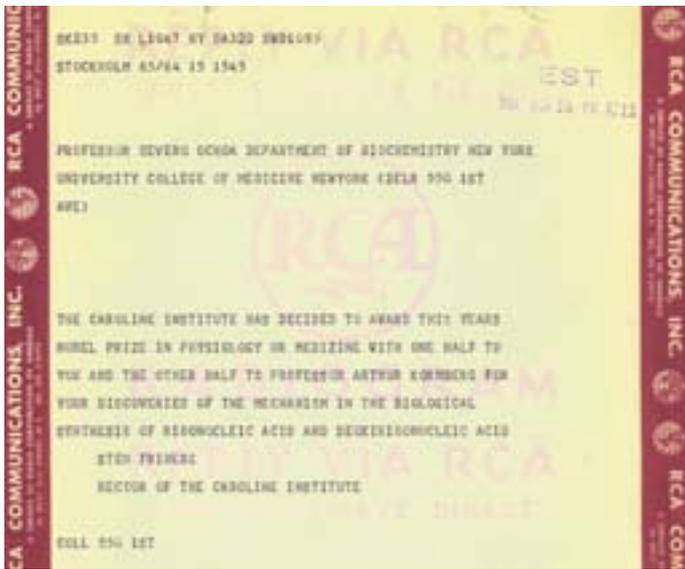
En el sentido del reloj, desde arriba a la izquierda, con el grupo de investigación de Meyerhoff; celebración con sus colaboradores tras recibir el telegrama de la concesión del Nobel; acto de entrega del premio y en su laboratorio de la Universidad de Nueva York.

En 1935 opositó sin éxito a una cátedra en Santiago de Compostela. Poco después fue contratado para dirigir la sección de Fisiología del Instituto de Investigaciones Médicas de Carlos Jiménez Díaz. Al empezar la guerra civil española, Ochoa decidió abandonar el país para continuar su trabajo científico. Su antiguo jefe, Juan Negrín, entonces ministro, le facilitó un salvoconducto con el que consiguió, después de pasar unas semanas en París, llegar a Heidelberg, Alemania, para trabajar nuevamente con Meyerhoff, que había realizado el tránsito de la fisiología a la bioquímica para estudiar los mecanismos de los procesos energéticos de los organismos.

Huyendo del nazismo, en 1937 Meyerhoff, que era judío, emigró a Francia y Ochoa se vio obligado a buscar nuevos destinos; primero en Plymouth, donde fue acogido por recomendación de Meyerhoff, para estudiar la bioquímica muscular de la langosta. Las colas de estos animales, tan apreciadas hoy, se convirtieron en su alimento habitual. Seis meses después consiguió una beca para trabajar en Oxford, donde estudió el papel de la tiamina (vitamina B1) en los procesos cerebrales de las palomas. La II Guerra Mundial le empujó de nuevo a emigrar. Tras pasar un mes en México, en septiembre de 1940 Llegó, junto a su mujer, a San Louis (Misuri) para trabajar con Carl y

Gerty Cori, matrimonio de origen checo de gran prestigio, premiados con el Nobel en 1947. Allí, Ochoa continuó su trabajo en el ámbito de la bioquímica de los hidratos de carbono.

El periplo de Severo y Carmen terminó, finalmente, en la Universidad de Nueva York, en 1942, donde pudo dirigir su propio grupo de investigación, centrado en el proceso energético celular, el llamado ciclo de Krebs. El matrimonio se adaptó perfectamente al estilo de vida americano y en 1955 obtuvieron la nacionalidad estadounidense. Fuera de las horas de trabajo y sin hijos, aprovechaban la posición cultural dominante de Nueva York y eran habituales visitantes de exposiciones y con-



Telegrama en el que le comunicaron la concesión del premio Nobel, el diploma, la medalla y durante el baile de gala en Estocolmo.



ciertos, cenaban a diario en restaurantes y viajaban por todo el mundo, tanto como turistas como cumpliendo compromisos profesionales en reuniones, seminarios y congresos.

Su trabajo como bioquímico era ya ampliamente reconocido y su crédito creció mucho más cuando descubrió, junto con Marianne Grunberg-Manago, bioquímica de su equipo, que una de las enzimas con las que trabajaba, la polinucleótido fosforilasa, era capaz de sintetizar un ácido nucleico. Además de proporcionarle el premio Nobel, fue el hilo que le condujo de la bioquímica a la biología molecular, la disciplina emergente en aquel tiempo, y le abrió el camino hacia el descifrado

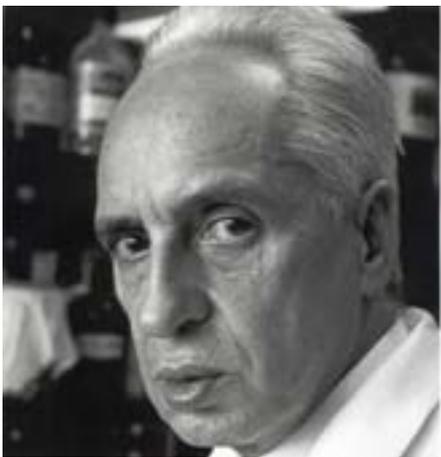
del código genético. Durante los años 60, Ochoa se dedicó a la síntesis de proteínas. En 1974 se jubiló de su puesto en la Universidad de Nueva York, pero no de la ciencia. Fue contratado por la empresa farmacéutica Roche para trabajar en sus laboratorios en Nueva York, y allí prosiguió sus investigaciones diez años más.

La relación de Severo Ochoa con su país natal fue, pese a todo, intensa y frecuente y su reconocimiento internacional le permitió influir decisivamente en el desarrollo de la bioquímica y la biología molecular españolas. Para empezar, acogió a numerosos jóvenes investigadores, entre ellos Santiago Grisolia y Margarita Salas,

para su formación doctoral y posdoctoral en sus laboratorios. Además, participó activamente junto con el destacado bioquímico Alberto Sols, en el impulso de la especialidad, en la organización de reuniones y en la formación, en 1963, de la Sociedad Española de Bioquímica (renombrada en 1992 Sociedad Española de Bioquímica y Biología Molecular). También promovió la creación del Centro de Biología Molecular, un instituto mixto de la Universidad Autónoma de Madrid y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, considerado como uno de los más importantes de la ciencia española y que actualmente lleva añadido el nombre de Severo Ochoa.



En el sentido del reloj, desde arriba a la izquierda, en la reunión de bioquímicos españoles celebrada en Santander en 1961; en el congreso sobre el genoma humano, en Valencia 1988; paseando con Francisco Grande Covián (izquierda) y Santiago Grisolía (derecha); y retrato de los años sesenta.



Finalmente, Ochoa y su mujer regresaron a España de manera definitiva en 1985. Apenas un año después falleció Carmen, lo que sumió al científico en una profunda depresión de la que no se recuperó. Pese a todo, mantuvo durante sus últimos años, prácticamente hasta su fallecimiento, en Madrid el 1 de noviembre de 1993, un despacho en el Centro de Biología Molecular, al que acudía habitualmente. Su actividad incluía dar conferencias, asistir a congresos, conceder entrevistas a los medios de comunicación y, en general, ejercer de conciencia crítica de la ciencia en nuestro país. Carmen y Severo reposan actualmente en el cementerio de su ciudad natal, la villa asturiana de Luarca.

La concesión del premio Nobel hizo célebre a Ochoa, ya que se trata del reconocimiento más importante del mundo, especialmente en España, donde solo hay otro científico reconocido con este premio. Ochoa lo recibió junto con el estadounidense Arthur Könberg, que había conseguido la síntesis del otro ácido nucleico esencial, el ADN. Entre ambos se repartieron 46.606 dólares, una fortuna en 1959 y recibieron el premio el 10 de diciembre de 1959 de manos de Gustavo VI Adolfo, Rey de Suecia.

Además del Premio Nobel, a lo largo de su carrera científica Ochoa recibió un gran número de galardones como reconocimiento a sus contribu-

ciones a la biología en general y a la fisiología, la bioquímica y la biología molecular en particular. Se trata probablemente del científico español más laureado de la historia, ya que acumuló 106 medallas y 154 diplomas.

El científico valenciano Santiago Grisolía recibió el encargo de gestionar su legado, compuesto por miles de fotografías, cartas, cuadernos de anotaciones científicas, publicaciones, biblioteca, mobiliario, útiles de laboratorio, diplomas y galardones. Todo ello es actualmente propiedad de la Fundación Bancaja y está custodiado y parcialmente exhibido en el Museo de las Ciencias Príncipe Felipe de Valencia. ©

Reacción en cadena

NOTICIAS

La planta más pequeña de la Tierra, alimento de astronautas

La harina de agua es la planta más minúscula que se conoce, ya que mide menos de un milímetro de diámetro y es apenas una esfera. Se trata de una planta acuática que se encuentra en los mares tropicales de Asia, flotando sobre su superficie. Pese a todo, podría convertirse en uno de los cultivos básicos para las misiones espaciales y las bases que se pretenden instalar en la Luna y,



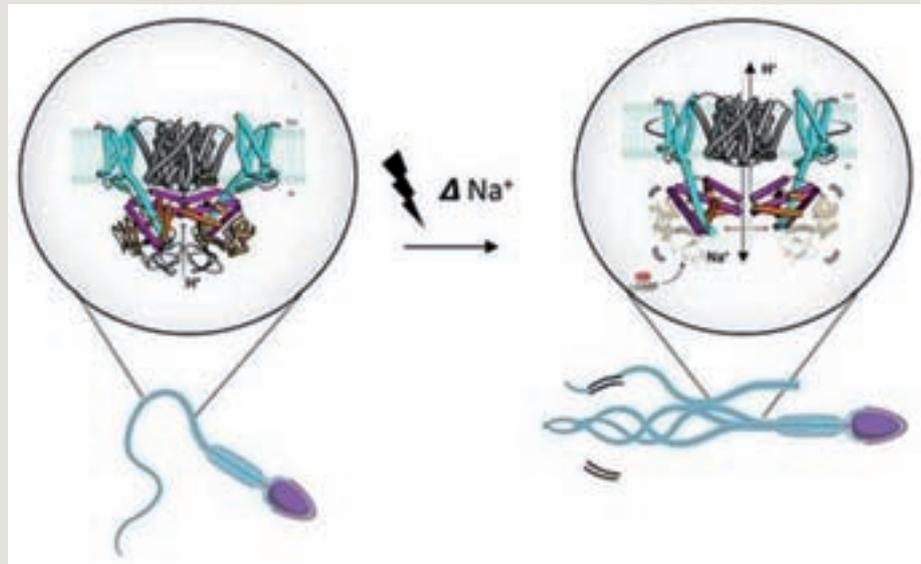
posteriormente, en Marte, tanto para la alimentación de los astronautas como para la

generación de oxígeno. Es lo que proponen investigadores de la Universidad de Mahidol,

en Tailandia, que han sometido a estas plantas a un entorno de gravedad cambiante (entre la ingravidez y la hipergravedad), mediante una centrifugadora de la Agencia Espacial Europea (ESA), durante periodos de varios meses, para estudiar su crecimiento y desarrollo en situaciones de gravedad cambiante, con resultados prometedores. En Tailandia se consume habitualmente la harina de agua en diferentes platos (sopas, ensaladas y otros) ya que al carecer de raíces, tallo y hojas se puede aprovechar el 100 % de la planta. ▶

Cómo funciona el olfato de los espermatozoides

Desde hace años se sabe que los espermatozoides, en su carrera para fecundar al óvulo, se guían por estímulos químicos, como si poseyeran el sentido del olfato. La carrera es feroz, porque solo uno de ellos conseguirá el objetivo, y se desplazan con enorme rapidez guiados y espoleados por esas moléculas que desprende el óvulo. Ahora, científicos de la Universidad de Estocolmo han desvelado el papel que en este proceso juega una proteína, denominada SLC9C1, que se encuentra en la membrana de los espermatozoides y que interactúa con las señales químicas del óvulo desencadenando, como si fuera un toque de silbato, el arranque de la carrera. Lo que produce el contacto es el intercambio de pro-



tones del interior celular por iones de sodio del exterior, lo que produce un aumento de tensión eléctrica que es lo que moviliza al espermatozoide. Entre otras posibles aplicaciones, el hallazgo

puede ayudar a "desarrollar nuevos anticonceptivos masculinos que actúen bloqueando esta proteína", señala David Drew, uno de los coautores del trabajo, publicado en *Nature*. ▶

Nace la teoría del *big bang*

En 1927, el físico y sacerdote belga George Lemaitre propuso la idea de que el universo estaba en expansión y que había nacido de lo que denominó “el huevo cósmico”. Su teoría se afianzó cuando Edwin Hubble dio a conocer, en 1929, que las galaxias parecían estar alejándose unas de otras. Pero la propuesta no se desarrolló de forma más detallada hasta 1948, cuando George Gamow estudió a fondo las consecuencias de esta hipótesis y realizó dos predicciones que debían corroborar lo que más tarde se denominó como *big bang*: la preponderancia de los elementos más simples (hidrógeno y helio) en el universo y la existencia de una radiación de fondo de muy baja temperatura. Con ello, convirtió la idea de Lemaitre (propuesta también independientemente por el ruso Aleksandr Fridman en 1922), en una teoría consistente y contrastable. La abundancia de hidrógeno y helio en el universo (en torno al 75 % y el 25 % respectivamente de toda la materia cósmica) fue pronto corroborada y la radiación de fondo de microondas fue descubierta en 1965. ▶



Un nanochip para protegerse de ciberataques

La conectividad de los teléfonos móviles y otros cachivaches electrónicos se ha convertido en una fuente de problemas de seguridad. Los ciberataques proliferan para conseguir información de los usuarios y cada herramienta de seguridad que se desarrolla no tarda en ser superada

por los *hackers*. Ahora, un grupo de investigadores españoles del Instituto de Microelectrónica de Sevilla (IMSE, centro mixto CSIC-Universidad de Sevilla) ha desarrollado un nanochip que permite generar claves únicas y números aleatorios que aumentan la seguridad de los

dispositivos electrónicos y los protege frente a ciberataques. Es el resultado de un proyecto financiado por la Unión Europea y denominado SPIRS (Secure Platform For ICT Systems Rooted at the Silicon Manufacturing Process). El nanochip, que integra un conjunto de primitivas criptográficas, está especialmente diseñado para sistemas o aparatos con limitación de memoria o consumo de potencia, como los objetos que portan un pequeño chip para interactuar con internet o los dispositivos portátiles. “El chip microelectrónico diseñado en este proyecto, al ser adherido a un sistema electrónico, lo dota de un conjunto de mecanismos de protección a nivel físico (*hardware*) y esto hace que aumente su inmunidad frente a ataques basados en *software* malicioso, también conocidos como *malware*”, explica la investigadora Piedad Brox, investigadora del IMSE que coordina el proyecto. ▶



EN RED

Una biblioteca en la pantalla

Entre las numerosas posibilidades que ofrece la web del Instituto Cervantes se encuentra su Biblioteca electrónica, un conjunto de recursos y servicios que permite recibir en préstamo libros digitales, con una amplísima oferta que abarca no solo obras literarias sino también de historia, arte, ciencia y también las dirigidas a público infantil y juvenil. Los fondos disponibles se incrementan diariamente, con títulos procedentes de más de 200 editoriales de todo el mundo. También permite acceder a bases de datos, consultar diccionarios y enciclopedias, escuchar música, leer revistas en versión electrónica y participar en clubes virtuales de lectura y de cine. Especial interés ofrece la posibilidad de escuchar audiolibros, narrados en español por profesionales de la locución y que incluye ya 82 obras, tanto clásicas como actuales. Es accesible las 24 horas del día y los 365 días del año con una conexión a internet. El material se puede descargar y, como en una biblioteca tradicional, el usuario tiene un plazo determinado para leerlo o escucharlo. Para acceder a esta biblioteca hay que hacerse socio a través de la web del Instituto Cervantes y pagar una cuota anual de 14 euros.



<https://cervantes.org/es/bibliotecas/biblioteca-electronica>

Otra visión de la Política Agrícola Común

La Política Agrícola Común, más conocida por sus siglas PAC, es uno de los programas más importantes de la Unión Europea y el que más recursos económicos consume. Creada en 1962, su objetivo inicial era garantizar el suministro de alimentos de los países que forman la UE, al que se sumó después, hasta convertirse en su prioridad, el apoyo al sector primario europeo, ante la amenaza de despoblamiento de las zonas rurales de todo el continente, y además, ayudar a conservar los recursos naturales y el medio ambiente. Este año ha entrado en vigor la última reforma de esta política que pretende, precisamente, poner el acento en la protección ambiental y garantizar rentas suficientes para los trabajadores del campo. No obstante, las reformas acometidas han sido criticadas, por insuficientes, por numerosas organizaciones de defensa ambiental y de profesionales del mundo agrario. Más de medio centenar de ellas se han organizado para denunciar estas supuestas deficiencias y defender alternativas más adecuadas en la plataforma *Por otra PAC*. En su web informan sobre los contenidos e historia de la Política Agrícola Común, sus críticas, actividades, análisis, propuestas y otros materiales informativos.



<https://porotrapac.org/>

REDES



@unicoos

Canal del profesor David Calle dirigido a estudiantes de ESO y bachillerato explicando temas de materias científicas para ayudarles en sus estudios.



Sorprendente

Un grupo de Facebook donde los miembros publican noticias, vídeos y fotografías de fenómenos curiosos de origen natural o humano.



@CIEMAT_OPI

La mejor manera de seguir toda la actividad que desarrolla el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat) en el ámbito energético (pero no solo).



@projectomeitner_ific

El proyecto Meitner es una iniciativa del Instituto de Física Corpuscular de Valencia para recordar a Lise Meitner, la física que explicó la fisión nuclear, para estimular las vocaciones científicas entre las jóvenes y niñas.



Física en segundos

Ideas de la física y aledañas contadas de manera curiosa. Este argentino, llamado Anibal, tiene más de 580.000 seguidores y uno de sus vídeos, dedicado a fomentar los estudios de técnico nuclear, acumula millón y medio de visitas.

AGENDA

Planetario de Pamplona

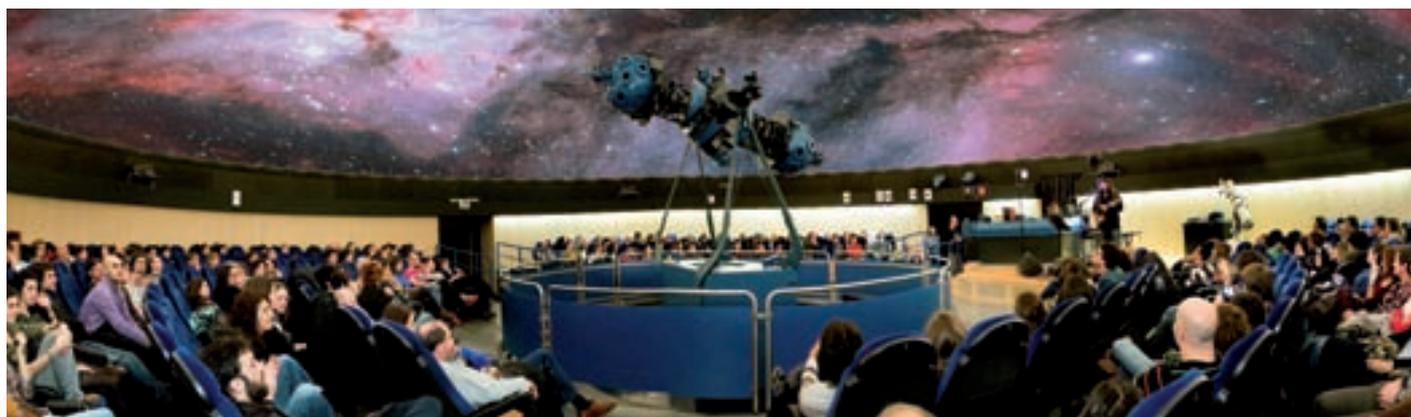
Calle Sancho Ramírez s/n
31008 Pamplona (Navarra)
T: 948 262 628

La cultura científica tiene en Pamplona uno de los centros más veteranos y activos de España, su planetario, que a finales de 2023 cumple 30 años de antigüedad y que ha recibido el premio Especial del Jurado de los Prismas que conceden los Museos Científicos Coruñeses, el galardón más prestigioso en el ámbito de la

divulgación científica. Además de programas de planetario y películas proyectadas en su hemisférica pantalla dispone de salas de exposiciones temporales. Actualmente se exhibe la denominada *Las sin sombrero*, dedicada a la memoria de las mujeres de la generación del 27. Le seguirá, en diciembre, una exposición de fotografías espectaculares del cosmos. También en diciembre se inaugura la película *El universo de Cajal*, un recorrido por la vida del premio Nobel español, destacando su pasión por la astronomía y la fotografía y recordando esos años de la ciencia de comienzos del siglo XX

en los que la visión del universo y la del cerebro conocieron su más profunda revolución. Se unirá a la treintena larga de películas y programas de planetario, la mayoría de producción propia o coproducidas, que se siguen proyectando de acuerdo con un calendario disponible en la pestaña *Agenda* de su web. ▶

<https://www.pamplonetario.org/es/inicio>



LIBRO

La hechicera, el gato y el demonio

De Zenón de Elea a Stephen Hawking:

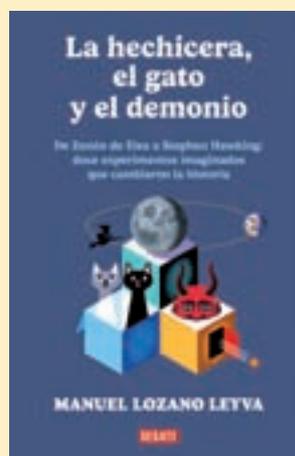
12 experimentos imaginados que cambiaron la historia

Manuel Lozano Leyva

Editorial Debate, 2023
326 páginas

Los pilares del edificio de la ciencia están hechos de experimentos, algunos de ellos que confirmaron hipótesis previas y otros que desvela-

ron fenómenos impensados y que abrieron nuevos caminos. Este libro está dedicado a una categoría muy especial de experiencias, la de los experimentos imaginarios, que no se llevaron a cabo porque eran materialmente imposibles, como el de Einstein imaginando que volaba por el universo montado en un rayo de luz. Pese a todo, muchos de ellos sirvieron también para descubrir posibles fenómenos y validar ideas teóricas. El autor, Manuel Lozano Leyva, catedrático emérito de Física Atómica, Mo-



lecular y Nuclear, es también un prolífico divulgador y ha seleccionado doce experimentos imaginarios que tuvieron una sustancial trascendencia en la historia de

la ciencia, empezando por la célebre propuesta de Zenón de Elea sobre la carrera de Aquiles contra una tortuga y que ilustra el concepto matemático y físico de infinito y pasando por el más célebre aún de la paradoja propuesta por Erwin Schrödinger y su famoso gato, hasta desembocar en Stephen Hawking. La obra es, de alguna manera, la continuación y el complemento del que Lozano publicó hace casi dos décadas sobre los 10 experimentos más bellos de la historia de la física. ▶

Panorama

El CSN remite al Parlamento el informe de sus actividades del año 2022

Como es preceptivo, el Consejo de Seguridad Nuclear remitió el 11 de septiembre al Congreso de los Diputados y al Senado su informe anual con el detalle de las actividades desarrolladas por el organismo el pasado año. El documento pone de manifiesto el correcto funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas en España, que operaron de forma segura, garantizando la protección radiológica de la población, los trabajadores y el medio ambiente.

La primera parte del informe contiene información sobre el propio organismo, su composición y funcionamiento y sus actividades en cuanto a las relaciones internacionales, institucionales y de comunicación, transparencia e información pública. La segunda, de carácter más técnico, expone las actividades



reguladoras llevadas a cabo sobre las instalaciones nucleares y radiactivas y la vigilancia radiológica ambiental. Entre las actuaciones realizadas durante 2022, destaca la aprobación del Reglamento sobre Protección de la Salud contra los Riesgos Derivados de la Exposición a las Radiaciones Ionizantes y el licenciamiento de equipos dentro del plan INVEAT para la renovación y ampliación de las capacidades del Sistema Nacional de Salud, lo que supone la puesta en funcionamiento de, al menos, 750 nuevos equipos médicos entre 2022 y 2023.

En el ámbito internacional, destacó la celebración en la sede del CSN del 25º aniversario del Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (FORO) que contó con la presencia del director general del OIEA, Rafael Grossi. El informe completo y un resumen del mismo están disponibles para su consulta en la web del Consejo. ▶

En el ámbito internacional, destacó la celebración en la sede del CSN del 25º aniversario del Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (FORO) que contó con la presencia del director general del OIEA, Rafael Grossi. El informe completo y un resumen del mismo están disponibles para su consulta en la web del Consejo. ▶

Se incorpora al Consejo una nueva promoción de la escala superior del Cuerpo Técnico

El pasado 20 de septiembre iniciaron el programa de formación de prácticas para su posterior incorporación al Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), las tres nuevas funcionarias que superaron las pruebas de acceso, de acuerdo con la Oferta de Empleo Público de 2022. En el acto de bienvenida fueron recibidas por los miembros del Pleno y los directores técnicos de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica.

El presidente, Juan Carlos Lentijo recordó el compromiso del CSN con los objetivos de garantizar la seguridad nuclear y la protección radiológica de las



personas, los trabajadores y el medio ambiente, y la importancia de desarrollar su trabajo siguiendo valores como la transparencia y la vocación de servicio, los cuales forman parte del ideario de la institución. Subrayó también los retos que afrontará el Consejo en los próximos años, con las centrales en la fase final de su vida útil, el desmantelamiento de las instala-

ciones y el almacenamiento de residuos. La convocatoria de empleo público correspondiente a 2023 ofertará 16 nuevas plazas para el Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica del Consejo de Seguridad Nuclear. La información sobre el proceso selectivo y el temario de la oposición estará disponible en la página web del organismo. ▶



conmemorativo de la efemérides, durante el cual el presidente del CSN, Juan Carlos Lentijo, destacó la importancia de este espacio dentro de los objetivos de divulgación, formación y transparencia en la institución y recordó a su predecesor e impulsor del proyecto, Juan Manuel Kindelán, bajo cuyo mandato se puso en marcha. ▶



Participación del CSN en la Conferencia del OIEA sobre gestión de residuos

A principios de noviembre se celebró en la sede del OIEA, en Viena, la conferencia Safety of Radioactive Waste Management, Decommissioning, Environmental Protection and Remediation, para el intercambio de información, experiencias y previsiones para gestionar las interrelaciones entre seguridad y sostenibilidad en materia de gestión de residuos radiactivos y desmantelamiento de instalaciones. En la conferencia participó una delegación del CSN, encabezada por su presidente, Juan Carlos Lentijo, y la consejera Pilar Lucio, además de varios técnicos que participaron en sesiones de trabajo. En su intervención, el presidente defendió la importancia de la seguridad, necesaria para la sostenibilidad, y destacó los retos que España tiene planteados en este ámbito, especialmente el aún pendiente de aprobación séptimo Plan General de Gestión de Residuos Radiactivos, que incluirá la construcción de un almacenamiento geológico profundo, y el calendario de cierre programado de centrales nucleares. ▶

El Centro de Información del CSN celebra su 25º aniversario

En septiembre de 1998 abrió sus puertas el Centro de Información del Consejo de Seguridad Nuclear, un espacio de carácter museístico dedicado a facilitar el conocimiento y comprensión por parte de la sociedad de la actividad que desarrolla el organismo y la necesidad de controlar y regular el uso de las radia-

ciones ionizantes para la debida protección de las personas y el medio ambiente. En este cuarto de siglo han pasado por el centro 158.000 visitantes. El pasado año se procedió a actualizar algunos de los módulos e infraestructuras de la instalación. Al cumplirse 25 años, el 20 de septiembre de este año se realizó un acto

Reunión anual con los inspectores de comunidades con encomienda de funciones

Durante tres días, a finales de octubre, se llevó a cabo en la sede del Consejo la reunión anual con los inspectores de las nueve comunidades autónomas con las que se mantienen acuerdos de encomienda de funciones, en materia de inspección y control de instalaciones radiactivas de



segunda y tercera categoría, programas de vigilancia radiológica ambiental, transporte de material nuclear y radiactivo, tribunales de licencias y asistencia en materia de emergencias. Durante la reunión se trataron los retos que se presentan de cara al nuevo año y se informó de los cambios legales producidos en este ámbito. Entre dichos retos, se destacaron los generados en la inspección y evaluación de las instalaciones médicas relacionadas con el Plan de Inversión en Equipos de Alta Tecnología (INVEAT). También se trató la aplicación de la Instrucción Técnica Complementaria dedicada a instalaciones de radiografía y gammagrafía industrial. ▶

En recuerdo de Javier Reig



El pasado día 22 de octubre falleció en Las Rozas (Madrid) Javier Reig Redondo, víctima de una enfermedad con la que estuvo luchando los últimos años. Javier Reig ingresó por oposición en el año 1978 en la entonces Junta de Energía Nuclear, donde estuvo trabajando en el Departamento de Seguridad Nuclear, participando en el licenciamiento de los proyectos de las centrales nucleares españolas de tercera generación y, en concreto y entre otras, en las de Almaraz, Ascó, Lemóniz y Sayago.

Una vez creado el Consejo de Seguridad Nuclear, en 1980, desempeñó la Jefatura de Área de Sistemas Nucleares, que tuvo entre sus cometidos el licen-

ciamiento de la puesta en marcha, en la década de los ochenta y comienzos de la de los noventa, de las últimas centrales nucleares españolas. Posteriormente, se le asignó la dirección del Departamento de Relaciones Internacionales del CSN, donde estuvo desde 1995 hasta 2001, cuando decidió continuar su actividad profesional en la Agencia Europea de Energía Nuclear (NEA), dependiente de la OCDE, con sede en París, donde fue responsable de la Dirección de Seguridad Nuclear hasta su jubilación.

Tuve la suerte y el honor de coincidir con Javier cuando ingresé en el CSN en 1983, y puedo asegurar que fue una buena persona, excelente amigo y gran jefe, que dejó huella por donde pasó. Descanse en paz.

Antonio Munuera ▶

Reconocimiento a un reportaje publicado en la revista Alfa

El reportaje *La ciencia de estirar el tiempo*, escrito por Eugenia Angulo Alonso y publicado en el número 49 de esta revista, fue premiado con el Prisma al Mejor Artículo de Divulgación Científica de 2022, que conceden los Museos Científicos Coruñeses. Estos premios, que han celebrado este año su 36ª edición, son los de mayor tradición y prestigio en el ámbito de la divulgación de la ciencia en España. La entrega del galardón tuvo lugar el sábado 18 de noviembre en el Ayuntamiento de La Coruña. El reportaje estaba dedicado a las investigaciones que actualmente se llevan a cabo en todo el mundo para luchar contra el envejecimiento y conseguir prolongar la vida y, sobre todo, hacerlo en las mejores condiciones de salud física y mental. La autora es química de formación y máster en periodismo científico y se ha dedicado



a la comunicación científica, a través de reportajes, libros y otras actividades a lo largo de los últimos 16 años. ▶

Acuerdos del Pleno del CSN destacados

- Pleno del 7 de septiembre de 2023. El CSN aprueba la revisión de la Instrucción que establece los criterios de notificación de sucesos en centrales nucleares (IS-10)
- Pleno del 31 de octubre de 2023. El CSN informa favorablemente los planes de acción derivados de los resultados de la ITC de caracterización sísmica

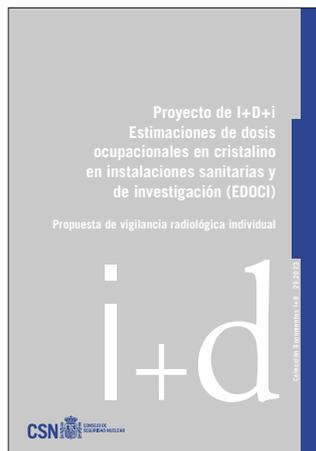


[Acceso a todas las acts](#)

Publicaciones



Proyecto para el estudio de la Corrosión bajo tensión de la aleación 690 y sus metales de soldadura asociados



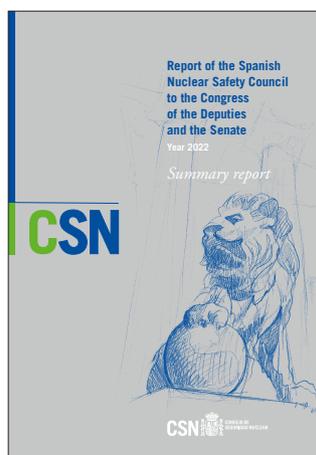
Proyecto de I+D+i Estimaciones de dosis ocupacionales en cristalino en instalaciones sanitarias y de investigación (EDOCI)
Propuesta de vigilancia radiológica individual



Plan de comunicación
2022-2025



Communication Plan
2022-2025



Report of the Spanish Nuclear Safety Council to the Congress of the Deputies and the Senate
Year 2022
Summary report

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

También puedes suscribirte a la edición digital de la revista ALFA a través de este formulario online: <http://run.gob.es/xdjxkd>

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 **The rise of radioisotopes in medicine**

The demand for radionuclides for diagnostic and therapeutic purposes is growing across the world. These elements are created in nuclear reactors or cyclotrons and their production is restricted to just a few countries, this suggesting that there will be problems in the future in meeting the increasing demand.

11 **A journey through science-fiction in the 21st century**

Today's technology advances at such a pace that science-fiction's attempts to describe the future are rapidly thwarted by a reality that moves forward much faster than in Jules Verne's days, even overtaking imagination.

33 **From the laboratory to the plate**

Science investigates alternative foodstuffs, with a view to improving human and environmental health, among them new sources of protein, superfoods supporting the organism and genetically customised diets. One of the most promising breakthroughs is the cultivated meat designed to phase out livestock farming.

38 **International commitments to guarantee a safer nuclear and radiological world**

Over the past few decades, the IAEA has organised numerous international conventions on different aspects of technological safety and security in the nuclear field, in order to achieve the highest possible levels of overall safety.

52 **Citizen science: the embrace between society and research**

An increasing number of research projects contemplate the possibility of the members of the public participating in their performance. It is one way of increasing society's interest in and evaluation of scientific research and even of carrying out tasks that would not be feasible otherwise.

57 **Severo Ochoa: The emotion of discovering**

The second Spaniard to receive the Nobel Prize in an area of science followed the evolution of biomedicine from histology to molecular biology. Particularly significant among his numerous contributions are his works in the field of biochemistry, the deciphering of the genetic code and the synthesis of nucleic acids in the laboratory, for which he was awarded the prize.

RADIOGRAPHY

24 **Pregnancy and radiation. What do I need to know?**

Many expectant women need to be exposed to ionising radiations for medical reasons. In order to provide them with suitable information, in 2022 the CSN published an explanatory document on this subject.

INTERVIEW

26 **Nuria Oliver, director of the Alicante ELLIS Foundation**

"We need artificial intelligence to survive as a species and to address the challenges of the 21st century".

TECHNICAL ARTICLES

17 **A description of the BEPU accident analysis methodologies**

The deterministic analysis of safety focuses on computational simulation based on calculations performed using predictive models with physical magnitudes whose results are affected by uncertainties. BEPU (best estimate plus uncertainty) methodologies are used to analyse these uncertainties.

42 **The site restoration plan and its application at José Cabrera**

The objective of a nuclear facility decommissioning and dismantling plan is for the site to be radiologically safe for people and allow it to be used for any other activity. A restoration plan is drawn up for this, and this article describes the actions that its application implies in the case of the José Cabrera nuclear power plant.

CSN I+D

50 **Journalism and public opinion in risk communication: the radon gas case**

The Faculty of Communication Sciences of the University of Santiago de Compostela is undertaking a study aimed at gaining insight into public perception of the risks associated with radon and communication strategies to improve public understanding of the issue.

I PLAN de IGUALDAD del Consejo de Seguridad Nuclear 2023-2026

*Juntos hacia
la excelencia*