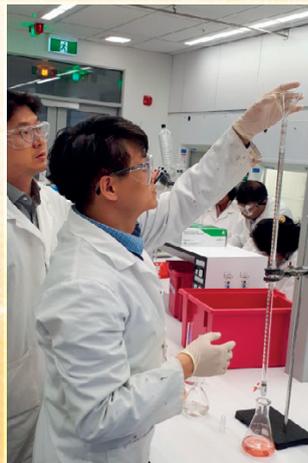
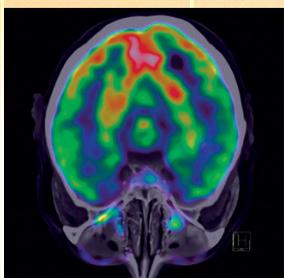


# EXAMEN DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR DE

2018



**IAEA**

Organismo Internacional de Energía Atómica



# Examen de la Tecnología Nuclear de 2018

GC(62)/INF/2

Impreso por el OIEA en Austria  
Agosto de 2018

IAEA/NTR/2018

# Prefacio

En respuesta a lo solicitado por los Estados Miembros, la Secretaría elabora cada año un amplio Examen de la Tecnología Nuclear. Adjunto al presente documento figura el informe de este año, en el que se destacan las novedades importantes ocurridas en 2017.

El *Examen de la Tecnología Nuclear de 2018* trata sobre los siguientes temas: las aplicaciones eléctricas, la fisión avanzada y la fusión, las aplicaciones de aceleradores y reactores de investigación, las técnicas nucleares aplicables al manejo de los alimentos, el suelo y el ganado, en relación con la respuesta a una emergencia, las novedades en la radioterapia y la neuropsiquiatría, la contaminación de los océanos por plásticos y los radiofármacos.

El documento se ha modificado para tener en cuenta, en la medida de lo posible, las observaciones específicas de la Junta de Gobernadores y otras observaciones recibidas de los Estados Miembros.



# Índice

Resumen ejecutivo .....	1
Examen de la Tecnología Nuclear de 2018.....	5
Informe principal.....	5
A. Aplicaciones eléctricas .....	5
A.1. La energía nucleoelectrica.....	5
A.1.1. Países en fase de incorporación.....	7
A.1.2. Países en fase de ampliación .....	7
A.1.3. Países con centrales nucleares en funcionamiento .....	8
A.2. Proyecciones de crecimiento de la energía nucleoelectrica.....	10
A.3. Ciclo del combustible .....	11
A.3.1. Parte inicial.....	11
A.3.2. Garantía del suministro.....	14
A.3.3. Parte final .....	14
A.3.4. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de los desechos radiactivos .....	16
B. Fisión avanzada y fusión .....	20
B.1. Fisión avanzada .....	20
B.1.1. Reactores refrigerados por agua .....	20
B.1.2. Sistemas de neutrones rápidos .....	21
B.1.3. Reactores refrigerados por gas.....	22
B.1.4. Reactores pequeños y medianos o modulares.....	23
B.1.5. Iniciativas internacionales que promueven sistemas de energía nuclear innovadores.....	25
B.1.6. Aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear .....	26
B.2. Fusión .....	27
C. Aplicaciones de los aceleradores y los reactores de investigación.....	28
C.1. Aceleradores .....	28
C.2. Reactores de investigación .....	30
D. Alimentación y agricultura.....	33
D.1. Preparación para una emergencia nuclear en las esferas de la alimentación y la agricultura....	33
D.1.1. Retos de la respuesta a una emergencia nuclear.....	33
D.1.2. Novedades en los sistemas de apoyo a la toma de decisiones para la respuesta a emergencias.....	33
D.1.3. DSS4NAFA.....	34
D.2. Uso de la irradiación para desarrollar vacunas novedosas y eficaces contra las zoonosis y las enfermedades de los animales .....	35
D.3. Marcas multiisotópicas para localizar las fuentes de los contaminantes agrícolas y su recorrido desde los suelos hasta los cuerpos de agua.....	39
E. Salud humana.....	41
E.1. Radioterapia estereotáctica: Una técnica de radioterapia de alta precisión .....	41
E.1.1. Requisitos técnicos.....	41

E.1.2. Personal requerido .....	42
E.1.3. Indicaciones .....	43
E.1.4. Contribuciones del Organismo.....	43
E.2. Neuropsiquiatría: Revolución de la imagenología molecular en la enfermedad de Alzheimer .	43
E.2.1. Antecedentes .....	43
E.2.2. Diagnóstico .....	44
E.2.3. Iniciativas y sensibilización a nivel mundial .....	45
F. Medio ambiente.....	46
F.1. Técnicas nucleares en la investigación sobre los plásticos marinos .....	46
G. Producción de radioisótopos y tecnologías de la radiación .....	49
G.1. Terapia con partículas $\alpha$ : Nuevas aplicaciones terapéuticas de radiofármacos con emisores $\alpha$	49
G.1.1. Radio 223 .....	50
G.1.2. Generador de actinio 225/bismuto 213.....	51
G.1.3. Actinio 225 .....	51
G.1.4. Astatto 211.....	52

## Resumen ejecutivo

1. Al final de 2017, los 448 reactores nucleares de potencia en funcionamiento tenían una capacidad total de generación de 392 GW(e), aproximadamente 1,2 GW(e) más que en 2016. En 2017 se pusieron en régimen de parada definitiva cinco reactores, se conectaron a la red otros cuatro y se inició la construcción de cuatro. Las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo se siguieron centrando en Asia, donde se encuentran 40 de los 59 reactores en construcción, así como 51 de los 59 reactores que se han conectado a la red desde 2005.
2. Treinta países utilizan actualmente la energía nucleoelectrica, y 28 están estudiando la posibilidad de incluirla en su canasta energética, planificando esta medida o trabajando ya activamente en ella. Tres países en fase de incorporación están construyendo sus primeras centrales nucleares, y varios otros que han decidido introducir la energía nucleoelectrica se encuentran en fases avanzadas de la preparación de la infraestructura. Las proyecciones altas de la capacidad nucleoelectrica mundial elaboradas por el Organismo en 2017 indican un aumento del 42 % con respecto a los niveles actuales para 2030 y una duplicación de la capacidad para 2050, mientras que las proyecciones bajas arrojan una disminución gradual de la capacidad hasta 2040, con una recuperación hasta los niveles actuales para 2050.
3. Las ventajas de la energía nucleoelectrica para la mitigación del cambio climático, la seguridad energética y las políticas ambientales y socioeconómicas son las principales razones que están impulsando a muchos países a introducir este tipo de energía o a ampliar los programas que ya tienen. En la Conferencia Ministerial Internacional sobre la Energía Nucleoelectrica en el Siglo XXI, celebrada por el Organismo en Abu Dhabi, se subrayó que se requerirá un crecimiento sustancial de la energía nucleoelectrica para que el mundo pueda cumplir sus objetivos relacionados con el clima y el desarrollo sostenible.
4. La producción mundial de uranio de 2017 fue parecida a la de 2016, situándose en torno a 63 000 toneladas. Los bajos precios redujeron considerablemente la capacidad de las empresas de conseguir fondos para la exploración, los estudios de viabilidad y la construcción de nuevos proyectos de expansión. Los recursos mundiales de uranio y las capacidades mundiales de conversión, enriquecimiento y fabricación de combustibles son más que suficientes para satisfacer la demanda.
5. En agosto de 2017 se inauguró la instalación de almacenamiento del Banco de Uranio Poco Enriquecido (UPE) del OIEA en Kazajstán. La solicitud de propuestas para la adquisición de UPE se publicó en noviembre de 2017.
6. En todo el mundo se siguió avanzando en el fortalecimiento y la mejora de la seguridad de las centrales nucleares. Los retos más comunes son la aplicación de cambios en la organización, los retrasos en las actividades de puesta en servicio, la creación de capacidad humana, la optimización de las actividades de mantenimiento, la determinación de las modificaciones importantes para la seguridad de las centrales, el fortalecimiento de la gestión de los accidentes y de la preparación y respuesta para casos de emergencia en los emplazamientos, y el liderazgo y la gestión en pro de la seguridad. El Organismo, con sus normas de seguridad y sus herramientas y materiales mejorados, siguió prestando asistencia y orientando a los Estados Miembros en estos ámbitos.
7. Hasta la fecha, se han descargado de los reactores nucleares, como combustible nuclear gastado, alrededor de 400 000 toneladas de metal pesado, de las cuales se está reprocesando aproximadamente el 25 %. Hay un total de 151 instalaciones de almacenamiento en seco de combustible gastado situadas fuera del emplazamiento de los reactores, en 27 países.
8. Para los próximos años se espera un trabajo considerable en la clausura de reactores de potencia, reactores de investigación, conjuntos críticos y otras instalaciones del ciclo del combustible en todo el mundo.

9. Varios países hicieron progresos en sus proyectos relacionados con la disposición final geológica profunda de desechos radiactivos de actividad alta y/o de combustible gastado declarado como desecho, y en sus proyectos de disposición final en pozos barrenados de las fuentes radiactivas selladas en desuso. Para todas las demás categorías de desechos radiactivos hay instalaciones de disposición final operativas en todo el mundo.

10. En varios Estados Miembros prosiguieron los trabajos de investigación y desarrollo (I+D) y el despliegue de reactores de fisión avanzados. La mayoría de los países en fase de incorporación optan por reactores avanzados refrigerados por agua, con capacidades de producción eléctrica más altas, como primeros reactores. Hay varias tecnologías de reactores rápidos, basadas en decenios de experiencia en el diseño, la construcción y la explotación, que están en fase de desarrollo y despliegue. Muchos Estados Miembros, incluso algunos en fase de incorporación, están trabajando en el desarrollo de reactores refrigerados por gas, con mejores características de seguridad y eficiencia. Hay más de 50 reactores pequeños y medianos o modulares en desarrollo, de todos los tipos principales de reactor, y tres de ellos se encuentran en fases avanzadas de la construcción. Estas actividades cuentan con el respaldo de varias iniciativas internacionales que promueven sistemas de energía nuclear innovadores.

11. Ha aumentado el interés en utilizar la energía nuclear en aplicaciones no eléctricas como la desalación de agua de mar, la producción de hidrógeno, la calefacción urbana, la recuperación terciaria de crudo y otras aplicaciones industriales. La cogeneración puede compensar una parte importante de los costos de producción de la energía nucleoelectrónica.

12. En el emplazamiento del Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER) se observan progresos visibles importantes, y hay una amplia gama de programas de I+D sobre la fusión que están en curso en varios Estados Miembros. Un nuevo hito fundamental en la energía de fusión fue la producción del primer plasma en el estelarator Wendelstein 7-X optimizado.

13. Prosiguió el uso de aceleradores en estudios del medio ambiente, aplicaciones biomédicas, ciencia de los materiales, caracterizaciones de objetos del patrimonio cultural y la determinación de su procedencia, y dataciones por radiocarbono. Se inauguró la primera fuente de radiación sincrotrónica del Oriente Medio, SESAME, que emitió su “primera luz” a comienzo de 2017.

14. Los 238 reactores de investigación que están en funcionamiento en 56 países siguen cumpliendo una función estratégica de apoyo a los sectores médico, industrial, educacional y de la energía nucleoelectrónica. Siete países están construyendo nuevos reactores de investigación, y varios otros están considerando o planificando la construcción de reactores nuevos, como instalaciones nacionales fundamentales para el desarrollo de infraestructura y programas de ciencia y tecnología nucleares, incluida la energía nucleoelectrónica. En 2017, dos nuevas organizaciones de investigación pasaron a ser Centros Internacionales basados en Reactores de Investigación designados por el OIEA (ICERR).

15. Hasta el momento, 97 reactores de investigación y 2 instalaciones de producción de isótopos de uso médico han sido convertidos al uso de UPE, en lugar de uranio muy enriquecido (UME), o puestos en régimen de parada confirmada. Para la conversión de los reactores de investigación de alto flujo y alto rendimiento será preciso que lleguen al comercio combustibles de UPE de alta densidad, que aún se están desarrollando. En 2017 prosiguieron las actividades encaminadas a reducir al mínimo el uso de UME, incluida la devolución del combustible de UME de los reactores de investigación al país de origen. El proyecto de tres años destinado a convertir el único reactor de investigación de Ghana del uso de combustible de UME al de combustible de UPE concluyó en 2017, con la repatriación del combustible de UME a China.

16. A pesar de las dificultades creadas por algunas interrupciones del servicio de los reactores, se ha mantenido el suministro mundial de molibdeno 99, el isótopo de uso médico más común, gracias a la excelente cooperación y a las medidas preventivas colectivas de los principales productores internacionales, de los órganos de coordinación de la cadena de suministro, partes interesadas del ámbito gubernamental y de los reactores de investigación interesados.

17. En el marco de la preparación para emergencias nucleares o radiológicas, la capacidad de identificación rápida se considera esencial para evitar que lleguen al consumidor productos agrícolas que puedan estar contaminados. En la respuesta a una emergencia pueden intervenir muchos organismos, y la gestión e interpretación eficientes de grandes conjuntos de datos será decisiva para que se adopten decisiones acertadas. Hay nuevas herramientas de los sistemas de apoyo a la toma de decisiones (DSS) de la tecnología de la información (TI) que ofrecen una mejor gestión en tiempo real de grandes volúmenes de datos y un apoyo integrado a la adopción de decisiones en términos espaciales y temporales. Sin embargo, son pocas las que se centran en apoyar las decisiones relativas a los alimentos y la agricultura. En vista de ello, el Organismo ha desarrollado DSS4NAFA, un sistema integral, basado en la nube, que optimiza la reunión, gestión y visualización de datos relacionados con la agricultura. Cuando recibe datos sobre las concentraciones de radionucleidos, este sistema es capaz de recomendar restricciones al consumo de determinados alimentos y a la plantación de cultivos basándose en el grado de riesgo y en los niveles de tolerancia específicos. La versión  $\beta$  de la herramienta estará disponible en 2018.

18. La irradiación de microorganismos patógenos para crear vacunas se investiga desde los años cincuenta, pero la sobreirradiación suele destruir las estructuras nucleicas y proteínicas de las vacunas. Los irradiadores modernos pueden generar dosis más altas y más específicas de manera eficaz, lo que, junto con los avances en la investigación genómica y el mejor conocimiento de los sistemas inmunitarios, ha abierto las puertas al desarrollo de una nueva gama de vacunas. Los adelantos actuales en las tecnologías de producción de vacunas irradiadas están demostrando la posibilidad de generar nuevas vacunas contra numerosos virus, parásitos y bacterias patógenos que pueden tener un importante efecto positivo en la salud humana y animal y en la economía de los países en desarrollo.

19. La contaminación agrícola de los ríos y cursos de agua tiene un impacto negativo en la salud humana, la biodiversidad y la pesca. Dado que los contaminantes pueden proceder de múltiples fuentes, se requieren múltiples enfoques para formular una caracterización clara del origen de los solutos y de su transporte a través del suelo. Los isótopos estables del nitrógeno, el carbono, el oxígeno, el azufre y el hidrógeno pueden emplearse como trazadores para obtener esta información en los agrosistemas. El componente isotópico de cada elemento es único, y puede servir para identificar de forma inequívoca fuentes de contaminación que, en muchos casos, se superponen unas con otras. Integrada en las técnicas convencionales, la investigación con múltiples isótopos estables como trazadores ofrecerá un cuadro claro de las diversas vías de contaminación, y esta información ayudará a aumentar la sostenibilidad de las prácticas de ordenación de las tierras.

20. La radioterapia estereotáctica es una técnica de radiación avanzada, no quirúrgica, que trata el cáncer irradiando los tumores con gran precisión y evitando así los considerables riesgos de la cirugía lesiva, particularmente en las zonas de difícil acceso o cercanas a órganos vitales. El sistema consiste en la obtención de imágenes en tres dimensiones y la localización del tumor en cuatro dimensiones, y utiliza haces de rayos X o radiación  $\gamma$  enfocados con gran precisión. Con un acelerador lineal, pueden tratarse tumores grandes en una única sesión. La técnica puede utilizarse para tratar muchos trastornos funcionales del cerebro, el cáncer de pulmón en la fase inicial y los cánceres de próstata, páncreas, hígado y riñón, así como los de cabeza, cuello y médula, en pacientes inoperables. Los ensayos clínicos indican que la radioterapia estereotáctica puede llegar a ser un tratamiento rentable en comparación con la radioterapia convencional en muchos contextos clínicos.

21. La demencia tiene muchas formas, de las cuales la más común es la enfermedad de Alzheimer. Los síntomas clínicos distintivos pueden ser difíciles de diagnosticar en las etapas iniciales. Sin embargo, las técnicas nucleares están ayudando ahora a identificar el proceso patológico de fondo, a veces años antes de que se manifiesten los síntomas, y permitiendo así un diagnóstico adecuado y diferencial. La medicina nuclear, conocida también como imagenología molecular, puede diagnosticar diversos trastornos cerebrales y diferenciar los síntomas causados por la demencia neurodegenerativa y otros procesos con síntomas parecidos, como los accidentes cerebrovasculares. Además, los radiotrazadores pueden ser biomarcadores fiables en la demencia, y ayudan a los médicos a diagnosticar diferentes trastornos causantes de esta afección. Los avances que se están logrando gracias a la neuroimagenología están proporcionando un conocimiento fundamental del proceso patológico, que ayudará a mejorar los medios terapéuticos.

22. El océano se ha convertido en el depósito final de gran parte de los contaminantes de origen terrestre, entre ellos los plásticos. La investigación con técnicas nucleares e isotópicas permite ahora entender mejor los efectos particulares de los microplásticos en los organismos marinos. Los microplásticos tienen efectos adversos incluso por la mera ingestión, pero además pueden depositarse en órganos internos y ser así vectores eficaces de la transferencia ulterior de los contaminantes, también al ser humano. La investigación actual está estudiando el destino y la toxicidad de los microplásticos y los contaminantes conexos en especies marinas de importancia económica y social.

23. Desde hace decenios se vienen utilizando radiofármacos terapéuticos para matar las células cancerosas. Sin embargo, las partículas  $\beta$  que se han empleado tienen un recorrido mucho más largo que las partículas  $\alpha$  de igual energía. A esta diferencia se debe la precisión de las partículas  $\alpha$  para llegar a las células cancerosas con considerablemente menos riesgo de dañar otros tejidos situados detrás o alrededor de la zona blanco. Hay diversos radionucleidos emisores de partículas  $\alpha$  que están en fase de evaluación preclínica y clínica para determinar la posibilidad de utilizarlos como radiofármacos, lo que conducirá a nuevos avances en el tratamiento del cáncer.

24. En 2017, el proyecto de Renovación de los Laboratorios de Aplicaciones Nucleares registró varios hitos importantes. Se inauguró el nuevo Laboratorio de Lucha contra Plagas de Insectos y se comenzó a trabajar en un Laboratorio Modular Flexible en Seibersdorf. Durante el año se recaudaron más fondos extrapresupuestarios, lo que elevó el total de las contribuciones financieras para la modernización recibidas de 31 Estados Miembros y otros contribuyentes a casi 32,5 millones de euros. Los esfuerzos encaminados a ampliar las asociaciones del Organismo y su base de movilización de recursos más allá de los asociados tradicionales condujeron al establecimiento de una asociación con Varian Medical Systems para el préstamo por diez años de un acelerador lineal (LINAC) al Laboratorio de Dosimetría, complementado con una contribución en especie por un Estado Miembro para los servicios de apoyo correspondientes. El Organismo firmó un memorando de cooperación con la Shimadzu Corporation para la donación de un cromatógrafo de líquidos a través de la Iniciativa sobre los Usos Pacíficos, con el fin de realizar actividades que mejoren el apoyo a los Estados Miembros en la investigación de la inocuidad de los alimentos y la capacitación al respecto.

# Examen de la Tecnología Nuclear de 2018

## Informe principal

### A. Aplicaciones eléctricas

#### A.1. La energía nucleoelectrónica en la actualidad

1. Al 31 de diciembre de 2017, había 448 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en el mundo, con una capacidad total de 392 GW(e)<sup>1</sup> (véase el cuadro A-1). Esta cifra representa un aumento de la capacidad total del orden de 1,2 GW(e) con respecto a 2016. De los reactores en funcionamiento, el 81,9 % son reactores moderados y refrigerados por agua ligera, el 10,9 % son reactores moderados y refrigerados por agua pesada, el 3,3 % son reactores refrigerados por agua ligera y moderados por grafito, y el 3,1 % son reactores refrigerados por gas. Tres son reactores rápidos refrigerados por metal líquido. Cerca del 89 % de la electricidad generada a partir de energía nuclear se produjo en 370 reactores de agua ligera.

2. En 2017 se conectaron a la red cuatro nuevos reactores de agua a presión (PWR): tres en China (Fuqing-4, Tianwan-3 y Yangjiang-4) y uno en Pakistán (CHASNUPP-4). Cinco reactores fueron puestos en régimen de parada definitiva: Kori-1 (República de Corea), Oskarhamn-1 (Suecia), Santa María de Garoña (España), Monju (Japón) y Gundremmingen-B (Alemania). Monju y Santa María de Garoña habían estado en régimen de parada a largo plazo antes de declararse en parada definitiva.

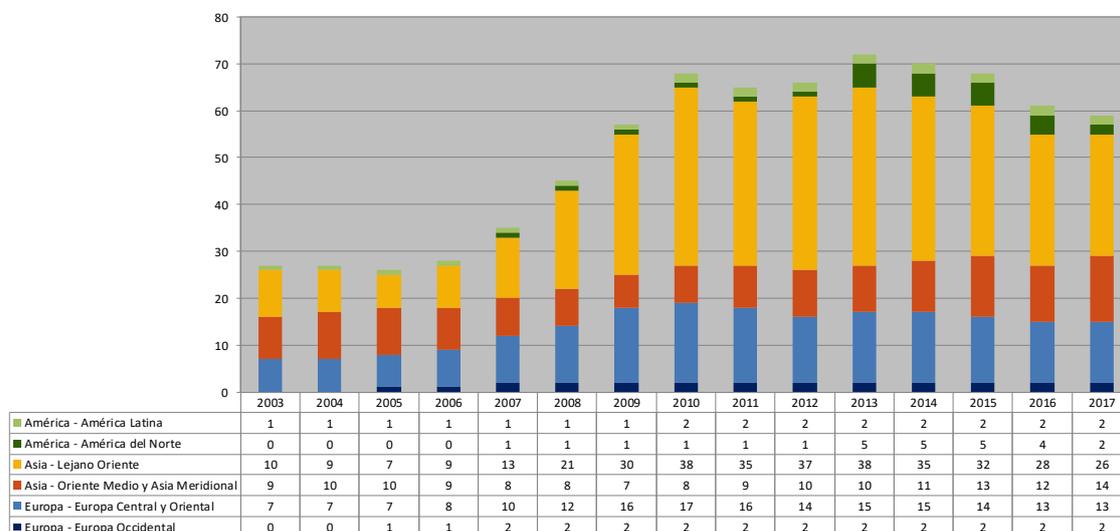


Fig. A-1. Número de reactores en construcción, por región

(Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia del OIEA, <http://www.iaea.org/pris>).

3. Al 31 de diciembre de 2017 había 59 reactores en construcción. Comenzaron las obras de construcción en Shin-Kori-5 (República de Corea), Kudankulam-3 y 4 (India) y Rooppur-1 (Bangladesh). La expansión y las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguen concentradas en Asia (fig. A-1), donde hay 40 reactores en construcción. También están en Asia 51 de los 59 nuevos reactores que se han conectado a la red desde 2005.

<sup>1</sup> Un GW(e), o gigavatio (eléctrico), equivale a mil millones de vatios de energía eléctrica.

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo (al 31 de diciembre de 2017)<sup>a</sup>

PAÍS	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2017		Experiencia operacional total hasta el final de 2017	
	Nº de unidades	Total de MW(e)	Nº de unidades	Total de MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
ALEMANIA	7	9 515			72,2	11,6	832	7
ARGENTINA	3	1 633	1	25	5,7	4,5	82	2
ARMENIA	1	375			2,4	32,5	43	8
BANGLADESH			1	1 080				
BELARÚS			2	2 220				
BÉLGICA	7	5 918			40,2	49,9	289	7
BRASIL	2	1 884	1	1 340	14,9	2,7	53	3
BULGARIA	2	1 926			14,9	34,3	163	3
CANADÁ	19	13 554			95,1	14,6	731	6
CHINA	39	34 514	18	19 016	232,8	3,9	280	9
COREA, REPÚBLICA DE	24	22 494	4	5 360	141,3	27,1	523	5
EMIRATOS ÁRABES UNIDOS			4	5 380				
ESLOVAQUIA	4	1 814	2	880	14,0	54,0	164	7
ESLOVENIA	1	688			6,0	39,1	36	3
ESPAÑA	7	7 121			55,6	21,2	329	1
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	99	99 952	2	2 234	805,6	20,0	4 309	9
FEDERACIÓN DE RUSIA	35	26 142	7	5 520	190,1	17,8	1 261	9
FINLANDIA	4	2 769	1	1 600	21,6	33,2	155	4
FRANCIA	58	63 130	1	1 630	381,8	71,6	2 164	4
HUNGRÍA	4	1 889			15,2	50,0	130	2
INDIA	22	6 255	7	4 824	34,9 <sup>b</sup>	3,2	482	11
IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA DEL	1	915			6,4	2,2	6	4
JAPÓN	42	39 752	2	2 653	29,3	3,6	1 823	5
MÉXICO	2	1 552			10,6	6,0	51	11
PAÍSES BAJOS	1	482			3,3	2,9	73	0
PAKISTÁN	5	1 318	2	2 028	8,1	6,2	72	5
REINO UNIDO	15	8 918			63,9	19,3	1 589	7
REPÚBLICA CHECA	6	3 930			26,8	33,1	158	10
RUMANIA	2	1 300			10,6	17,7	31	11
SUDÁFRICA	2	1 860			15,1	6,7	66	3
SUECIA	8	8 629			63,1	39,6	451	0
SUIZA	5	3 333			19,6	33,4	214	11
UCRANIA	15	13 107	2	2 070	80,4	55,1	488	6
Total <sup>c, d</sup>	448	391 721	59	60 460	2 503,1		17 430	6

- a. Datos del Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS) del Organismo (<http://www.iaea.org/pris>).
- b. Los datos de electricidad de la India se basan en el valor anual proporcionado para el país, porque a la publicación del presente informe no se disponía de datos de algunos reactores.
- c. Nota: Los totales incluyen los siguientes datos de Taiwán (China):  
6 unidades, 5052 MW(e), en funcionamiento; 2 unidades, 2600 MW(e), en construcción;  
35,1 TW·h de generación de electricidad nuclear, que representan el 16,3 % de la electricidad total generada.
- d. La experiencia operacional total también incluye las centrales en régimen de parada de Italia (80 años y 8 meses), Kazajistán (25 años y 10 meses), Lituania (43 años y 6 meses) y Taiwán (China) (206 años y 1 mes).

### **A.1.1. Países en fase de incorporación**

4. De los 28 Estados Miembros que han expresado interés en la energía nucleoelectrica, 19 han comenzado estudios de la infraestructura para este tipo de energía, 4 han adoptado ya una decisión y están preparando la infraestructura necesaria, y 5 han firmado contratos y están preparando o han iniciado ya la construcción. En otros 21 Estados Miembros cabe suponer que se seguirá avanzando hacia la decisión de establecer un programa nucleoelectrico en los próximos diez años.

5. En los Emiratos Árabes Unidos prosiguió la construcción de los cuatro reactores de la primera central nuclear del país, situada en Barakah. Está previsto que la Unidad 1 entre en funcionamiento en 2018, y las otras tres en los años siguientes. En 2017, el Organismo realizó misiones de Evaluación de la Enseñanza y la Capacitación y del Grupo de Examen Preliminar de la Seguridad Operacional. En Belarús, prosiguió la construcción de la primera central nuclear en Ostrovets, y la puesta en servicio de las dos unidades está programada para 2019 y 2020. En 2017 se presentó el informe final del análisis de la seguridad para el examen reglamentario, y se acogió una misión de Diseño del Emplazamiento y los Sucesos Externos del Organismo.

6. En Bangladesh comenzaron el 30 de noviembre las obras de construcción relacionadas con la seguridad en la Unidad 1 de la central nuclear de Rooppur. La puesta en servicio de las dos unidades de Rooppur está prevista para 2023 y 2024. En Turquía se dio inicio en octubre a las obras de construcción no nucleares de Akkuyu, con una licencia de construcción limitada, y la puesta en servicio de la Unidad 1 está programada para 2023. Egipto concluyó las negociaciones con la Corporación Estatal de Energía Atómica "Rosatom" de la Federación de Rusia sobre cuatro acuerdos clave para la construcción de la central nuclear de cuatro unidades de El Dabaa, que está previsto terminar entre 2023 y 2026.

7. Las negociaciones entre Jordania y Rosatom han avanzado. Al haber concluido los estudios fundamentales sobre la red eléctrica y el agua de refrigeración, se espera una decisión definitiva sobre la inversión en 2018. En octubre de 2017, Nigeria firmó acuerdos con la Federación de Rusia para la construcción y explotación de una central nuclear y un centro de investigación nuclear, así como una hoja de ruta para la cooperación en las tecnologías nucleares con fines pacíficos. La Arabia Saudita y Polonia trabajaron en la preparación de licitaciones internacionales, que tienen previsto convocar en 2018. Kenya aún no ha adoptado una decisión sobre el programa de energía nucleoelectrica.

8. Los Estados Miembros siguen sacando provecho de la asistencia prestada por el Organismo en el desarrollo de la infraestructura nuclear nacional necesaria, sobre la base del enfoque de los hitos, que apoya el establecimiento de programas de energía nucleoelectrica sostenibles y tecnológica y físicamente seguros. Esa asistencia comprende exámenes por homólogos y misiones de expertos, cursos de capacitación y herramientas que permiten abordar sistemáticamente las 19 cuestiones relativas a la infraestructura nuclear. Con la misión de Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear (INIR) realizada en Ghana en 2017, el número de misiones INIR llevadas a cabo desde el comienzo del Examen en 2009 aumentó a 22, en 16 Estados Miembros.

### **A.1.2. Países en fase de ampliación**

9. Con 38 reactores nucleares de potencia en funcionamiento y 19 en construcción, China sigue teniendo el programa de expansión más grande, y sus planes incluyen la construcción de 30 reactores en el extranjero de aquí a 2030.

10. El proyecto del reactor EPR de Olkiluoto-3 en Finlandia ha entrado en la fase de puesta en servicio, con los ensayos funcionales en frío ya terminados. Tras los ensayos funcionales de la puesta en servicio activa, la explotación comercial debería comenzar a principios de 2019. El proyecto Hanhikivi-1 sigue en examen para la concesión de la licencia, y el inicio de la construcción está programado para 2019.

11. En marzo de 2017, la Comisión Europea aprobó la construcción de nuevas unidades en la central nuclear Paks II, y en abril de 2017 el Organismo de Energía Atómica de Hungría expidió una licencia ambiental definitiva y una licencia para el emplazamiento de la central.

12. En septiembre de 2017 se instaló el primero de los tres generadores de vapor de la Unidad 2 en la central de Karachi del Pakistán, uno de los dos reactores chinos Hualong 1 que se están construyendo en el emplazamiento (fig. A-2).



*Fig. A-2. Obras de construcción en la Unidad 2 de Karachi (Pakistán), septiembre de 2017.  
(Fotografía: Corporación de Ingeniería Nuclear de China (CNEC))*

13. En marzo comenzaron las obras de construcción no relacionadas con la seguridad en Bushehr-2, en la República Islámica del Irán. Según los planes, la unidad VVER-1000 estará terminada en 2024, y Bushehr-3 en 2026.

14. En los Estados Unidos de América continuó la construcción de los reactores AP1000 en Vogtle 3 y 4, y Westinghouse traspasó la gestión del proyecto a Southern Nuclear; el inicio de la explotación de estas unidades está previsto para 2021 y 2022, respectivamente. La construcción de Summer 2 y 3, que también son reactores AP1000, fue suspendida en julio de 2017 por razones económicas.

15. En mayo, la empresa nuclear estatal de la Argentina, Nucleoeléctrica, firmó acuerdos con la Corporación Nuclear Nacional de China (CNNC) para la construcción de dos nuevos reactores: en 2018 se comenzará a construir un nuevo reactor Candu de 720 MW(e), y en 2020, una unidad Hualong 1 de 1000 MW(e).

16. En agosto, la India firmó contratos con Rosatom para las Unidades 5 y 6 de la central nuclear de Kudankulam, dos reactores de tipo VVER-1000, que se construirán en colaboración con la Nuclear Power Corporation of India.

17. En octubre, el Departamento de Asuntos Ambientales de Sudáfrica otorgó una autorización ambiental para la construcción y explotación de una central nuclear de 4000 MW(e), con la infraestructura correspondiente, en Duynefontein, cerca de la central nuclear operativa de Koeberg.

### **A.1.3. Países con centrales nucleares en funcionamiento**

18. Al final de 2017, el 47 % de los 448 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en el mundo llevaban en servicio entre 30 y 40 años, y otro 17 % llevaba más de 40 años. En un número cada vez mayor de centrales nucleares se están ejecutando programas de gestión del envejecimiento y explotación a largo plazo.

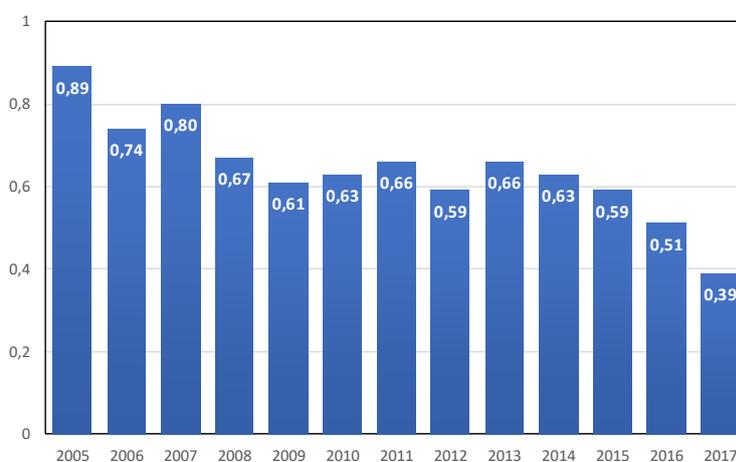
19. A fin de cumplir su estrategia industrial para la explotación segura del parque existente de centrales nucleares por bastante más de 40 años, Électricité de France (EDF) ha puesto en marcha su programa 'Grand Carénage', que entraña una renovación a fondo de las centrales para mejorar su rendimiento y seguridad. La duración prevista de este programa es de diez años. En cuanto a la sustitución de parte del parque existente en Francia, el EPR Flamanville-3 se encuentra en fase de puesta en servicio y ya se han realizado los ensayos funcionales fríos. Tras los ensayos funcionales calientes, la explotación comercial debería comenzar a finales de 2018.

20. La renovación de las licencias de explotación de las centrales nucleares de los Estados Unidos de América es un proceso estable y maduro, y 86 de los 99 reactores poseen ya licencias prorrogadas para funcionar por hasta 60 años. En el marco del mismo proceso de reglamentación utilizado para la renovación de las licencias iniciales, en julio de 2017 la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) de los Estados Unidos publicó documentos de orientación sobre la renovación ulterior de las licencias para la explotación de las centrales por hasta 80 años.

21. Los reactores de las Unidades 5 y 6 de Kozloduy, en Bulgaria, tenían licencias para funcionar hasta 2017 y 2019. En noviembre de 2017, al prorrogar la licencia de la Unidad 5 hasta 2027, el Organismo de Regulación Nuclear de Bulgaria autorizó por primera vez la continuación de la explotación de un reactor nuclear más allá de la fecha prevista en la licencia de explotación inicial.

22. De los 42 reactores del Japón que están en condiciones de operar, cinco han superado hasta la fecha la inspección del cumplimiento de las nuevas normas reglamentarias de seguridad y han sido puestos nuevamente en funcionamiento. Se trata de los reactores Sendai 1 y 2 de Kyushu; Ikata 3 de Shikoku; y Takahama 3 y 4 de Kansai. Otros 20 reactores han solicitado la reanudación de las operaciones.

23. La seguridad operacional de las centrales nucleares continúa siendo alta, como lo demuestran los indicadores de seguridad recopilados por el Organismo y la Asociación Mundial de Operadores Nucleares. La figura A-3 muestra el número de paradas de emergencia o disparos manuales y automáticos no previstos registrados por cada 7000 horas de funcionamiento (aproximadamente un año) por unidad. Las paradas de emergencia son solo uno de los varios indicadores posibles del comportamiento de la seguridad, pero su uso como tal es frecuente.



*Fig. A-3. Tasa media de paradas de emergencia: número de paradas de emergencia automáticas y manuales por cada 7000 horas de funcionamiento de una unidad*

(Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia del OIEA: [www.iaea.org/pris](http://www.iaea.org/pris)).

## A.2. Proyecciones de crecimiento de la energía nucleoelectrica

24. Según las proyecciones elaboradas por el Organismo en 2017 (fig. A-4), en el escenario alto la capacidad nucleoelectrica mundial llegaría a 554 GW(e) en 2030 y a 874 GW(e) en 2050. Esto representaría un aumento del 42 % con respecto a los niveles actuales para 2030, y una duplicación de la capacidad para 2050. En el escenario bajo, la capacidad proyectada muestra una disminución gradual hasta 2040, con una recuperación hasta aproximadamente los niveles actuales para 2050.

25. El amplio rango de estas proyecciones se debe en parte al número considerable de reactores que está previsto retirar del servicio hacia 2030 y en los años siguientes, especialmente en América del Norte y Europa, y a la incertidumbre sobre la construcción de nueva capacidad nuclear para sustituirlos.

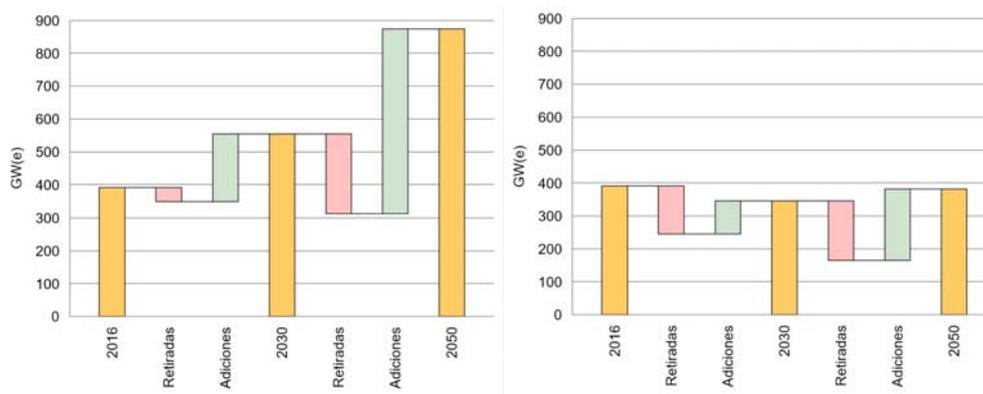


Fig. A-4. Proyecciones alta (izquierda) y baja (derecha) de la capacidad nuclear mundial.  
(Fuente: Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, Colección de Datos de Referencia del OIEA N° 1, edición de 2017).

26. Los escenarios de capacidad alta del OIEA, la Agencia Internacional de Energía (AIE) de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) y la Asociación Nuclear Mundial (WNA) muestran sistemáticamente un crecimiento hasta 500-600 GW(e) para 2030, mientras que los escenarios de capacidad baja denotan mayores incertidumbres con respecto al crecimiento (fig. A-5).

27. La energía nucleoelectrica contribuye de manera importante a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo, a la vez que satisface la creciente demanda de energía de una población en aumento y apoya el desarrollo sostenible. Las centrales nucleares no producen prácticamente emisiones de gases de efecto invernadero ni contaminantes atmosféricos durante la explotación, y las cantidades generadas a lo largo de todo su ciclo de vida son muy bajas. Por consiguiente, el uso de la energía nucleoelectrica evita la emisión de casi 2000 millones de toneladas de dióxido de carbono por año.

28. El Acuerdo de París, ratificado por 171 Estados, pide a los países que mantengan el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales. Los resultados del OIEA, la AIE y la WNA ponen de relieve la necesidad de aumentar el uso de la energía nucleoelectrica a más largo plazo para alcanzar el objetivo de los 2 °C. Sus ventajas para la mitigación del cambio climático y los beneficios que reporta para la seguridad energética, así como en aspectos no climáticos del medio ambiente y en el ámbito socioeconómico, son motivos importantes por los que muchos países, particularmente del mundo en desarrollo, tienen previsto introducir la energía nucleoelectrica en los próximos decenios, o ampliar los programas ya existentes.

29. El Organismo celebró la Conferencia Ministerial Internacional sobre la Energía Nucleoeléctrica en el Siglo XXI en Abu Dhabi del 31 de octubre al 2 de noviembre de 2017. Las declaraciones nacionales y las mesas redondas se centraron en la energía nucleoeléctrica para resolver el “trilema” 3E (energía-economía-ecología), las dificultades para desarrollar la infraestructura nucleoeléctrica, los aspectos de seguridad y fiabilidad de la energía nuclear y las innovaciones y avances en las tecnologías nucleares. En la Conferencia se subrayó que se requeriría un crecimiento sustancial de la energía nucleoeléctrica para que el mundo pudiera cumplir sus objetivos relacionados con el clima y el desarrollo sostenible.

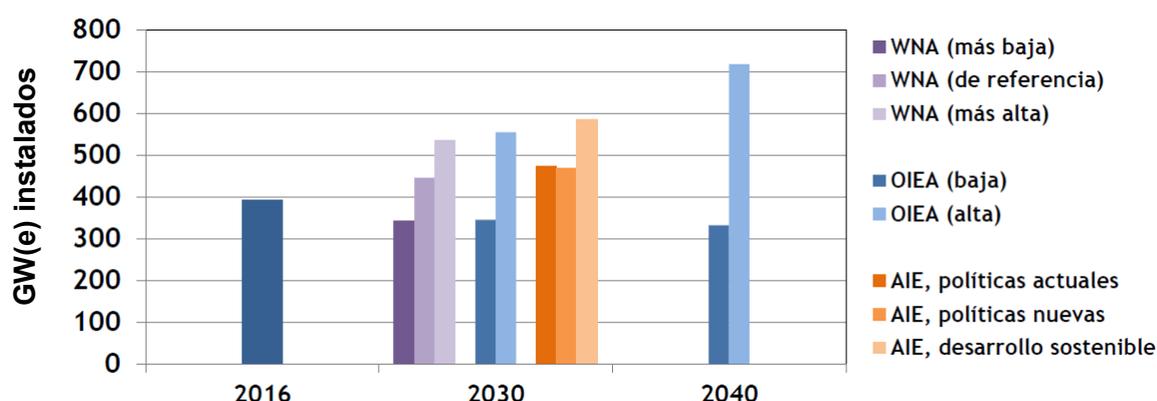


Fig. A-5. Comparación de las proyecciones de la capacidad nucleoeléctrica del OIEA de 2017 con los escenarios de la AIE y las proyecciones de la WNA (las cifras de la AIE se basan en la capacidad bruta).

### A.3. Ciclo del combustible

#### A.3.1. Parte inicial

##### Recursos y producción de uranio

30. Los precios al contado del uranio se mantuvieron bajos en 2017, por lo general entre 42 dólares/kg y 54 dólares/kg. Los bajos precios redujeron considerablemente la capacidad de las empresas de conseguir fondos para la exploración, los estudios de viabilidad y el desarrollo de nuevos proyectos de expansión. Por lo tanto, es probable que la producción mundial de 2017 sea parecida a la de 2016, que se cifró en 63 366 toneladas de uranio (t U), frente a 60 496 t U en 2015.

31. Kazajstán mantuvo su posición de primer productor de uranio del mundo, con una producción procedente casi enteramente de sus minas de lixiviación *in situ*. Tras el rápido aumento de su producción entre 2000 y 2012, Kazajstán produjo 23 800 t U en 2015 y 30 062 t U en 2016, y para 2017 se espera un volumen parecido.

32. En el Canadá, el segundo productor del mundo, se prevé que la capacidad de producción anual de 5000 t U de Cigar Lake (la mina de uranio de más alta calidad del mundo, que inició su producción comercial en mayo de 2015) aumentará a 6900 t U por año para el comienzo de 2018.

33. La mina de uranio de Husab en Namibia inició su producción comercial en 2016, con un volumen de 192 t U por año. Se prevé que este volumen irá aumentando, y la producción a capacidad plena podría ser de 5770 t U por año, con una vida pronosticada de más de 20 años. Las minas de uranio de Rössing y Langer Heinrich de Namibia prosiguieron sus operaciones en 2017. En algunos de los otros yacimientos de uranio de este país continuaron los estudios de viabilidad, a un ritmo moderado.

34. En Australia, la mina de uranio de lixiviación *in situ* de Four Mile produjo aproximadamente 1400 t U anuales. En el proyecto Ranger, la producción de 2016 ascendió a 1994 t U y para 2017 se prevén de 1700 a 2000 t U, frente a unos volúmenes de entre 4000 y 6000 t U anuales entre 1997 y 2009. Según los arreglos actuales, las actividades de extracción y procesamiento deberán cesar en enero de 2020, y la rehabilitación habrá de concluir dentro de los cinco años siguientes. La mina de cobre, uranio, oro y plata de Olympic Dam prosiguió las operaciones convencionales, mientras continuaban los ensayos para la posible lixiviación en pila de una parte de sus menas. En Australia Occidental se hicieron progresos en los estudios y los procesos de aprobación de varios yacimientos de uranio, pero no se han anunciado fechas definitivas para la construcción y la apertura.

35. En Groenlandia (Reino de Dinamarca) se siguió avanzando en los estudios ambientales y de viabilidad y en las aprobaciones para el proyecto de tierras raras, metales comunes y uranio del yacimiento de Kvanefjeld.

36. China siguió apostando fuertemente por el crecimiento nuclear a través de su gasto en actividades de exploración y desarrollo de recursos de uranio tanto a nivel nacional como en el extranjero. Los gastos de desarrollo en el extranjero se mantuvieron altos, debido principalmente al desarrollo de la mina de Husab en Namibia.

37. El proyecto de producción de uranio de Salamanca, en España, se halla en proceso de concesión de licencia, con varios procedimientos legales ya terminados conforme a la reglamentación nacional. La construcción y puesta en servicio de la instalación requerirá la autorización del Gobierno, supeditada al informe del regulador nacional en materia de seguridad nuclear.

38. A principios de 2017, Industrias Nucleares del Brasil (INB) comenzó los trabajos en su mina de Engenho, en el estado de Bahia del Brasil, y declaró que esperaba producir 73 t de concentrado de uranio en el primer año, para alcanzar posteriormente una producción anual de entre 280 y 300 t de concentrado de uranio. Se están realizando los estudios de viabilidad y la labor reglamentaria para una ampliación subterránea o un segundo tajo abierto en la mina ya existente de Caetité.

39. Muchos proyectos de uranio quedaron suspendidos o reducidos a actividades con pocas repercusiones financieras. Algunos que se habían iniciado o que estaban en fases avanzadas de la construcción fueron puestos en estado de servicio y mantenimiento. Un anuncio importante en noviembre de 2017 fue la suspensión de la producción en las explotaciones de McArthur River y Key Lake, en el Canadá, por un período previsto de 10 meses.

### **Conversión y enriquecimiento**

40. La capacidad actual de conversión y enriquecimiento es más que suficiente para satisfacer la demanda, pero el carácter segmentado del mercado, con la producción centrada en unas pocas plantas, es un problema.

41. En octubre de 2017, Centrus Energy y el Laboratorio Nacional de Oak Ridge del Departamento de Energía de los Estados Unidos firmaron un contrato para proseguir sus trabajos conjuntos encaminados a reducir los costos y aumentar la eficiencia de la tecnología de enriquecimiento por centrifugadora de gas AC100.

42. Habiendo superado las pruebas necesarias, y con los importantes ahorros de energía que prometen, las centrifugadoras de gas avanzadas de la ‘generación 9+’ se comenzarán a introducir en la empresa Urals Electrochemical Combine de la Federación de Rusia en Novouralsk, en la región de Sverdlovsk, a partir de 2018.

## **Fabricación de combustible**

43. En el marco de un contrato que entró en vigor en enero de 2017, la sucursal TVEL de Rosatom producirá y suministrará, en 2017 y 2018, conjuntos combustibles para el Reactor Experimental Rápido de China, construido por sus asociados rusos. En septiembre de 2017, TVEL firmó con HAEC CJSC un contrato en virtud del cual suministrará al reactor de 2440 MW de la Unidad 2 de Armenia el combustible nuclear para la siguiente recarga, así como una reserva de combustible para dos años.

44. En enero de 2017, la Compañía de Combustibles Nucleares de Baotou, una sucursal de la CNNC, recibió la aprobación para producir las barras de combustible nuclear del reactor AP1000 de Westinghouse Electric Company. Esto ha permitido a la CNNC completar su línea de producción de barras de combustible y fabricar conjuntos combustibles para los reactores AP1000.

45. Pasando de la línea de producción de prueba a la explotación industrial, la Compañía de Combustibles Nucleares del Norte de China, en Baotou, comenzó en julio de 2017 la producción masiva de elementos combustibles para reactores de alta temperatura refrigerados por gas (HTGR). Ya se han producido 200 000 elementos combustibles esféricos en esta instalación, que tiene una capacidad de 300 000 elementos combustibles esféricos por año, para el reactor HTGR de demostración que se está construyendo en Shidaowan, en la provincia de Shandong.

46. La Autoridad de Reglamentación Nuclear del Japón permitió en abril de 2017 la enmienda del permiso para la fabricación de combustible en la planta de fabricación de combustible Global Nuclear Fuel — Japan (GNF-J) de Yokosuka, prefectura de Kanagawa, que es una de las medidas clave de adecuación a los nuevos requisitos reglamentarios introducidos tras el accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi. GNF-J forma parte de la empresa conjunta de Global Nuclear Fuel con Hitachi y Toshiba dirigida por General Electric Company, que diseña y fabrica combustible para reactores de agua en ebullición.

47. En septiembre de 2017 llegó a la central nuclear de Takahama del Japón, procedente de Francia, un envío de 16 conjuntos combustibles nucleares de mezcla de óxidos (MOX), que se utilizarán en la Unidad 4 en 2018. Nuclear Fuel Industries ha adjudicado a AREVA<sup>2</sup> un contrato para la fabricación de 32 conjuntos combustibles de MOX destinados a las Unidades 3 y 4 de la central de Takahama de la Compañía Eléctrica de Kansai.

48. Cameco, del Canadá, firmó en mayo de 2017 un contrato de prórroga de 10 años para seguir suministrando combustible nuclear a la central de Bruce.

49. En junio de 2017, Westinghouse Electric Company lanzó un combustible a prueba de accidentes, denominado EnCore™, con la esperanza de comenzar a fabricar barras para el ensayo inicial ya en 2018. La empresa señala que el combustible EnCore ofrecerá seguridad ante condiciones que sobrepasen la base de diseño y un uso más eficiente del uranio, lo que ayudará a ahorrar dinero.

50. En agosto de 2017, Westinghouse Electric prorrogó su contrato con la compañía de electricidad estadounidense PSE&G de Nueva Jersey para abastecer de combustible a las dos unidades de la central nuclear de Salem.

51. AREVA y Lightbridge Corporation, una empresa estadounidense de desarrollo de combustible nuclear, acordaron en septiembre de 2017 constituir una empresa conjunta a partes iguales, que comenzaría a funcionar a principios de 2018, para fabricar y comercializar una nueva línea de combustible metálico avanzado para centrales nucleares. Lightbridge ha desarrollado este combustible, que podrá utilizarse tanto en las centrales nucleares ya existentes como en las nuevas que están en

---

<sup>2</sup> En enero de 2018, tras la reestructuración de la industria nuclear francesa, AREVA se dividió en Orano (operaciones de combustible nuclear) y Framatome (operaciones de reactores nucleares).

construcción para mejorar la eficiencia y la seguridad de la explotación. En octubre de 2017, Lightbridge firmó órdenes de trabajo con el Instituto de Tecnología de la Energía (IFE), el explotador del reactor de investigación de Halden, en Noruega, para el diseño y la fabricación de una segunda plataforma de irradiación destinada al ensayo de sus combustibles, un hito en el proceso de comercialización de su tecnología de los combustibles.

52. En febrero de 2017, AREVA pasó a la segunda fase del programa sobre el combustible a prueba de accidentes mejorado del Departamento de Energía de los Estados Unidos, destinado a aumentar la eficiencia y fiabilidad mediante el uso de pastillas dopadas con óxido de cromo y de vainas revestidas con cromo.

53. La Federación de Rusia siguió ensayando los dos nuevos tipos de combustible, el combustible de mezcla regenerada (REMIX) para reactores de agua ligera (LWR) y el combustible de mezcla de nitruros de uranio y plutonio para reactores rápidos.

### **A.3.2. Garantía del suministro**

54. En diciembre de 2010, la Junta de Gobernadores del Organismo aprobó la creación de un banco de uranio poco enriquecido (UPE) del OIEA. En 2015, el Organismo y Kazajstán finalizaron el marco jurídico básico para el establecimiento del Banco de UPE del OIEA en el emplazamiento de la Planta Metalúrgica de Ulba en Ust-Kamenogorsk. Se han firmado acuerdos de tránsito con la Federación de Rusia y China, y se está avanzando en la negociación de contratos de transporte con las organizaciones autorizadas de estos dos países y de Kazajstán.

55. El Plan de Actividades Específicas está llegando a su fin, tras haber abordado cuestiones relacionadas, entre otras cosas, con la seguridad tecnológica y física del emplazamiento. En el verano de 2017 concluyó la construcción de la Instalación de Almacenamiento de UPE del OIEA en Kazajstán. Una misión del Organismo realizada en agosto de 2017 confirmó que la construcción, la puesta en servicio y la preparación para la explotación de la Instalación de Almacenamiento de UPE del OIEA fueran conformes con las normas de seguridad y las orientaciones sobre seguridad física del Organismo, y que se hubieran adoptado las medidas adecuadas para garantizar la protección de los trabajadores, el público y el medio ambiente durante toda la explotación. La instalación fue inaugurada el 29 de agosto de 2017.

56. También se ha avanzado en la finalización de un Programa de Gestión de Cilindros que garantizará la seguridad tecnológica y física a largo plazo de los cilindros *in situ* y en su transporte ulterior. En un ensayo piloto realizado en abril de 2017 se simuló las pruebas para la recertificación de los cilindros de conformidad con la norma ISO pertinente, que se publicará en el futuro próximo, y los resultados de este ensayo se tendrán en cuenta en la versión definitiva del Programa de Gestión de Cilindros. La solicitud de propuestas para la adquisición de UPE se publicó en noviembre de 2017.

57. En el *Examen de la Tecnología Nuclear de 2012* (documento GC(56)/INF/3) se describen otros mecanismos que se han establecido para la garantía del suministro.

### **A.3.3. Parte final**

#### **Gestión del combustible gastado**

58. Hasta la fecha se han descargado de las centrales nucleares unas 400 000 toneladas de metal pesado. Actualmente se reprocesa alrededor del 25 % del combustible descargado, y se espera que esta proporción aumente al 30 % para 2020. Hay 151 instalaciones de almacenamiento en seco de combustible gastado situadas fuera del emplazamiento de los reactores, en 27 países.

59. En 2017, dos países firmaron contratos para la construcción de nuevas instalaciones de almacenamiento en seco fuera del emplazamiento de los reactores: Eslovenia, para el combustible gastado de la central nuclear de Krško, y el Brasil, para el de las centrales Angra 1 y 2. La central de Krško se está adaptando para que cumpla los requisitos más estrictos respecto de los terremotos y las inundaciones graves previstos en las orientaciones de seguridad que se impartieron después del accidente de Fukushima.
60. La instalación de almacenamiento en seco de Sizewell B, en el Reino Unido, diseñada para 100 años de almacenamiento, recibió sus primeros cofres de combustible cargados en 2017.
61. En Hungría, la instalación modular de almacenamiento en seco en cámaras de la central nuclear Paks, que tenía capacidad para 9308 conjuntos combustibles en 20 cámaras, fue ampliada en 2017 con la construcción de otras cuatro cámaras.
62. La instalación de almacenamiento provisional ISF-2 de la central nuclear de Chernóbil en Ucrania, que comprende una planta de corte/embalaje de combustible y módulos de almacenamiento de combustible gastado, está siendo sometida a las pruebas de puesta en servicio para las operaciones de corte del combustible de los reactores RBMK. En 2017 se concedió el permiso reglamentario para la construcción de una nueva instalación centralizada de almacenamiento en seco del combustible de los reactores de potencia en la Zona de Exclusión de Chernóbil, y el comienzo de las operaciones está programado para 2019.
63. En 2017 se comunicaron varias innovaciones en el sector. Entre ellas cabe mencionar el granallado por láser de los contenedores de almacenamiento en seco soldados para atenuar la posibilidad de fisuración por tensocorrosión y el desarrollo de módulos de almacenamiento en seco compactos que facilitan la inspección de los contenedores almacenados.
64. En cuanto al reprocesamiento y reciclado del combustible gastado, Francia aumentó la variedad de combustibles gastados de LWR que se tratarán en La Hague. La Federación de Rusia también siguió aumentando la variedad de combustibles que se pueden reprocesar en la planta RT-1 de Mayak Chemical Combine, en Ozersk. A este respecto, la planta RT-1 fue modernizada en 2017 para poder reprocesar en ella 20 t de combustible de reactores VVER-1000.
65. La Autoridad de Clausura de Instalaciones Nucleares del Reino Unido anunció en marzo de 2017 que la planta de reprocesamiento de óxido térmico (THORP) dejará de funcionar hacia noviembre de 2018. Desde 1994, se han reprocesado en esta planta alrededor de 9500 t de combustible de óxido.
66. En agosto de 2017, el Centro de Investigaciones Atómicas Indira Gandhi de la India adjudicó a Hindustan Construction Co el contrato para la construcción de la instalación del ciclo del combustible de los reactores rápidos en Kalpakkam en los próximos cuatro años. En el Instituto de Investigación sobre Reactores Atómicos (RIAR) de la Federación de Rusia se está construyendo actualmente una instalación de investigación radioquímica multifuncional. Rosatom anunció en mayo que esta instalación se afiliaría al Centro Internacional de Investigación para el ensayo de tecnologías con el fin de cerrar el ciclo del combustible de los reactores rápidos.
67. En agosto de 2017 llegó por tren a la planta Mayak, para su procesamiento, la primera carga de combustible gastado procedente de la instalación de almacenamiento de la Flota Norte de la Federación de Rusia, en la Bahía de Andreeva (a 3000 km de distancia). Se estima que se requerirán unos 50 envíos por tren para transportar los 22 000 elementos combustibles gastados de submarinos nucleares a Mayak, y que el procesamiento en esta planta llevará entre 5 y 10 años.

### A.3.4. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de los desechos radiactivos

#### Clausura de instalaciones nucleares

68. En el mundo hay 164 reactores de potencia que están en régimen de parada o en proceso de clausura. De ellos, 17 están totalmente clausurados, y varios otros están llegando a las etapas finales de la clausura. Más de 150 instalaciones del ciclo del combustible están en régimen de parada definitiva o en proceso de clausura, y alrededor de 125 están ya clausuradas. Más de 180 reactores de investigación están en régimen de parada o en proceso de clausura, y más de 300 reactores de investigación y conjuntos críticos están ya completamente clausurados.

69. La labor de investigación y desarrollo (I+D), principalmente de los países con grandes programas de energía nucleoelectrónica, como Bélgica, España, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, el Japón, el Reino Unido y la República de Corea, está produciendo mejoras continuas. En abril de 2017, el Organismo de Energía Atómica del Japón abrió el nuevo centro de investigación de los Laboratorios Colaborativos de Ciencia Avanzada para la Clausura (CLADS) en Tomioka, en la prefectura de Fukushima. El Edificio de Investigación Colaborativa Internacional de Tomioka será la instalación central de los CLADS para el trabajo de I+D de las instituciones nacionales e internacionales. En 2017, AREVA de Francia concluyó el desmantelamiento, mediante tecnología láser, de un evaporador de productos de fisión de una planta de reprocesamiento.

70. En 2017 se revisaron la Hoja de ruta a medio y largo plazo y el Plan Técnico Estratégico para la clausura de la central nuclear de Fukushima Daiichi. El agua contaminada que se genera por el agua subterránea que entra en los edificios de los reactores y se mezcla con el agua estancada utilizada para enfriar los restos de combustible sigue siendo un gran problema, y se trata empleando un sistema de eliminación de nucleidos. Desde 2016 se vienen instalando tuberías de congelación en los muros impermeables del lado de la tierra para bloquear el agua subterránea, y en agosto de 2017 comenzó la congelación de la última sección del muro.

71. En Bulgaria, Eslovaquia (fig. A-6), Lituania y Ucrania se están haciendo progresos notables en los proyectos de clausura de centrales nucleares, con el apoyo del Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo.



*Fig. A-6. Demolición de las torres de refrigeración de la central nuclear de Bohunice V1, Eslovaquia, octubre de 2017. (Fotografía: JAVYS)*

#### Rehabilitación

72. El Japón informó regularmente sobre los progresos realizados en la descontaminación fuera del emplazamiento. Al final de marzo de 2017, habían concluido los trabajos de descontaminación en áreas enteras de la Zona Especial de Descontaminación, en un radio de 20 km alrededor de la central nuclear de Fukushima Daiichi, y también en las áreas en que la tasa de dosis anual efectiva adicional se había calculado en más de 20 mSv para el primer año después del accidente. Con respecto a la Zona de Estudio Intensivo de la Contaminación, donde la tasa de dosis en aire superaba los 0,23  $\mu\text{Sv/h}$  (equivalentes a más de 1 mSv/año de dosis adicional en ciertas condiciones), la labor de descontaminación había concluido en 89 municipios y en los 3 restantes terminaría a finales de marzo de 2018.

### **Gestión de las fuentes radiactivas selladas en desuso**

73. En varios Estados Miembros se siguieron apoyando las opciones para la gestión de las fuentes radiactivas selladas en desuso al término de su vida útil. Ghana y Malasia avanzaron en sus proyectos de disposición final en pozos barrenados, y varios otros países expresaron interés en el posible uso de esta forma de disposición final. El desarrollo y mantenimiento de un inventario sigue siendo una prioridad en varios Estados Miembros.

74. En 2017 se iniciaron proyectos de retirada de fuentes de actividad alta, con apoyo de donantes, en Albania, Bolivia, el Ecuador, la ex República Yugoslava de Macedonia, el Líbano, el Paraguay, el Perú, Túnez y el Uruguay, y su conclusión está prevista para 2018. En Liberia se retiró una fuente radiactiva sellada en desuso de actividad alta de un hospital y se trasladó a un lugar de almacenamiento seguro.

75. En varios Estados Miembros, entre ellos Ghana, Honduras y Malasia, concluyeron las operaciones de acondicionamiento de fuentes radiactivas selladas en desuso de las categorías 3 a 5. Durante estas operaciones se impartió capacitación a los operadores encargados de los desechos y al personal de reglamentación, reforzando su capacidad de gestionar las fuentes radiactivas selladas en desuso en condiciones de seguridad.

76. Se han hecho progresos importantes en la incorporación de una celda caliente móvil en el sistema de disposición final en pozos barrenados, lo que reducirá al mínimo la manipulación de las fuentes de actividad alta y eliminará el transporte innecesario. En septiembre de 2017 se hizo una demostración de esta incorporación en Sudáfrica. Además, se siguió avanzando en la preparación de un conjunto móvil de herramientas para apoyar las operaciones de acondicionamiento de las fuentes radiactivas selladas en desuso de las categorías 3 a 5. A comienzos de 2018 está previsto capacitar a los Estados Miembros en su uso.

77. Varios Estados Miembros participaron en el proceso de diseño y evaluación inicial de centros técnicos cualificados, una iniciativa de asistencia en la gestión de las fuentes radiactivas selladas en desuso puesta en marcha por el Organismo en 2017.

### **Gestión previa a la disposición final de desechos radiactivos**

78. Sellafield Ltd anunció en febrero de 2017 que el primer bidón de 500 litros de lodos radiactivos (compuestos por algas, productos de corrosión y materiales transportados por el viento) de la Piscina de Almacenamiento de Combustible de las Pilas de Sellafield había sido cementado en la planta de encapsulamiento de su emplazamiento y que el cuerpo de desechos inmovilizado estaba listo para la disposición final a largo plazo. Sellafield Ltd indicó que el proyecto de retirada de lodos estaba consiguiendo sus objetivos diez años antes de lo programado, y por la mitad del costo previsto de 200 millones de libras esterlinas (249 millones de dólares).

79. En el emplazamiento de Idaho del Departamento de Energía de los Estados Unidos, un supercompactador especial capaz de ejercer una presión de 1800 toneladas para comprimir bidones de 200 litros llenos de desechos lleva más de 100 000 horas de funcionamiento. En los últimos 14 años ha compactado más de 238 000 bidones de desechos, permitiendo ahorrar, según las estimaciones, unos 6000 envíos por camión que habrían sido necesarios para transportar los casi 43 000 metros cúbicos de desechos a la Planta Piloto de Aislamiento de Desechos (WIPP).

80. En la central nuclear de Bradwell, en el Reino Unido, Magnox Ltd y sus sucursales consiguieron retirar un total de 65 toneladas de restos de elementos combustibles utilizando técnicas de procesamiento innovadoras. Tras su reclasificación, los desechos sólidos fueron colocados en el repositorio de desechos de actividad baja (LLW).

81. En la Instalación de Tratamiento de Desechos de Actividad Baja de Hanford, en los Estados Unidos de América, se instaló el primero de dos hornos de fundición de 300 toneladas. El Laboratorio Nacional del Pacífico Noroeste desarrolló un algoritmo matemático de formulación de vidrios de desechos de actividad alta (HLW) para su horno de fundición a fin de lograr la mezcla óptima de desechos y aditivos en cada lote de HLW que se vitrifique.

82. Investigadores del Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas (BARC) anunciaron la fabricación de 'lápices' vitrificados de cesio 137 a partir de desechos radiactivos. Esta fuente sellada, con un período de semidesintegración de 30 años, podría reemplazar las fuentes de cobalto 60 (que tienen un período de semidesintegración más breve, de 5,3 años) utilizadas actualmente para la irradiación de los alimentos, la braquiterapia y la esterilización de equipo médico.

83. El proyecto para establecer una instalación de tratamiento capaz de absorber 10 000 metros cúbicos de desechos radiactivos sólidos en la Bahía de Sayda, en el norte de Rusia, ha superado la evaluación del impacto ambiental del Estado; la instalación acondicionará y gestionará este tipo de desechos radiactivos bajo los auspicios de SevRAO, la empresa que se encarga de los desechos nucleares en Rusia noroccidental.

84. La Inspección Federal de Seguridad Nuclear de Suiza aprobó la construcción de la instalación de almacenamiento provisional de desechos de actividad baja e intermedia (LILW) en el Instituto Paul Scherrer. El edificio 'Stapelplatz Ost' que está previsto construir en Würenlingen almacenará los desechos procedentes de las aplicaciones médicas e industriales que utilizan radioisótopos hasta que esté disponible un repositorio geológico profundo.

85. Investigadores de la Corporación General de Energía Nucleoeléctrica de China y la Universidad de Tsinghua desarrollaron conjuntamente un sistema de irradiación con haces de electrones para tratar las aguas residuales industriales. Irradiando el efluente con haces de electrones, es posible reducir más de 70 sustancias químicas complejas a moléculas más pequeñas que se pueden tratar y eliminar con procesos biológicos normales.

### **Disposición final de desechos radiactivos**

86. En todo el mundo hay instalaciones de disposición final en funcionamiento para todas las categorías de desechos radiactivos, salvo los desechos de actividad alta y/o el combustible gastado (declarado como desecho). Entre ellas se cuentan las instalaciones de disposición final en zanjas para desechos de actividad muy baja (p. ej., en España, los Estados Unidos de América, Francia y Suecia) o para desechos de actividad baja en zonas áridas (p. ej., en los Estados Unidos de América y Sudáfrica); las estructuras artificiales cerca de la superficie para desechos de actividad baja (p. ej., en China, Eslovaquia, España, Francia, Hungría, la India, el Japón, Polonia, el Reino Unido y la República Checa); y las estructuras artificiales para desechos de actividad baja e intermedia situadas en formaciones geológicas a diversas profundidades (p. ej., en Alemania, los Estados Unidos de América, Finlandia, Hungría, Noruega, la República Checa y la República de Corea). Otras instalaciones de disposición final para desechos de actividad baja e intermedia, como las de Alemania, Bélgica, Bulgaria, el Canadá, Eslovenia, Lituania, la República Islámica del Irán y Rumania, se encuentran en diferentes fases de la concesión de licencias o la construcción. Las opciones consideradas para la disposición final de los desechos de materiales radiactivos naturales varían según la reglamentación nacional.

87. El programa de disposición final del combustible gastado del Canadá avanzó en 2017 en el proceso de selección del emplazamiento de una instalación de disposición final geológica profunda, en el que aún quedan 7 de las 22 comunidades inicialmente interesadas. Con respecto a la solicitud de licencia para la instalación de disposición final geológica de desechos de actividad baja e intermedia en Kincardine, el Ministerio de Medio Ambiente y Cambio Climático pidió información adicional sobre la declaración del impacto ambiental presentada por Ontario Power Generation, para su examen más a fondo por el Organismo de Evaluación Ambiental del Canadá.

88. En China prosigue el programa de disposición final geológica para las futuras existencias de desechos de actividad alta vitrificados, con la investigación de emplazamientos en formaciones tanto cristalinas como sedimentarias. Actualmente se están considerando los planes de construcción de una instalación subterránea de investigación en la formación rocosa cristalina de la zona de Beishan, y nuevos reconocimientos de emplazamientos en la superficie en una formación sedimentaria del interior de Mongolia.

89. La organización Posiva de Finlandia, que está construyendo en Olkiluoto la primera instalación de disposición final geológica profunda de combustible nuclear gastado del mundo, examinó las novedades tecnológicas y operacionales, como los ensayos completos de los sistemas *in situ* y nuevas pruebas de construcción y funcionamiento, para preparar la puesta en servicio en frío y activa, con miras a obtener la licencia de explotación.

90. La organización francesa de gestión de desechos radiactivos Andra siguió aplicando avances tecnológicos, con demostradores y experimentos científicos *in situ*, a fin de que la solicitud de licencia para la instalación de disposición final geológica profunda que prevé construir tenga una base científica y técnica robusta.

91. En marzo de 2017, el Parlamento alemán enmendó la ley sobre la selección de emplazamientos para la disposición final geológica, siguiendo las recomendaciones de su Comisión sobre el Almacenamiento de Desechos de Actividad Alta, que, entre otras cosas, propugnaban que las decisiones sobre la selección del emplazamiento se basaran en criterios importantes para la seguridad y que se velara por una amplia participación de los interesados. También en 2017, en virtud de la ley sobre las obligaciones relativas a la parte final del ciclo nuclear, los explotadores de centrales nucleares transfirieron 24 100 millones de euros al fondo nacional para la financiación de la disposición final de los desechos nucleares, traspasando así toda la responsabilidad del almacenamiento y la disposición final al Estado. Los explotadores siguen siendo responsables de las actividades de clausura y de tratamiento y acondicionamiento de los desechos.

92. En julio de 2017, el Ministerio de Economía, Comercio e Industria del Japón publicó un mapa de las características científicas del territorio nacional de interés para la disposición final geológica, como una primera medida para llegar a una disposición final definitiva.

93. El Operador Nacional para la Gestión de los Desechos Radiactivos de la Federación de Rusia comenzó a explotar su primera instalación de disposición final de desechos de actividad baja cerca de la superficie en Novouralsk, en la región de Sverdlovsk. Esta es la primera de varias instalaciones de este tipo con las que está previsto resolver el problema de los desechos radiactivos heredados del pasado en el país.

94. En octubre concluyó el proceso relativo a la autorización ambiental de la solicitud de la licencia de construcción de SKB para la disposición final geológica de combustible gastado ante el Tribunal de Tierras y Medio Ambiente de Suecia, que presentará sus conclusiones al Gobierno. La Municipalidad de Oskarshamn, la Autoridad Sueca de Seguridad Radiológica y otras autoridades reiteraron que estaban a favor de la concesión del permiso en virtud del Código Ambiental, mientras que la Municipalidad de Östhammar dará su respuesta definitiva después de un referéndum.

95. La organización que gestiona los desechos radiactivos en Suiza, Nagra, presentó solicitudes para seguir investigando las propiedades geológicas e hidrogeológicas de las formaciones rocosas subterráneas en la región de Nördlich Lägern donde se seleccionará el emplazamiento para el programa del repositorio geológico.

96. En los Estados Unidos de América, los avances en la recuperación después del accidente en la instalación de disposición final geológica WIPP para los desechos transuránicos de actividad baja e intermedia permitieron reanudar las operaciones en abril de 2017, aunque a un ritmo de colocación menor que el de antes del accidente de 2014.

## B. Fisión avanzada y fusión

### B.1. Fisión avanzada

97. La energía nucleoelectrónica es una tecnología probada y madura, que ayuda a mejorar la seguridad energética, reduce el impacto de la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles, aumenta la competitividad de las economías y emite muchos menos gases de efecto invernadero y otros contaminantes que los combustibles fósiles. Como en cualquier otro sector industrial, la I+D y la innovación continua de las tecnologías<sup>3</sup> son esenciales para que la energía nucleoelectrónica siga siendo competitiva y una opción atractiva incluso en un entorno empresarial cambiante, también para los países en fase de incorporación al ámbito nuclear.

#### B.1.1. Reactores refrigerados por agua

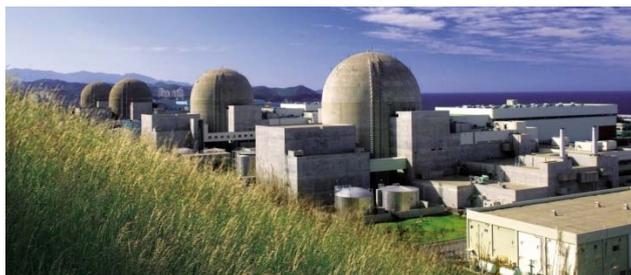
98. Los reactores refrigerados por agua (WCR) desempeñan un papel fundamental en la industria nuclear, con más de 17 000 años-reactor de explotación comercial. Más del 95 % de todos los reactores de potencia civiles en funcionamiento en el mundo, y 56 de los 58 que están en construcción, se refrigeran con agua ligera o pesada. En 2017 se conectaron a la red tres nuevos reactores refrigerados por agua, en China y el Pakistán, y se inició la construcción de dos unidades, en la India y la República de Corea (fig. B-1). La mayoría de los países en fase de incorporación comienzan con reactores refrigerados por agua, como en el caso de Belarús y los Emiratos Árabes Unidos. La sexta Conferencia Internacional sobre Cuestiones de Actualidad en la Seguridad de las Instalaciones Nucleares, celebrada por el Organismo en junio de 2017, se centró en la demostración de la seguridad de las centrales nucleares avanzadas refrigeradas por agua, incluidos los reactores pequeños y medianos o modulares.

99. La mayoría de los reactores refrigerados por agua avanzados tienen una mayor potencia de salida. Los de construcción reciente producen entre 1000 y 1700 MW por unidad, y los diseños evolutivos prometen nuevos aumentos. Se observa una clara tendencia a favor de los emplazamientos con varias unidades de un mismo tipo o de tipos diferentes de reactor, que propician las economías de escala. En varios países se están también considerando, estudiando y construyendo versiones avanzadas de los reactores refrigerados por agua existentes para el despliegue gradual de ciclos del combustible más eficientes y parcial o totalmente cerrados. La India está haciendo progresos en su estrategia en tres fases para la generación de energía nuclear a partir del torio, con reactores de agua pesada (HWR), reactores rápidos y sus HWR con un ciclo del combustible de Th/<sup>233</sup>U. China tiene un reactor CANDU en explotación que funciona enteramente con una mezcla, equivalente al uranio natural, de combustible gastado de reactores de agua ligera (LWR) y colas de uranio empobrecido.

100. Varios Estados Miembros están realizando actividades de I+D de reactores supercríticos refrigerados por agua (SCWR). Se ha ultimado el diseño conceptual del SCWR del Canadá, un concepto de reactor de tubos de presión moderado por agua pesada, y del CSR1000 de China. En Europa se creó el concepto de un reactor de agua ligera europeo de alto rendimiento y, en colaboración con China, se planificó, diseñó y analizó una instalación de pruebas de cualificación del combustible en caliente. En la Federación de Rusia están en curso los estudios conceptuales de un reactor de potencia refrigerado y moderado por agua (VVER) innovador, con parámetros supercríticos del agua de refrigeración, incluida la posibilidad de un núcleo de espectro rápido.

---

<sup>3</sup> En el Sistema de Información sobre Reactores Avanzados (ARIS) del Organismo puede obtenerse más información al respecto: <https://aris.iaea.org>.



*Fig. B-1. La central nuclear Hanul (antes denominada de Ulchin) de la República de Corea tiene seis unidades en explotación y dos más en construcción. (Fotografía: KHNP)*

### **B.1.2. Sistemas de neutrones rápidos**

101. Desde 1960 se vienen realizando en todo el mundo importantes programas de desarrollo de reactores rápidos. En la tercera Conferencia Internacional sobre Reactores Rápidos y Ciclos del Combustible Conexos: Sistemas Nucleares de la Próxima Generación para el Desarrollo Sostenible, celebrada en junio de 2017 en Ekaterimburgo (Federación de Rusia), se llegó a la conclusión de que un ciclo cerrado del combustible nuclear basado en reactores rápidos puede ofrecer energía limpia, eficiente, segura y sostenible por muchas generaciones, con especiales ventajas en lo que respecta a la preservación de los recursos y a la gestión de los desechos nucleares de actividad alta y período largo. A nivel nacional e internacional se están desarrollando diversos reactores rápidos innovadores refrigerados por sodio (SFR), por plomo y por una mezcla eutéctica de plomo-bismuto (LFR) y por gas (GFR). Además, como opción a largo plazo se está desarrollando también el reactor rápido de sales fundidas (MSR).

102. La tecnología de reactores rápidos más madura, la que utiliza la refrigeración por sodio, tiene más de 420 años-reactor de experiencia adquirida a través del diseño, la construcción y la explotación de unidades experimentales, prototípicas, de demostración y comerciales en varios países, entre ellos Alemania, China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, la India, el Japón y el Reino Unido.

103. El reactor rápido refrigerado por sodio de la Federación de Rusia, BN-800, entró en la etapa de explotación comercial en octubre de 2016 (fig. B-2). El SFR de investigación polivalente, MBIR, que sustituirá al reactor experimental BOR-60 en 2020, está en construcción, y en 2017 se produjo la vasija del reactor. Con respecto a la tecnología de los metales líquidos pesados, el BREST-OD-300 refrigerado por plomo se encuentra en el procedimiento de obtención de la licencia.



*Fig. B-2. El reactor rápido refrigerado por sodio BN-800 entró en la etapa de explotación comercial el 31 de octubre de 2016. (Fotografías: Rosenergoatom)*

104. En la India ha concluido la construcción del prototipo de reactor reproductor rápido de 500 MW(e), y la primera criticidad está programada para 2018. Hay otros dos reactores reproductores rápidos previstos para el mismo emplazamiento.

105. El CLEAR-1 de China que utiliza plomo y que se encuentra en la fase del diseño de ingeniería, fue seleccionado en 2017 como referencia para el desarrollo de sistemas accionados por aceleradores y de reactores rápidos. El innovador CFR-600 está en la fase del diseño de ingeniería y, según los planes, comenzaría a funcionar en 2025.

106. En diciembre de 2016, el Gobierno del Japón decidió clausurar el prototipo de reactor rápido refrigerado por sodio Monju, que estaba en régimen de parada a largo plazo. Proseguirá el desarrollo del tipo innovador de reactor refrigerado por sodio JSFR, ya que la tecnología de los reactores rápidos se considera vital para la futura canasta energética del Japón.

107. En Europa, el Gobierno francés autorizó la continuación de la fase de diseño básico del prototipo de reactor rápido refrigerado por sodio para demostración industrial ASTRID hasta el final de 2019. En Bélgica se está estudiando la construcción de MYRRHA, un reactor refrigerado por una mezcla de plomo y bismuto que puede funcionar en modo crítico y subcrítico como sistema accionado por acelerador; el objetivo es que su primera instalación de I+D esté disponible antes del final de 2024. El Reactor Sueco Avanzado Refrigerado por Plomo (SEALER) está en la fase previa a la concesión de la licencia por la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear. El objetivo es iniciar la construcción de este reactor de “batería” de 3 a 10 MW(e), diseñado para la producción comercial de electricidad en las comunidades árticas y las operaciones mineras, a finales de 2021, y poner en servicio la unidad de demostración en 2025. Otros conceptos que se están desarrollando son ALFRED, la demostración europea de un reactor rápido refrigerado por plomo de la Generación IV, y ALLEGRO, un reactor rápido refrigerado por gas de carácter experimental.

108. En los Estados Unidos de América, TerraPower ha terminado el diseño conceptual fundamental del reactor de onda progresiva de “reproducción y quema” y está desarrollando un reactor de sales fundidas. Westinghouse está desarrollando un reactor modular pequeño innovador, refrigerado por plomo, de 450 MW(e).

### **B.1.3. Reactores refrigerados por gas**

109. El Reino Unido sigue explotando comercialmente 14 reactores avanzados refrigerados por gas y está realizando estudios para la prolongación de su vida útil. Muchos Estados Miembros están desarrollando pequeños reactores modulares de alta temperatura refrigerados por gas con características de seguridad inherente que eliminan la necesidad de la mayoría de los sistemas de seguridad activa. Con su combustible de partículas revestidas, el helio como refrigerante y un funcionamiento a altas temperaturas ( $\geq 700$  °C), un reactor modular de alta temperatura refrigerado por gas aumentaría la eficiencia y abastecería el mercado de calor industrial.

110. En China ha concluido la construcción del reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura (HTR-PM). Se prevé que la central de demostración industrial de 200 MW(e), con dos reactores de 250 MW(t), entrará en funcionamiento en 2018. Se han instalado las vasijas de presión de los reactores, y en una de las unidades se han cargado los componentes internos del núcleo y las esferas de grafito (que forman parte del núcleo de arranque). Se está diseñando una central comercial de 600 MW(e) y están en curso los estudios de viabilidad de cinco emplazamientos posibles. La planta de fabricación de combustible de bolas a escala comercial de Baotou inició la producción en 2016.

111. La Arabia Saudita definió el despliegue futuro de reactores de alta temperatura refrigerados por gas en su Proyecto Nacional de Energía Atómica. Se ha firmado un memorando de entendimiento con China para establecer una asociación estratégica a largo plazo con vistas a localizar la tecnología y tener su propiedad. En 2017 concluyó un estudio de viabilidad conjunto que incluye aplicaciones del calor industrial en el sector petroquímico.

112. En septiembre de 2017, el Ministro de Energía de Polonia aceptó el informe de un comité consultivo que abogaba por el despliegue de reactores de alta temperatura refrigerados por gas, que sustituirían también más de 6500 MW de calor industrial obtenidos actualmente a partir de hidrocarburos. El plan comprende la acogida del reactor experimental europeo de alta temperatura de ~10 MW(t) para facilitar el desarrollo de nueva tecnología y recursos humanos.

113. Tras recibir una licencia inicial para el emplazamiento de su reactor de potencia experimental de lecho de bolas de 10 MW(t), la Agencia Nacional de Energía Nuclear de Indonesia está intentando conseguir fondos para la construcción.

114. En el Japón se están esperando los resultados del examen reglamentario para poner nuevamente en marcha el reactor experimental de alta temperatura (HTTR) de 30 MW(t), a fin de realizar nuevas pruebas de demostración de la tecnología y la seguridad.

115. En los Estados Unidos de América, las actividades se centran en la cualificación del combustible isotrópico triestructural de partículas revestidas, para su despliegue futuro. Se han hecho avances en el establecimiento de un nuevo marco de concesión de licencias para los reactores avanzados, específicamente para los reactores de alta temperatura refrigerados por gas.

116. Las actividades relacionadas con los reactores de alta temperatura refrigerados por gas prosiguen en la Comisión Europea con el programa GEMINI+, en Sudáfrica con la labor de I+D de un nuevo reactor avanzado de alta temperatura de lecho de bolas, y en la República de Corea y la Federación de Rusia con el desarrollo y mantenimiento de tecnologías clave. Tres proyectos coordinados de investigación del Organismo se están ocupando de la incertidumbre de los análisis, la elaboración de criterios de diseño de seguridad y la aplicación del calor generado por los reactores de alta temperatura refrigerados por gas para un proceso de extracción de minerales más limpio y sostenible.

#### **B.1.4. Reactores pequeños y medianos o modulares**

117. Muchos Estados Miembros están mostrando un interés creciente en los reactores pequeños y medianos o modulares (SMR). Los componentes y sistemas de estos reactores de la generación más nueva de hasta 300 MW(e) de potencia pueden producirse en una fábrica e instalarse en los emplazamientos como módulos. Concebidos para mercados de energía o electricidad especializados en que el uso de reactores grandes no sería viable, los SMR pueden satisfacer la necesidad de una generación flexible de energía eléctrica para una amplia gama de usuarios y aplicaciones, por ejemplo para sustituir las centrales eléctricas a base de combustibles fósiles que vayan envejeciendo, abastecer de energía a los países con redes de electricidad pequeñas y zonas remotas y no conectadas a la red, y crear sistemas híbridos de energía nuclear y renovable. También se adaptan mejor a un uso parcial o específico en aplicaciones no eléctricas, como la generación de calor para procesos industriales, la producción de hidrógeno y la desalación de agua de mar. Aunque los reactores pequeños y medianos o modulares prometen tener características de seguridad mejoradas y ser más asequibles, estas propiedades aún no están completamente demostradas.

118. Hay más de 50 diseños de reactores pequeños y medianos o modulares en desarrollo, de todos los tipos principales de reactor, y tres de ellos se encuentran en fases avanzadas de la construcción: el CAREM-25 de 27 MW(e) de la Argentina (un prototipo del reactor de agua a presión CAREM de diseño integrado de 150-300 MW(e)) (fig. B-3), cuya puesta en marcha y en servicio está programada para 2019; el reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura (HTR-PM) de China, que según los planes entrará en funcionamiento en 2018; y una central nuclear montada en una plataforma flotante en la Federación de Rusia, con dos módulos del reactor de agua a presión KLT-40S de 35 MW(e), que se pondrán en marcha y en servicio en 2018.



*Fig. B-3. Reactor CAREM-25 en construcción (izquierda); configuración final de la central (derecha).  
(Fotografías: CNEA, Argentina)*

119. La Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear ha recibido ya diez solicitudes de exámenes de diseños presentadas por proveedores en el proceso previo a la concesión de la licencia, y los Laboratorios Nucleares Canadienses han manifestado su interés en acoger reactores pequeños y medianos o modulares de demostración. Un informe sobre la estrategia a largo plazo publicado en 2017 menciona el objetivo de instalar un nuevo SMR en Chalk River para 2026.

120. En 2018 está previsto iniciar la construcción de la primera planta de demostración industrial con dos módulos ACP100 de la Corporación Nuclear Nacional de China en el emplazamiento de la central nuclear de Changjiang en Hainan. El Grupo General de Energía Nucleoeléctrica de China ha comenzado a fabricar sistemas y componentes para el ACPR50S, un reactor que se instalará en plataformas flotantes en el mar; la conexión a la red está prevista para 2022. El Instituto de Investigación y Diseño de Ingeniería Nuclear de Shanghai ha terminado la etapa del diseño conceptual de sus reactores CAP150 y CAP200.

121. En Francia, un consorcio encabezado por Électricité de France (EDF), que incluye a la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas (CEA), Naval Group y TechnicAtome, está desarrollando un SMR terrestre de tipo PWR integrado de 150-170 MW(e). Naval Group prosiguió también el desarrollo de Flexblue, un reactor de agua a presión submarino y transportable de 160 MW(e).

122. La Ciudad Rey Abdullah para las Energías Atómicas y Renovables ha adquirido la copropiedad del diseño del reactor SMART de 100 MW(e) del Instituto de Investigaciones sobre Energía Atómica de Corea (KAERI), tras un acuerdo concertado en 2015 para el despliegue de dos unidades en la Arabia Saudita. La Comisión de Energía Atómica de Jordania está realizando un estudio de viabilidad de la construcción de dos unidades SMART para la producción de electricidad y la desalación de agua, en asociación con la Ciudad Rey Abdullah para las Energías Atómica y Renovables y con el KAERI.

123. La Federación de Rusia ha desarrollado el RITM-200 de 50 MW(e), un reactor integrado para rompehielos de propulsión nuclear, que se espera poner en servicio en 2020. Para aproximarse a las características de los reactores rápidos innovadores, se ha desarrollado el SVBR-100, un reactor rápido polivalente de 100 MW(e) refrigerado por una mezcla eutéctica de plomo-bismuto. La tecnología se ha utilizado ya en varios submarinos nucleares rusos. La organización encargada del diseño está trabajando en una planta piloto, y prevé iniciar la producción en serie en 2030 a más tardar.

124. El Gobierno del Reino Unido lanzó en marzo de 2016 un concurso para explorar más a fondo el potencial de los SMR en evaluaciones tecnoeconómicas y otros estudios similares y ofrecer a la industria la oportunidad de examinar junto con el Gobierno los factores que impulsan y facilitan el despliegue. Rolls-Royce PLC está desarrollando el SMR del Reino Unido, un reactor de agua a presión de tipo bucle de 450 MW(e) con módulos normalizados transportables.

125. En marzo de 2017, la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos aceptó, para su registro y examen, la solicitud de certificación del diseño de NuScale, un reactor de agua a presión integrado de 12 módulos, cada uno con 50 MW(e) de potencia. NuScale Power tiene previsto iniciar la explotación

comercial de su primera central en Idaho para 2026, y ha puesto en marcha un plan para el despliegue a corto plazo en el Reino Unido. La Plataforma para la Innovación Acelerada en el Ámbito Nuclear (GAIN) del Departamento de Energía Nuclear de los Estados Unidos está prestando apoyo en el desarrollo del SMR-160, otro reactor de agua a presión integrado en el que está trabajando Holtec International.

126. Un nuevo producto en el mercado es el reactor avanzado que funciona (y se refrigera) con sales fundidas. Entre las varias ventajas que pueden ofrecer los reactores de sales fundidas figuran las temperaturas de funcionamiento más altas, que aumentan el rendimiento, la baja presión del refrigerante, la reducción de los volúmenes y períodos de semidesintegración de los desechos de actividad alta, unas características de seguridad notables, la eliminación de los retos relacionados con los efectos de quemado elevado del combustible sólido, y la flexibilidad de los ciclos del combustible (uranio, plutonio, torio). Uno de los muchos diseños conceptuales es el reactor de sales fundidas integrado IMSR400, de unos 190 MW(e) de potencia, que está desarrollando Terrestrial Energy Canada.

127. Para un despliegue expedito de los SMR, habrá que superar algunos problemas. Debería establecerse un marco regulador robusto para los exámenes reglamentarios de las cuestiones institucionales. Los retos técnicos comprenden la dotación de personal de las salas de control y la ingeniería de factores humanos de las centrales con varios módulos de SMR, la determinación del tamaño de la zona que se incluirá en la planificación para emergencias, la elaboración de nuevos códigos y normas, y la creación de una cadena de suministros resiliente. Además, aunque los SMR requieren una menor inversión inicial de capital por unidad, es probable que su costo de generación de electricidad sea mayor que el de los reactores grandes. Su competitividad económica deberá sopesarse con la de las otras opciones y mejorarse con economías de escala. Según una previsión realista, el primer conjunto de SMR comerciales podría empezar a funcionar entre 2025 y 2030, con el despliegue de un parque más grande posteriormente. La colaboración y las asociaciones internacionales son fundamentales para promover el desarrollo y despliegue de los SMR.

### **B.1.5. Iniciativas internacionales que promueven sistemas de energía nuclear innovadores**

128. En los últimos decenios se han lanzado varias iniciativas internacionales que promueven sistemas de energía nuclear innovadores para ayudar a resolver problemas tales como la creciente demanda de energía, la disponibilidad de recursos de combustible de uranio, el reciclado del combustible nuclear gastado para reducir la carga futura de los repositorios geológicos, la mejora de la eficiencia térmica, el fortalecimiento de la seguridad en el diseño y la resistencia a la proliferación.

129. El Proyecto Internacional sobre Ciclos del Combustible y Reactores Nucleares Innovadores (INPRO), establecido en el Organismo en 2000, reúne a los desarrolladores, los suministradores y los clientes de la tecnología con el fin de estudiar medidas internacionales y nacionales que permitan lograr las innovaciones deseadas en los reactores nucleares y los ciclos del combustible para alcanzar la sostenibilidad a largo plazo de la energía nucleoelectrónica. El INPRO tiene actualmente 42 miembros: 41 Estados Miembros del OIEA y la Comisión Europea.

130. En 2016 se publicó un manual actualizado del INPRO sobre la evaluación de la sostenibilidad en relación con los factores de estrés ambientales. En Rumania y Ucrania se están realizando evaluaciones de los sistemas de energía nuclear (NESA) basadas en la metodología del INPRO, y China, la Federación de Rusia y la India están efectuando evaluaciones de alcance limitado de sus diseños más recientes de reactores rápidos refrigerados por sodio. En 2017, el Comité Directivo del INPRO aprobó el establecimiento de un nuevo servicio para los Estados Miembros basado en las herramientas de modelización de escenarios, análisis y planificación de los sistemas de energía nuclear desarrolladas en el marco del INPRO en los últimos años. El nuevo servicio complementará el servicio de evaluaciones de los sistemas de energía nuclear ya existente.

131. En 2017, Australia se sumó al Foro Internacional de la Generación IV (GIF), una iniciativa internacional de cooperación para estudiar la viabilidad y el comportamiento de los reactores nucleares de la próxima generación. Los 14 miembros del GIF cooperan en la I+D de uno o varios de un total de seis sistemas de energía nuclear: los reactores rápidos refrigerados por gas, los reactores de muy alta temperatura, los reactores supercríticos refrigerados por agua, los reactores rápidos refrigerados por sodio, los reactores rápidos refrigerados por plomo y por una mezcla eutéctica de plomo-bismuto y los reactores de sales fundidas. Anualmente se celebran reuniones de coordinación GIF-OIEA sobre los métodos para evaluar aspectos de la economía y de la resistencia a la proliferación, en que se intercambia información sobre los proyectos en curso.

132. En 2016, el GIF publicó un informe titulado *Safety Design Guidelines on Safety Approach and Design Conditions for Generation IV Sodium-cooled Fast Reactor Systems* para proporcionar orientaciones a los desarrolladores y los proveedores sobre la reactividad del núcleo de los reactores rápidos y la pérdida de la evacuación del calor. Antes de eso, el GIF había trabajado desde 2011, en cooperación con el Organismo, en la elaboración de los criterios para el diseño de seguridad de los reactores rápidos refrigerados por sodio, que se publicaron en 2013.

133. La Plataforma Tecnológica para la Energía Nuclear Sostenible (SNETP) de la Unión Europea reúne a más de 100 expertos europeos de los ámbitos de la industria, la investigación, el mundo académico y la seguridad y de organizaciones gubernamentales y no gubernamentales para promover la investigación, el desarrollo y la demostración de tecnologías de fisión avanzadas a fin de cumplir con el Plan Estratégico Europeo de Tecnología Energética. La Iniciativa Industrial Europea sobre Fisión Nuclear Sostenible, puesta en marcha en 2010 en el marco de la SNETP, se ocupa de la necesidad de demostración de la tecnología de los reactores de neutrones rápidos de la Generación IV. En su Agenda Estratégica de Investigación e Innovación, la SNETP estableció las prioridades entre los diversos sistemas de la próxima generación y propuso el desarrollo de los siguientes proyectos: el proyecto ASTRID relativo a un reactor rápido refrigerado por sodio, como solución de referencia, con la construcción de un prototipo en Francia alrededor de 2020; el proyecto ALFRED relativo a un reactor rápido refrigerado por plomo, como primera alternativa, con la construcción de un reactor experimental para demostrar la tecnología en otro país europeo dispuesto a acoger este programa, apoyado por el MYRRHA en Bélgica; y el proyecto ALLEGRO, relativo a un reactor rápido refrigerado por gas, como segunda alternativa, que también requeriría la construcción de un reactor de demostración de la tecnología en un país europeo.

134. Entre las iniciativas internacionales recientes encaminadas a elaborar hojas de ruta para un futuro energético sin emisiones de carbono cabe mencionar Nuclear Innovation 2050 (NI2050) de la Agencia para la Energía Nuclear (AEN). La finalidad de la iniciativa NI2050, en la que participan varios países de la OCDE y representantes de la SNETP, el GIF, la WNA y el Organismo, es ayudar a establecer las prioridades mundiales en la labor de I+D de la fisión nuclear, promover su aplicación y determinar las oportunidades de fortalecer la cooperación.

#### **B.1.6. Aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear**

135. El uso de la energía nuclear para aplicaciones no eléctricas, conocido también como cogeneración nuclear, está despertando un interés creciente. La cogeneración se puede utilizar para la desalación de agua de mar, la producción de hidrógeno, la calefacción urbana, la recuperación terciaria de crudo y otras aplicaciones industriales, y también puede ayudar a lograr la seguridad energética y la sostenibilidad y a combatir el cambio climático. Podría aumentar la eficiencia térmica global de una central nuclear en más del 30 %, mediante la reutilización del calor residual, y reducir los efectos ambientales de la calefacción y el transporte en hasta un 35 %, si se abre camino en esos mercados.

136. Estudios recientes muestran que la cogeneración con calor residual puede compensar una parte importante del costo de la generación de energía nucleoelectrónica. Por ejemplo, el calor residual emitido por los reactores de alta temperatura refrigerados por gas podría emplearse para la desalación de agua de mar, lo que generaría créditos de costo importantes respecto del precio del agua producida por desalación en las centrales eléctricas a gas o petróleo.

137. Con los adelantos actuales en la tecnología de la desalación de agua de mar, como los sistemas que funcionan a bajas temperaturas, los sistemas de recuperación del calor residual, los sistemas de energía y proceso eficientes y los métodos innovadores de optimización de procesos, la desalación con energía de las centrales nucleares será una opción viable en el futuro. Un diseño híbrido que integre la desalación térmica y por membrana se considera óptimo para aprovechar el calor residual emitido por los condensadores de las centrales nucleares o extraído como vapor de proceso de baja calidad de las últimas etapas de una turbina de baja presión introduciéndolo en un sistema de desalación por destilación multiefecto. Esto podría reducir el consumo de energía, el volumen de la toma de agua de mar y el costo del desagüe. Varios Estados Miembros, entre ellos la Arabia Saudita, China, Egipto, Jordania y el Pakistán, han expresado o reiterado su interés en la desalación nuclear. Varios diseños de reactores que se están desarrollando, como el SMART en la República de Corea, utilizarán el calor residual para la desalación de agua de mar.

138. Con los avances logrados en los diseños de reactores de alta temperatura y en la producción nuclear de hidrógeno, especialmente en la electrólisis de vapor a alta temperatura, la producción nuclear de hidrógeno podría desempeñar un papel cada vez mayor en la futura economía del hidrógeno y ayudar a combatir el cambio climático. Los actuales reactores nucleares de baja temperatura también podrían producir hidrógeno mediante la electrólisis avanzada de agua a baja temperatura. La economía de este proceso podría mejorarse utilizando la electricidad generada fuera de las horas punta.

139. Ya sea para la calefacción urbana o para otros fines, las centrales nucleares pueden suministrar un vapor o calor de proceso adecuado y rentable con las opciones técnicas existentes actualmente para el transporte de grandes cantidades de calor (del orden de los GW) por largas distancias (del orden del centenar de km). El costo del calor suministrado a los clientes puede ser competitivo si el calor recuperado de la central nuclear supera un determinado umbral.

## **B.2. Fusión**

140. Se han hecho progresos importantes en el proyecto ITER, con avances más visibles en la construcción y el montaje en el emplazamiento (fig. B-4). Siguen llegando componentes importantes, y otros están en fabricación. El grupo central está trabajando en la terminación del diseño, la integración técnica y la seguridad nuclear. En paralelo, un amplio programa de I+D a cargo de las partes participantes en el ITER está apoyando la finalización de los componentes expuestos al plasma y de los sistemas de calentamiento y generación de corriente, de diagnóstico y de control. Después de varias revisiones del calendario, ITER y siete organismos nacionales han llegado a la conclusión de que el primer plasma se producirá hacia el final de 2025.

141. Otro hito en la energía de fusión fue la primera producción de plasma en el estelarator Wendelstein 7-X optimizado (W7-X) del Instituto Max Planck de Física del Plasma, en Alemania (fig. B-4). El objetivo principal de este aparato es demostrar el funcionamiento con plasma en estado estacionario con parámetros adecuados para la fusión, y verificar así que el estelarator sea un concepto de central de fusión nuclear viable. Una vez terminada la fase de construcción principal del W7-X y realizada con éxito la puesta en servicio del aparato, se activó la operación con plasma durante tres días por semana desde diciembre de 2015 hasta marzo de 2016, por un total de 10 semanas de funcionamiento con plasma. Mientras que las bobinas del campo magnético y su estructura de apoyo dentro del criostato se mantuvieron a una temperatura criogénica (100 K) durante toda la campaña (en un campo magnético, la temperatura operacional de las bobinas del W7-X es de 4 K), el campo magnético se aumentó y se redujo cada día de la operación con plasma.



*Fig. B-4. Izquierda: Emplazamiento del ITER en octubre de 2017 (Fotografía: ITER IO). Derecha: Vista desde fuera del estelarator Wendelstein 7-X. (Fotografía: Instituto Max Planck de Física del Plasma)*

142. Prosiguieron varios programas de I+D de los aspectos de la fusión relacionados con la ingeniería, la integración, el diseño de las centrales nucleares, los materiales y la seguridad. En China, Europa y el Japón se está dedicando un esfuerzo sustancial a la I+D de una fuente de neutrones por fusión. La finalidad de las actividades de diseño y validación de ingeniería de la Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión (IFMIF) realizadas conjuntamente por Europa y el Japón, es producir un diseño de ingeniería detallado, completo y plenamente integrado y validar el funcionamiento continuado y estable de prototipos de cada subsistema de la IFMIF. Se ha validado el comportamiento de la instalación que contiene el blanco de litio, los resonadores de media longitud de onda de radiación  $\beta$  de baja energía y otros subsistemas. La validación completa del prototipo de acelerador lineal de la IFMIF está programada para 2019.

143. En China se prevé que la instalación de fuentes compactas de neutrones por fusión, aún en construcción, logrará generar un flujo neutrónico rápido de hasta  $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  antes del final de 2018.

144. El Organismo está elaborando normas y directrices para técnicas de ensayo con especímenes pequeños, que se utilizarán, con fuentes especiales de neutrones por fusión, en los procedimientos de selección y cualificación de materiales.

## **C. Aplicaciones de los aceleradores y los reactores de investigación**

### **C.1. Aceleradores**

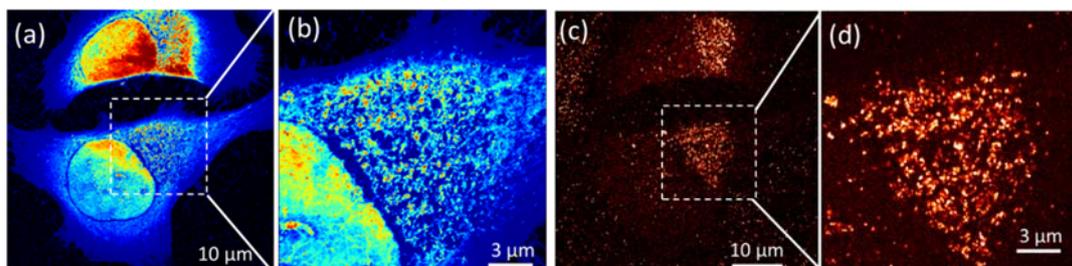
145. Las aplicaciones más comunes de los aceleradores de haces de iones comprenden estudios ambientales, aplicaciones biomédicas, caracterizaciones y estudios de determinación de la procedencia de objetos del patrimonio cultural, la ciencia de los materiales y la datación por radiocarbono.<sup>4</sup>

#### **Microscopía nuclear de superresolución de células enteras**

146. Los aceleradores de haces de iones con energías de unos cuantos megaelectronvoltios combinados con un sistema de enfoque sofisticado pueden proporcionar haces de algunas decenas de nanómetros de diámetro. Esto ofrece la posibilidad de obtener imágenes de células biológicas completas a resoluciones muy por debajo del límite de difracción óptica.

<sup>4</sup> En el Portal de Conocimientos sobre Aceleradores del OIEA figura más información a este respecto: <https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators>.

147. Los avances recientes en los sistemas de enfoque y en los instrumentos de detección de la luz han permitido hacer progresos en la bioimagenología con microsondas nucleares. La figura C-1 muestra una combinación de imágenes estructurales y de fluorescencia de una célula HeLa completa cultivada en un medio con nanodiamantes fluorescentes. El tamaño de punto utilizado para la obtención de la imagen fue de 30 nm, lo que representa uno de los haces de diámetro más pequeños jamás alcanzados para iones de 1,6 MeV. Estos avances ayudan a comprender los efectos de la radiación en una célula viva y a desarrollar nuevos tratamientos y medicamentos.



*Fig. C-1. Captación de nanodiamantes por células HeLa. a) y b) Imágenes de microscopía iónica de transmisión de barrido que muestran las diferencias en la densidad. Se ve claramente el núcleo de la célula. c) y d) Imágenes obtenidas con la técnica de fluorescencia inducida por haz de iones que muestran la localización de los nanodiamantes. (Fotografías: Andrew Bettioli, Profesor Asociado, Centro de Aplicaciones con Haces de Iones, Universidad Nacional de Singapur)*

### **Determinación de la edad con haces de iones**

148. El uso de técnicas de haces de iones ha sido sumamente útil también para la investigación de delitos, la inocuidad de los alimentos y otras cuestiones sanitarias, y para el estudio de objetos del patrimonio cultural y de muestras ambientales. La determinación de la edad absoluta mediante la datación por radiocarbono permite detectar las falsificaciones y es ahora una herramienta imprescindible en el diagnóstico del patrimonio cultural (fig. C-2). La datación por radiocarbono se basa en la medición de las concentraciones residuales de  $^{14}\text{C}$  en una muestra mediante la espectrometría de masas con aceleradores. En 2017, el Organismo puso en marcha un proyecto coordinado de investigación destinado a mejorar los conocimientos y a tender puentes entre los profesionales de las técnicas analíticas nucleares y los de la ciencia forense.



*Fig. C-2. Toma de muestras de la famosa Loba Capitolina en el Centro de Datación y Diagnóstico de la Universidad de Salento, en Lecce (Italia) (izquierda). La estatua de bronce estaba catalogada como una obra etrusca de alrededor del año 500 AC. Se tomaron muestras de los núcleos de fundición originales, se seleccionaron residuos orgánicos por microscopía óptica, y la datación por radiocarbono en la estación final del acelerador (derecha) dio la respuesta definitiva: la estatua fue fabricada en algún momento entre 1100 y 1200 años después de Cristo y es, por lo tanto, alrededor de 16 siglos más joven de lo que se creía.*

*(Fotografías: cortesía de G. Quarta y L. Calcagnile, Universidad de Salento)*

### SESAME ofrece la primera radiación sincrotrónica a los usuarios

149. El Centro Internacional de Radiaciones de Síncrotrón para Ciencias Experimentales y Aplicadas en Oriente Medio (SESAME) emitió su “primera luz” en enero de 2017 y fue inaugurado en mayo (fig. C-3). La nueva instalación de investigación en Jordania tiene una fuente de radiación sincrotrónica de la tercera generación de 2,5 GeV, la primera de su género en el Oriente Medio, capaz de emitir radiación de gran brillo en longitudes de onda que van desde el infrarrojo hasta los rayos X duros para una variedad de aplicaciones científicas en campos tales como la biología, los materiales avanzados, el patrimonio cultural y la física de la materia condensada. Con la UNESCO como principal organización internacional patrocinadora, SESAME ha gozado del apoyo de muchos Estados Miembros del OIEA, la Unión Europea y el CERN.



*Fig. C-3. Anillo de almacenamiento interno de SESAME, con los imanes deflectores y de focalización entre los cuales circulan los haces de electrones durante su aceleración (izquierda). Primer haz producido, tal como se vio en el sistema de adquisición de datos de la sala de control de SESAME. (Fotografías: OIEA)*

## C.2. Reactores de investigación

150. Al 31 de diciembre se han construido 797 reactores de investigación de uso civil en 67 países<sup>5</sup>, de los cuales hay 254 en funcionamiento en 55 países<sup>6</sup>. La Federación de Rusia tiene el mayor número de reactores de investigación operativos (59), seguida de los Estados Unidos de América (50), China (17) y el Japón (9). En el mundo hay 57 reactores de investigación que funcionan a niveles de potencia de 5 MW o más, ofreciendo flujos neutrónicos altos para productos y servicios de gran capacidad.

151. Los reactores de investigación son indispensables para producir los radioisótopos que se utilizan en la medicina y la industria y los haces de neutrones empleados en el estudio de los materiales y los ensayos no destructivos, así como para los servicios analíticos y de irradiación de los sectores privado y público y los servicios de estudios del medio ambiente y el patrimonio cultural (cuadro C-1). Estos reactores hacen una contribución estratégica a la formación y la capacitación. A medida que muchos de ellos se retiran del servicio debido al envejecimiento, las instalaciones restantes y las nuevas deben utilizarse con eficiencia, gestionarse bien y explotarse de manera sostenible. El Organismo alienta a los explotadores de reactores de investigación a que elaboren o actualicen sus planes estratégicos para el uso de sus instalaciones. En los últimos tres años, 41 instalaciones han presentado sus planes estratégicos al Organismo para obtener asesoramiento.

152. La mitad de los reactores de investigación en funcionamiento tienen más de 40 años de antigüedad. Su ciclo de vida útil puede llegar a 60 años o más, pero para ello es de la máxima importancia que se inicien a tiempo programas adecuados de gestión del envejecimiento, renovación y modernización. En vista de la tendencia general a la reducción de la financiación para esas instalaciones y de la escasa planificación de la sucesión, la aplicación de buenos sistemas de gestión y de programas de explotación

<sup>5</sup> Fuente: Base de Datos de Reactores de Investigación del Organismo (<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>).

<sup>6</sup> Más Taiwán (China).

y administración y de gestión de la vida útil adecuados será fundamental para que estos reactores puedan cumplir sus misiones de manera rentable. Se prevé que en varios de los 122 reactores de investigación que están en régimen de parada definitiva en 27 Estados Miembros comenzará la preparación para la clausura en el futuro próximo.

153. Se están construyendo reactores de investigación nuevos en la Arabia Saudita, la Argentina, la Federación de Rusia, Francia, la India, la República de Corea y Ucrania (un sistema accionado por acelerador). Varios Estados Miembros tienen planes oficiales para la construcción de reactores de investigación nuevos, entre ellos Belarús, Bélgica, Bolivia, los Estados Unidos de América, Nigeria, los Países Bajos, Tailandia, Tayikistán (terminación del reactor Argus-FTI), Viet Nam y Zambia. Otros, como Azerbaiyán, Bangladesh, Etiopía, Filipinas, Ghana, Kenya, Malasia, Mongolia, Myanmar, el Níger, la República Unida de Tanzania, el Senegal, Sudáfrica, el Sudán y Túnez, están considerando la posibilidad de construir nuevas instalaciones. El reactor multipropósito de investigación y capacitación de 5 MW de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Jordania fue puesto en servicio y recibió la licencia de explotación en noviembre de 2017. Una vez cumplidos los requisitos de seguridad establecidos tras el accidente de Fukushima, en 2017 reanudaron sus operaciones los reactores de investigación KUCA, de potencia nula, y KUR, de 5 MW, de la Universidad de Kyoto, así como el reactor de investigación de potencia nula UTR, de la Universidad de Kindai. El reactor de investigación multipropósito HANARO de 30 MW de la República de Corea fue puesto nuevamente en marcha en diciembre, tras una parada de más de tres años para la retroadaptación del edificio del reactor.

**Cuadro C-1. Aplicaciones comunes de los reactores de investigación en el mundo<sup>a</sup>**

Tipo de aplicación	Número de reactores de investigación que se utilizan para ello <sup>b</sup>	Número de Estados Miembros que tienen estas instalaciones
Enseñanza y capacitación	157	53
Análisis por activación neutrónica	114	52
Producción de radioisótopos	83	43
Radiografía neutrónica	68	38
Irradiación de materiales y combustibles	62	26
Dispersión neutrónica	44	29
Geocronología	25	22
Transmutación (dopado del silicio)	23	16
Transmutación (gemas)	18	11
Terapia neutrónica, principalmente I+D	14	11
Investigación innovadora sobre la energía nuclear	15	10
Otros <sup>c</sup>	118	37

<sup>a</sup> Estas aplicaciones se describen con mayor detalle en la publicación del Organismo titulada *Applications of Research Reactors* (Colección de Energía Nuclear del OIEA N° NP-T-5.3, 2014).

<sup>b</sup> De un total de 238 reactores de investigación examinados (217 en funcionamiento y 21 en régimen de parada temporal, a noviembre de 2017).

<sup>c</sup> Como calibraciones y ensayos de instrumentos, experimentos de blindaje, mediciones de datos nucleares, visitas públicas y seminarios.

154. Los Estados Miembros que tienen previsto aumentar o mantener la capacidad nuclear nacional para sus programas de ciencia y tecnología, incluida la energía nucleoelectrónica, siguieron manifestando interés en tener acceso a reactores de investigación. Por consiguiente, en 2017 el Organismo consolidó y amplió sus cuatro instrumentos y herramientas a ese efecto, a saber, el Reactor-Laboratorio por Internet, una herramienta de capacitación a distancia utilizada principalmente para la enseñanza académica (en 2017

continuó la transmisión de sesiones para las regiones de África, Europa, y América Latina y el Caribe); los Cursos Regionales con Reactores de Investigación (RRRS), para la capacitación básica, y la Iniciativa sobre Reactores de Investigación de Europa Oriental (EERRI) para la capacitación práctica avanzada, destinados principalmente a profesionales jóvenes (en 2017, Tailandia y Viet Nam organizaron conjuntamente un RRRS, y en Austria, Hungría y la República Checa se dictó el 13<sup>er</sup> curso de capacitación EERRI); y el mecanismo de los Centros de Excelencia Internacionales Basados en Reactores de Investigación (ICERR) designados por el OIEA para la formación específica y avanzada de profesionales jóvenes y experimentados (en 2017 se designaron como tales el SCK•CEN de Bélgica y los Laboratorios Nacionales de Idaho y de Oak Ridge del Departamento de Energía de los Estados Unidos).

155. La gestión y el almacenamiento seguros, fiables y económicos del combustible nuclear gastado de los reactores de investigación representa un reto para una serie de Estados Miembros, al igual que la determinación de opciones viables para la parte final del ciclo del combustible, que deben respetar los requisitos y limitaciones referentes al medio ambiente, la economía, la política nacional, la no proliferación y los aspectos técnicos. Muchos países que poseen uno o varios reactores de investigación pero no un programa nucleoelectrónico, o solo uno pequeño, tienen el problema de la disposición final definitiva de cantidades relativamente pequeñas de combustible nuclear gastado y pueden verse obligados a adoptar una decisión sobre el futuro de sus reactores de investigación teniendo en cuenta la duración limitada de los programas internacionales de devolución del combustible gastado de los reactores de investigación. Se está llevando a cabo un esfuerzo colectivo, coordinado por el Organismo, para elaborar modelos de adopción de decisiones que ayuden a los Estados Miembros a seleccionar la opción más viable en sus circunstancias.

156. Hasta el momento, 97 reactores de investigación y 2 instalaciones de producción de isótopos de uso médico han sido convertidos al uso de UPE, en lugar de uranio muy enriquecido (UME), o puestos en régimen de parada confirmada. En 2017 se convirtió al uso de UPE un reactor miniatura fuente de neutrones (MNSR) de Ghana, y el combustible de UME fue devuelto a China. Se está prestando apoyo en la conversión del MNSR de Nigeria. Para la conversión de los reactores de investigación de alto flujo y alto rendimiento se requerirá el desarrollo y la cualificación de combustibles de UPE de alta densidad (p. ej., de uranio-molibdeno); aunque se han hecho progresos sustanciales a este respecto, habrá que seguir desarrollando las técnicas de ensayo de irradiación, examen postirradiación y fabricación para que estos combustibles lleguen al comercio.

157. Al final de 2017, el programa de devolución del combustible de UME de origen estadounidense había terminado la retirada de aproximadamente 1300 kg de combustible de UME nuevo e irradiado de reactores de investigación, y el programa de devolución del combustible de origen ruso había terminado la retirada de unos 2250 kg.

158. En Francia, AREVA aumentó la variedad de combustibles gastados de reactores de investigación que se tratarán, como el combustible de siliciuro, que se reprocesó por primera vez en 2017.

159. Las breves interrupciones del servicio registradas en 2017 en algunos procesadores e instalaciones mundiales que producen molibdeno 99 por irradiación de blancos no dieron lugar a una escasez de suministros de suficiente importancia como para que los pacientes se vieran afectados, porque los esfuerzos de los órganos de gestión de la cadena de suministro y los principales productores internacionales, así como los eficaces esfuerzos de mitigación de los profesionales sanitarios, compensaron las fluctuaciones. El cese de la producción habitual de molibdeno 99 en el reactor de investigación NRU del Canadá en 2016 no ha repercutido negativamente en el suministro mundial. Prosigue la conversión de los procesos de producción de molibdeno 99 del uso de UME al de UPE. En 2017, la Organización Australiana de Ciencia y Tecnología Nuclear concluyó la construcción de su nueva instalación de producción. NTP Radioisotopes, de Sudáfrica, anunció la plena conversión de sus procesos al uso de UPE. Otros dos productores importantes, el Instituto de Radioelementos de Bélgica y Curium (que comprende IBA Molecular y Mallinckrodt Nuclear Medicine LLC) de los Países Bajos, siguen avanzando en la conversión de sus procesos de producción del UME al UPE.

## **D. Alimentación y agricultura**

### **D.1. Preparación para una emergencia nuclear en las esferas de la alimentación y la agricultura**

#### **D.1.1. Retos de la respuesta a una emergencia nuclear**

160. La identificación rápida de las zonas de producción de alimentos afectadas y la actuación inmediata para impedir que los productos que puedan estar contaminados lleguen al consumidor son algunos de los retos que habría que superar en el caso de una emergencia nuclear. Sin embargo, el procesamiento tradicional de los datos sobre la contaminación radiactiva incide tanto en los tiempos como en la exactitud de la respuesta. Debido a la gran escala que podría alcanzar una emergencia nuclear, tendrían que intervenir probablemente numerosos laboratorios de diferentes instituciones, que aportarían información polifacética obtenida, en muchos casos, con una amplia variedad de metodologías. La gestión eficaz y eficiente de esa gran cantidad de datos de diversa índole puede determinar la calidad de la respuesta.

161. Esta gestión puede lograrse con un robusto sistema de apoyo a la toma de decisiones basado en la tecnología de la información (TI-DSS) que reúna y centralice toda la información pertinente y que realice el procesamiento de datos necesario en tiempo real.

#### **D.1.2. Novedades en los sistemas de apoyo a la toma de decisiones para la respuesta a emergencias**

162. Los avances en las herramientas y los algoritmos de los TI-DSS permiten una mejor gestión en tiempo real de grandes volúmenes de datos y un apoyo integrado a la toma de decisiones. El uso de tecnologías móviles para la recogida de datos sobre el terreno y en el laboratorio reduce el error humano y acelera el procesamiento de la información.

163. El TI-DSS moderno ofrece una ayuda visual clara para mejorar las capacidades de respuesta. Como ejemplo cabe citar la posibilidad de representar gráficamente la fase de recopilación (en mapas que muestran el estado de la toma o el análisis de las muestras), la fase de análisis/validación (en mapas que muestran la concentración/deposición de radiactividad) y la fase de toma de decisiones (en un tablero que ayuda a determinar los sitios en que debería restringirse el consumo de algunos alimentos). Es posible distribuir inmediatamente mapas de contaminación de los alimentos, para que todas las partes interesadas puedan adoptar decisiones bien fundamentadas. También se pueden utilizar leyendas cartográficas en colores predeterminados para facilitar la comunicación de los riesgos entre las partes interesadas y la población.

164. La capacidad de evaluar visualmente los datos en tiempo real ayuda a sopesar los costos y beneficios de los posibles escenarios de respuesta. Los umbrales y niveles de actuación determinados por cada parte interesada en el proceso de pronóstico del escenario dan cabida a diferentes grados de tolerancia del riesgo en la indicación de restricciones a la agricultura y la circulación de alimentos. Estas funciones de apoyo a la toma de decisiones aumentan la capacidad de las partes interesadas de centrarse en lo más importante en ese momento, que es garantizar la inocuidad de los alimentos y la seguridad de los consumidores.

### D.1.3. DSS4NAFA

165. DSS4NAFA es un TI-DSS basado en la nube, desarrollado por la División Mixta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura para orientar a los Estados Miembros del Organismo y de la FAO en su respuesta a una emergencia nuclear que afecte a los alimentos y la agricultura (fig. D-1). El sistema optimiza la reunión, gestión y visualización de los datos utilizando los algoritmos más avanzados. Las características específicas que distinguen al DSS4NAFA de los demás sistemas son que emplea tecnología moderna, como herramientas móviles y la visualización geográfica avanzada, para superar los problemas logísticos que se plantean en una emergencia nuclear, y que tiene un componente de análisis de datos fácil de utilizar que propone medidas de respuesta. El sistema DSS4NAFA está construido en forma modular, con varios componentes de TI que están integrados pero pueden intercambiarse por separado, lo que le confiere gran flexibilidad y adaptabilidad. La versión  $\beta$  de esta herramienta estará disponible en 2018.



*Fig. D-1 Uso de sistemas de TI modernos para optimizar la respuesta a emergencias nucleares que afecten a los alimentos y la agricultura. Diagrama general del funcionamiento del sistema DSS4NAFA. (Fuente: FAO/OIEA)*

166. El DSS4NAFA es un sistema innovador que permite evaluar e interpretar los datos sobre la contaminación radiactiva de los alimentos y la agricultura y que mejora la capacidad de las autoridades responsables de la inocuidad de los alimentos de responder a una emergencia nuclear. Ayuda a los encargados de tomar las decisiones a seleccionar los lugares de muestreo y a asignar las tareas de toma de muestras y análisis de laboratorio. Ofrece poderosas herramientas de interpretación visual que integran los datos multidimensionales, desde la escala local hasta la internacional, que se reúnen y procesan en una emergencia nuclear.

167. Al recibir los datos de concentración de radionucleidos, el tablero de restricción de alimentos coteja la información, incluida la distribución espacial y la resolución temporal del accidente, e indica las restricciones que deberían aplicarse a los alimentos y los cultivos sobre la base del nivel de riesgo y de los grados de tolerancia especificados. El uso del sistema DSS4NAFA reduce la complejidad de la gestión logística de la recopilación de datos, del pronóstico de escenarios en el análisis de datos y de la propuesta de medidas de restricción para la toma de decisiones.

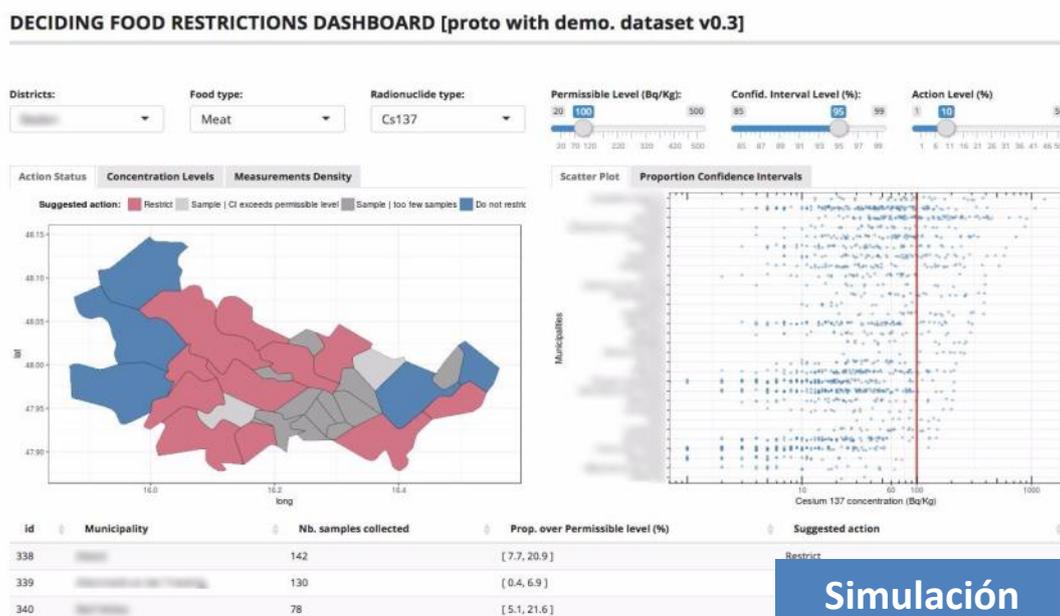


Fig. D-2 El tablero de las restricciones, un módulo especializado del sistema DSS4NAFA, ayuda a los responsables de las decisiones proponiendo medidas sobre la base de la información relativa a la concentración de radionucleidos y de intervalos de confianza ajustables. Los interesados tienen tres cursos de acción posibles: i) imponer restricciones a los alimentos o los cultivos, ii) no imponer restricciones ni a los alimentos ni a los cultivos y iii) realizar nuevos muestreos. (Fuente: FAO/OIEA)

168. El sistema DSS4NAFA es capaz de manejar grandes volúmenes de datos, sin sobrecargar al usuario. Como ejemplos prácticos de su uso cabe mencionar la visualización espacial y temporal de los datos sobre la contaminación, las imágenes gráficas interactivas que permiten optimizar la distribución de los recolectores de muestras y el uso de las instalaciones de los laboratorios analíticos, y los tableros que indican las zonas en que se justifica la restricción del consumo de determinados alimentos.

169. La plataforma del sistema es accesible *in situ* mediante una aplicación para teléfonos inteligentes, o en las oficinas mediante una interfaz para computadoras de mesa, lo que agiliza el uso y las comunicaciones. La combinación de estas funcionalidades conecta a todos los interesados en el proceso y refuerza la capacidad de dar una respuesta robusta en caso de emergencia.

## D.2. Uso de la irradiación para desarrollar vacunas novedosas y eficaces contra las zoonosis y las enfermedades de los animales

170. El aumento de la productividad del ganado ayuda a millones de familias de todo el mundo a incrementar sus ingresos. La disponibilidad de vacunas eficaces y el acceso a ellas reducen la carga de morbilidad y son cruciales para la ganadería. Muchas enfermedades que se transmiten de los animales a los seres humanos y viceversa (zoonosis) pueden prevenirse con el uso de vacunas.

171. La administración de vacunas reduce también el empleo de fármacos en la cría de animales, y contribuye a aminorar la carga de antiparasitarios y la resistencia a los antimicrobianos. Aunque los avances biotecnológicos del siglo pasado ayudaron a desarrollar muchas vacunas nuevas para el ganado, varias enfermedades infecciosas transfronterizas de consecuencias devastadoras siguen siendo un peligro para los productores pecuarios, debido a que no existen vacunas para combatirlas o a que las que existen son poco eficaces.

172. Una de las mejores maneras de fabricar una vacuna es utilizar microorganismos patógenos enteros no infectantes para producir la inmunidad. La tecnología de la radiación puede utilizarse de diferentes modos para el desarrollo de vacunas (fig. D-3). Un método consiste en someter al agente patógeno, por ejemplo un virus, a una dosis de irradiación  $\gamma$  más alta (de 25 a 30 kGy) para inactivarlo completamente. Este enfoque es adecuado en el caso de los microbios altamente patógenos, en que no debe inyectarse ningún organismo vivo en el huésped. La inactivación por irradiación no destruye los antígenos, a diferencia de los métodos químicos, que se emplean frecuentemente en la fabricación de vacunas.

173. Otra posibilidad es emplear una dosis baja de irradiación para detener la replicación o la patogenicidad del organismo sin eliminar su actividad metabólica. Este método utiliza la destrucción parcial o la presencia de ciertas mutaciones en el material genético. Estas son las vacunas “con microorganismos metabólicamente activos pero sin capacidad de replicación”.<sup>7</sup>

174. Un tercer enfoque consiste en utilizar un microorganismo patógeno irradiado para aumentar o refinar la inmunogenicidad de otro microorganismo emparentado o no emparentado presente en la vacuna.

175. Los compuestos que aumentan la eficacia de una vacuna se denominan potenciadores y se emplean con frecuencia en la preparación de vacunas. Las tecnologías de la radiación pueden utilizarse también en forma indirecta para aumentar la eficacia e inocuidad de las vacunas. Una aplicación de ese tipo es la irradiación de las vacunas ya preparadas para asegurarse de que no haya contaminación con organismos infectantes en la formulación utilizada para la inoculación. Otra es la irradiación de los potenciadores de las vacunas para modificar su estructura (por ejemplo, por polimerización) y reforzar así el efecto inmunológico o de protección.

176. Los científicos vienen tratando de crear vacunas mediante la irradiación de los microorganismos patógenos desde los años cincuenta. Sin embargo, el uso clásico de las tecnologías de irradiación consistía en sobreirradiar los microorganismos, lo que destruía las estructuras nucleicas y proteínicas en esas vacunas experimentales. El criterio actual en el uso de las tecnologías de irradiación se basa en el descubrimiento de que los irradiadores modernos pueden generar eficazmente dosis de irradiación mayores y más específicas. En paralelo con ello, se ha ampliado también el conocimiento del sistema inmunitario, lo que ha conducido al desarrollo de herramientas y tecnologías más precisas para evaluar las respuestas inmunitarias a la vacunación.

177. Junto con los adelantos en los estudios genómicos, estos avances han reavivado la investigación sobre las vacunas irradiadas y ampliado el desarrollo de vacunas novedosas y eficaces. Por ejemplo, los nuevos irradiadores con haces de electrones pueden generar una dosis de radiación de hasta 30 kGy en pocos minutos, lo que evita la acumulación de subproductos no deseables, como los radicales libres, que es imposible evitar cuando el tiempo de irradiación es mayor.

178. Algunos compuestos radioprotectores descubiertos recientemente también pueden ayudar a proteger las estructuras de las que depende la antigenicidad de las vacunas. Uno de ellos, el complejo  $Mn^{2+}$ -decapéptido (MDP), un compuesto aislado a partir de bacterias resistentes a la radiación, preserva las proteínas inmunógenas de los virus y las bacterias expuestos a dosis más altas de rayos  $\gamma$  al absorber los radicales libres producidos durante la irradiación.<sup>8</sup>

---

<sup>7</sup> Magnani, D.M., Harms, J.S., Durward, M.A., Splitter G.A., Nondividing but metabolically active gamma-irradiated *Brucella melitensis* is protective against virulent *B. melitensis* challenge in mice, *Infect. Immun.* 77 11 (2009) 5181-5189.

<sup>8</sup> Gayen, M., et al., Deinococcus Mn<sup>2+</sup>-peptide complex: A novel approach to alphavirus vaccine development, *Vaccine.* 35 29 (2017) 3672-3681.

179. Los avances tecnológicos y los métodos creativos de fabricación de vacunas mencionados en los párrafos anteriores han superado los experimentos básicos iniciales. En la medicina humana, se han utilizado esporozoítos del paludismo metabólicamente activos pero sin capacidad de replicación, obtenidos de mosquitos irradiados, para producir inmunidad contra el paludismo. Para que una vacuna experimental se llegue a emplear en ensayos clínicos con seres humanos se requieren una sólida prueba del concepto y altos niveles de confianza en su inocuidad.

180. La vacuna antipalúdica irradiada no solo ha llegado a las fases de ensayo clínico, sino que también ha demostrado una protección considerable contra la infección posterior.<sup>9</sup> La irradiación se ha empleado también para la inactivación completa del virus VIH-1, que luego, en un ensayo clínico en seres humanos, demostró ser inocuo y aumentó la producción de anticuerpos contra el VIH.

181. Basándose en estos avances positivos y en los nuevos conocimientos sobre el uso selectivo y controlado de la irradiación, muchas instituciones públicas y privadas han aumentado sus esfuerzos para desarrollar “radiovacunas”. Las investigaciones dirigidas por científicos del Instituto Fraunhofer de Terapia Celular e Inmunología (IZI) de Alemania demostraron que la irradiación con electrones de baja energía mantenía las propiedades antigénicas de virus como los del herpes equino y el síndrome disgenésico y respiratorio porcino, e incluso las respuestas inmunitarias protectoras en la gripe.<sup>10</sup>

182. Investigaciones realizadas en las Universidades de Winconsin-Madison y Purdue de los Estados Unidos han demostrado que la vacunación de ratones con bacterias del género *Brucella* irradiadas pero metabólicamente activas los protege de la enfermedad cuando se les expone a la infección por el microorganismo correspondiente. La brucelosis es una enfermedad debilitante de los animales que tiene un impacto económico mundial y es también una zoonosis. Hay pocos ejemplos de experimentos logrados en el desarrollo de vacunas irradiadas para las enfermedades del ganado. Otros experimentos en curso para desarrollar vacunas irradiadas contra enfermedades animales transfronterizas son los de la fiebre aftosa y la septicemia hemorrágica.

183. El Organismo ha abierto el camino para una nueva generación de investigaciones en este ámbito mediante un proyecto coordinado de investigación realizado con seis contrapartes (Bangladesh, Egipto, Etiopía, la República Islámica del Irán, Sri Lanka y el Sudán) con el fin de evaluar nuevos enfoques para producir vacunas irradiadas en forma experimental (fig. D-4).

184. Los científicos de estos países se ocupan de diferentes patógenos animales o zoonóticos y han demostrado los conceptos de diferentes dosis de irradiación para el desarrollo de vacunas experimentales. Actualmente se están llevando a cabo experimentos para determinar si esas vacunas podrían proteger a un animal expuesto al microorganismo patógeno infectante. El primer éxito se logró con un prototipo de vacuna irradiada contra *Haemonchus contortus*, un parásito gastrointestinal de los rumiantes. Los animales expuestos mostraron una protección del 100 % tras la administración de dos dosis orales de larvas de *Haemonchus contortus* irradiadas.

185. El Organismo está realizando experimentos para desarrollar prototipos de vacunas irradiadas contra dos virus porcinos que afectan gravemente a la cría de cerdos: el de la gripe porcina y el del síndrome disgenésico y respiratorio porcino. También está desarrollando y suministrando herramientas que miden la respuesta inmunitaria provocada por la vacunación con microorganismos irradiados. Se están elaborando técnicas que miden la inmunidad celular, una esfera poco desarrollada en la inmunología del ganado pero que es importante en el estudio de las enfermedades virales.

---

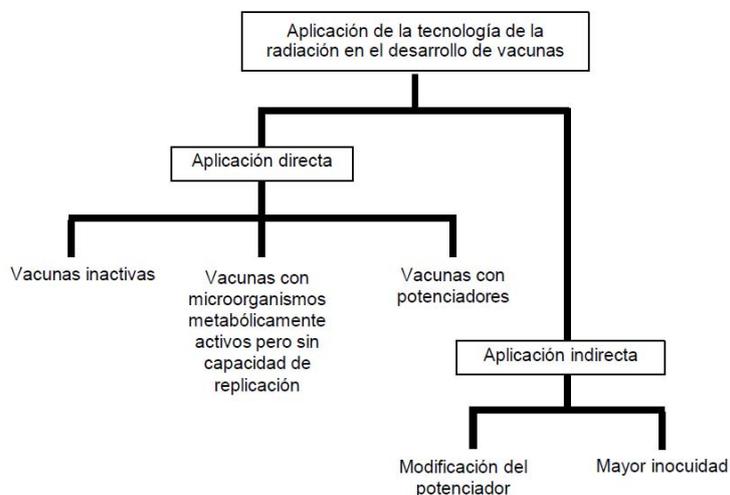
<sup>9</sup> Sissoko, M.S., *et al.*, Safety and efficacy of PfSPZ Vaccine against *Plasmodium falciparum* via direct venous inoculation in healthy malaria-exposed adults in Mali: a randomised, double-blind phase 1 trial, *Lancet Infect. Dis.* 17 5 (2017) 498-509.

<sup>10</sup> Fertey, J., *et al.*, Pathogens inactivated by low-energy-electron irradiation maintain antigenic properties and induce protective immune responses, *Viruses* 8 11 (2016) E319.

186. El Organismo está creando asimismo un repositorio de anticuerpos monoclonales que reconocen inmunomarcadores bovinos y que se distribuirán a los laboratorios de los Estados Miembros. Con respecto a microorganismos patógenos específicos, los científicos han descubierto recientemente “puntos calientes” del genoma de los parásitos del género *Trypanosoma* que son afectados por bajas dosis de irradiación. Este descubrimiento ayudará a diseñar fármacos y vacunas contra un parásito que tiene efectos de amplio alcance en la producción pecuaria de los países en desarrollo.

187. Con el concepto de la tecnología de la irradiación diferencial ya probado y establecido, la investigación se está concentrando ahora en el desarrollo del proceso y en la producción de las vacunas a mayor escala. Sanaria, una empresa de biotecnología que realiza experimentos con la vacuna antipalúdica irradiada, está estudiando la posibilidad de utilizar robots en la producción de vacunas, mientras que el Instituto Fraunhofer de Alemania está experimentando con el desarrollo de un nuevo procedimiento técnico automatizado para aplicar la irradiación con haces de electrones en la producción de vacunas a escala industrial. Algunas de las contrapartes del proyecto coordinado de investigación han emprendido iniciativas para desarrollar formulaciones secas de la vacuna irradiada con el fin de lograr la termoestabilidad, lo que ayudaría a suministrar la vacuna a zonas remotas sin tener que mantener la cadena de frío.

188. Aunque muchos avances de la tecnología de las vacunas irradiadas están solo en la fase de investigación, los descubrimientos ya hechos demuestran claramente la posibilidad de aplicar esta tecnología para desarrollar vacunas eficaces contra numerosos virus, bacterias y parásitos patógenos. La inversión en esta tecnología ayudará a controlar muchas enfermedades y podría tener un impacto importante en la salud y en la economía de los países en desarrollo.



*Fig. D-3. La tecnología de la radiación se puede aplicar para desarrollar nuevas vacunas y para aumentar la eficacia e inocuidad de las ya existentes. (Fuente: OIEA/FAO)*



*Fig. D-4. Una científica de la República Islámica del Irán prepara una vacuna irradiada (izquierda), mientras que otra (derecha), en el Sudán, extrae sangre de una oveja para evaluar la eficacia de una vacuna. (Fotografías: cortesía de Farahnaz Motamedi-Sedeh, Instituto de Investigaciones de Ciencias y Tecnologías Nucleares, República Islámica del Irán, y Mihad Alawad, Laboratorio Central de Investigaciones Veterinarias, Sudán)*

### **D.3. Marcas multiisotópicas para localizar las fuentes de los contaminantes agrícolas y su recorrido desde los suelos hasta los cuerpos de agua**

189. El Organismo está trabajando actualmente en la elaboración de protocolos y directrices para localizar las fuentes de contaminantes agrícolas, y en el desarrollo de prácticas innovadoras de gestión del suelo y el agua para reducir esos contaminantes en el medio ambiente.

190. La contaminación agrícola de los ríos y cursos de agua tiene efectos negativos en la salud humana, la biodiversidad y la pesca. La expansión e intensificación de los sistemas agrícolas en respuesta a la demanda cada vez mayor de alimentos llevan con frecuencia al uso exagerado y equivocado de productos agroquímicos tales como los fertilizantes orgánicos e inorgánicos y los plaguicidas. En todo el mundo, la alta producción agrícola ha sido posible principalmente gracias al uso intensivo de productos agroquímicos, y el riego ha contribuido al transporte de los contaminantes agrícolas del suelo a los cuerpos de agua. En la mayoría de los países de ingresos altos y en muchas economías emergentes, la contaminación agrícola ya supera la producida por los hogares y las industrias y es la principal causa de degradación de las aguas continentales y costeras. En la Unión Europea, el 38 % de los cuerpos de agua están sometidos a una contaminación agrícola importante<sup>11</sup> (fig. D-5). En los Estados Unidos de América, la agricultura es la principal fuente de contaminación de los ríos y cursos de agua, la segunda más importante en el caso de los humedales y la tercera en el de los lagos.<sup>12</sup>

191. Una carencia importante en los conocimientos sobre la contaminación en los ecosistemas agrícolas es la falta de información acerca de la localización y la contribución relativa de las distintas fuentes, un ámbito en que se requieren más datos e investigaciones y una mayor integración de los enfoques utilizados. La determinación de la ubicación y la contribución relativa de esas fuentes es esencial para que los gobiernos y organismos nacionales puedan elaborar políticas y prácticas de gestión apropiadas y aplicar respuestas acertadas. Cuando un ecosistema agrícola recibe contaminantes de múltiples fuentes, las técnicas tradicionales como la cuantificación del elemento contaminante y el balance de

<sup>11</sup> WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas) (2015). *Informe de las Naciones Unidas sobre los Recursos Hídricos en el Mundo 2015: Agua para un Mundo Sostenible*. París, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

<sup>12</sup> US EPA (United States Environmental Protection Agency) (2016). Water Quality Assessment and TMDL Information, [https://ofmpub.epa.gov/waters10/attains\\_index.home](https://ofmpub.epa.gov/waters10/attains_index.home).

masas no son eficaces para evaluar la contribución relativa de las diferentes fuentes. Por lo tanto, se necesitan enfoques complementarios para subsanar estas lagunas. Como complemento de los enfoques convencionales, los isótopos estables de los principales elementos químicos son una herramienta clave para caracterizar y cuantificar las fuentes y el transporte de los solutos a través del suelo y de los cuerpos de agua en los ecosistemas agrícolas.

192. Los isótopos estables de los elementos químicos nitrógeno, carbono, oxígeno, azufre e hidrógeno han sido utilizados con éxito para rastrear y monitorizar las fuentes y el transporte de solutos y de agua en los ecosistemas agrícolas.<sup>13</sup> Los estudios han demostrado que la firma isotópica de cada elemento depende de manera inequívoca del origen de la fuente contaminante y, por lo tanto, permite identificar la fuente con exactitud. Para rastrear y monitorizar las fuentes de fósforo, un fertilizante fundamental que aumenta la productividad agrícola, y su transporte del suelo a los cuerpos de agua, se emplea la firma del isótopo oxígeno 18 en el fosfato inorgánico ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{PO}_4}$ ). La aplicación del análisis isotópico por compuestos (CSIA) a los microcontaminantes se basa en la capacidad de monitorizar los cambios en los isótopos estables de los compuestos que ocurren entre las fuentes y los lugares a los que son transportados, para cuantificar así el grado de conversión química o bioquímica que tiene lugar en los ecosistemas agrícolas.<sup>14,15,16</sup> Las múltiples fuentes de contaminantes de los ecosistemas agrícolas podrían presentar firmas isotópicas parcialmente coincidentes, lo que dificultaría, o incluso impediría, su identificación y la determinación de su contribución relativa con un solo trazador isotópico.

193. Para la caracterización completa de las múltiples fuentes posibles de macronutrientes y microcontaminantes en los ecosistemas agrícolas complejos se requiere un enfoque integrado que utilice diversos trazadores. Las firmas de los isótopos estables del carbono, el oxígeno, el nitrógeno y el azufre en los solutos caracterizan la contribución proporcional de diferentes fuentes, mientras que los isótopos estables del hidrógeno y el oxígeno en las moléculas de agua caracterizan el ciclo del agua (las fuentes de agua y las pérdidas por evaporación). Este enfoque integrado del análisis de los solutos y el agua permite separar las vías de dispersión de los contaminantes y de flujo del agua. La ventaja de las técnicas de los isótopos estables es que ofrecen una alternativa analítica barata a la monitorización completa a escala real, que por lo general es laboriosa, lleva mucho tiempo y requiere una infraestructura bien establecida. Por consiguiente, la División Mixta FAO/OIEA ha iniciado un proyecto coordinado de investigación destinado a elaborar y validar directrices sobre el uso de múltiples isótopos estables como trazadores para monitorizar los nutrientes y contaminantes del suelo y el agua derivados de la agricultura a escala de campo y de paisaje.

194. Integrado con las técnicas convencionales, este enfoque debería facilitar la adopción de medidas de rehabilitación apropiadas en los Estados Miembros y dar lugar a prácticas mejores y más sostenibles de ordenación de las tierras.

---

<sup>13</sup> Skrzypek G., Mydłowski A., Dogramaci S., Hedley P., Gibson J.J., Grierson P.F. (2015). Estimation of evaporative loss based on the stable isotope composition of water using Hydrocalculator. *Journal of Hydrology* 523: 781-789. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.010>.

<sup>14</sup> Tamburini F., Pfahler, V., von Sperber, C., Frossard E., Bernasconi, S.M. (2014). Oxygen isotopes for unravelling phosphorous transformations in the soil-plant systems: A review. *Soil Science Society of America Journal* 78: 38-46.

<sup>15</sup> Granger, S.J., Harris, P., Peukert, S., Gou, R., Tamburini, F., Blackwell, M.S.A., Howden, J.K., McGrath, S. (2017). Phosphate stable oxygen isotope variability within a temperate agricultural soil. *Geoderma* 285: 64-75.

<sup>16</sup> Elsner M., Imfeld, G. (2016). Compound-specific isotope analysis (CSIA) of micro pollutants in the environment - current developments and future challenges. *Curr. Opin. Biotechnol.* 41:60-72.



Fig. D-5. Izquierda: Representación esquemática de los contaminantes derivados de la agricultura en un ecosistema agrícola. (Fotografía: Gwenaël Imfeld, CNRS, Francia). Derecha: Efecto de los contaminantes en la calidad del agua del delta del Danubio. (Fotografía: OIEA/FAO)

## E. Salud humana

### E.1. Radioterapia estereotáctica: Una técnica de radioterapia de alta precisión

195. La radiocirugía estereotáctica (SRS) es una técnica radiológica no quirúrgica avanzada que permite administrar radiación enfocada con gran precisión en tumores y algunas anomalías funcionales del cerebro. La radioterapia estereotáctica corporal (SBRT), denominada a veces radioterapia ablativa estereotáctica (SABR), es una extensión de la misma técnica que administra radiación en lugares extracraneales del cuerpo.

196. En la SRS o la SBRT, la dosis completa se administra en una o varias sesiones, hasta un máximo de cinco, mientras que en la radioterapia convencional la dosis se administra en una serie de pequeñas fracciones diarias a lo largo de varias semanas. Ambas técnicas son alternativas importantes a la cirugía invasiva, particularmente en el caso de los pacientes que no pueden someterse a una operación y en el de los tumores y las anomalías a los que es difícil llegar o que están cerca de órganos vitales. No hay incisión, las molestias son mínimas, los tiempos de recuperación son menores, y se evitan la mayoría de los riesgos relacionados normalmente con la cirugía, como la infección.

197. Para aplicar la SRS y la SBRT se requieren conocimientos especializados sobre la parte del cuerpo afectada por la enfermedad y sobre el uso del equipo. Por consiguiente, su aplicación debería basarse en un flujo de trabajo diseñado específicamente para la localización anatómica y el equipo de que se trate.

#### E.1.1. Requisitos técnicos

198. Un programa de SRS o SBRT requiere una dotación de personal adecuada para evitar todo daño y garantizar la calidad. En estas técnicas, el margen de error permitido es menor que en la radioterapia convencional, porque se emplean dosis más altas en cada fracción, y hay menos fracciones. Por lo tanto, el aparato utilizado para administrar el tratamiento debe cumplir los requisitos técnicos más estrictos, incluidos los referentes a la tolerancia mecánica y la puesta en servicio. Antes del tratamiento real, el proceso completo se ensaya de principio a fin en un maniquí. La SRS y la SBRT comprenden normalmente la obtención de imágenes, la inmovilización, y la planificación y administración del tratamiento, como se describe a continuación.

### **Obtención de imágenes en tres dimensiones y localización del tumor en cuatro dimensiones**

199. Las imágenes de alta resolución definen la localización, el tamaño y la forma del tumor, ayudan a determinar las coordenadas exactas del blanco (el tumor) en el cuerpo y orientan la planificación del tratamiento. Para obtenerlas se utilizan la tomografía computarizada (TC), la resonancia magnética (RM) y la tomografía por emisión de positrones (PET)/TC. Las imágenes de referencia se obtienen en general con una tomografía computarizada, que proporciona información exacta sobre la densidad de electrones y suele tener una distorsión espacial muy baja. Para muchos blancos de la SBRT, como el pulmón y el abdomen, la herramienta de imagenología preferida es la PET/TC, y para las lesiones cerebrales y hepáticas se emplea sobre todo la RM; estas dos técnicas permiten diferenciar, mejor que con una TC, entre los tejidos normales y anormales.

### **Inmovilización, posicionamiento y mantenimiento de la posición del paciente**

200. Durante la obtención de imágenes y el tratamiento, la posición del tumor puede variar debido a la respiración o a movimientos corporales, o a cambios en la forma y el tamaño del propio tumor. Como este tipo de tratamiento requiere una exactitud milimétrica, se necesitan dispositivos específicos y adaptados a cada paciente para inmovilizarlo y reducir así al mínimo el movimiento del blanco durante el tratamiento. Existen muchos métodos para determinar, manejar y monitorizar el movimiento respiratorio durante la SBRT, entre ellos la TC lenta, la TC en cuatro dimensiones, la compresión abdominal, la sincronización y las técnicas de retención de la respiración. La imagenología por TC en cuatro dimensiones permite reconstruir el volumen de un blanco interno teniendo en cuenta la posición del tumor en todas las fases del ciclo respiratorio. También es posible hacer un seguimiento dinámico del blanco en tiempo real.

### **Haces de rayos $\gamma$ o rayos X muy focalizados**

201. La SRS y la SBRT pueden administrarse con un acelerador lineal, un bisturí de rayos  $\gamma$  o un acelerador de partículas cargadas. Los aceleradores lineales permiten tratar tumores grandes en una sola sesión (SRS) o en sesiones múltiples (radioterapia estereotáctica).

202. El bisturí de rayos  $\gamma$  fue inventado en Suecia en 1951 por Leksell, un neurocirujano sueco, y fue el primer dispositivo utilizado para practicar la SRS. Tiene varias fuentes de cobalto que emiten haces de rayos  $\gamma$  muy focalizados hacia la región blanco. Es ideal para tratar lesiones intracraneales de pequeñas a medianas, por lo general de menos de 4 cm, prestando atención a evitar las dosis altas en estructuras como el ojo y las vías ópticas y el tronco encefálico.

203. La principal ventaja de la SRS con partículas cargadas pesadas (protones) es que los haces se detienen a una profundidad que se relaciona con la energía. La ausencia de una dosis de salida y el nítido perfil del haz de protones permiten utilizar una irradiación focalizada con una dosis integral menor que la que se administra en la irradiación con fotones. Esta forma de tratamiento es cara.

### **E.1.2. Personal requerido**

204. Para practicar la SRS o la SBRT se necesita un equipo profesional multidisciplinario y altamente cualificado que comprenda radiooncólogos, físicos médicos, técnicos de radioterapia, radiólogos, neurocirujanos y neurólogos. Los radiooncólogos dirigen el grupo encargado del tratamiento; a veces, los neurocirujanos participan en la dirección del grupo.

205. El radiooncólogo define el contorno del blanco que se habrá de tratar, diferenciándolo de los tejidos normales, prescribe la dosis de radiación adecuada, aprueba el plan de tratamiento e interpreta los resultados de los procedimientos radioquirúrgicos. El físico médico vela por que se administre la dosis de radiación precisa; con ese fin, utiliza un sistema de planificación del tratamiento computarizado que le permite elaborar los planes de tratamiento y calcular el tiempo de exposición y la configuración del haz para tratar el blanco o los blancos con la dosis prescrita. El técnico de radioterapia posiciona al paciente en la mesa de tratamiento y maneja el aparato.

### **E.1.3. Indicaciones**

206. Muchos trastornos benignos, malignos y funcionales del cerebro se tratan con SRS. La SBRT se ha empleado para una gran variedad de indicaciones, como el cáncer de pulmón en su fase inicial en pacientes no operables o que rechazan la cirugía, las metástasis pulmonares, el cáncer primario de hígado, las metástasis hepáticas, el cáncer de próstata limitado al órgano, el cáncer de páncreas, las metástasis suprarrenales, el cáncer primario de riñón en pacientes no operables, determinadas metástasis de ganglios linfáticos intratorácicas e intraabdominales, cánceres primarios y recidivantes de cabeza y cuello, tumores de médula espinal y metástasis vertebrales.

207. Después del tratamiento, los tumores benignos pueden tardar entre 18 meses y 2 años en disminuir de tamaño, mientras que los tumores malignos o metastásicos se reducen con más rapidez. Muchos tumores se mantienen estables e inactivos, sin variaciones, y con el tiempo se estabilizan o remiten. Al ser opciones terapéuticas no lesivas y que por lo general se realizan en forma ambulatoria en un día o en una semana como máximo, la SRS y la SBRT pueden no solo ahorrar recursos hospitalarios sino también permitir a los pacientes reanudar sus actividades diarias ordinarias con más rapidez. Los efectos secundarios del tratamiento dependen de la localización del tumor y de la dosis utilizada. Afortunadamente, los efectos secundarios previstos de la SRS y la SBRT están dentro de los límites aceptables.

### **E.1.4. Contribuciones del Organismo**

208. En 2014, el Organismo puso en marcha un proyecto coordinado de investigación consistente en un estudio aleatorizado de la SBRT en comparación con la quimioembolización transarterial en el carcinoma hepatocelular. En este estudio participan 11 centros oncológicos de la región de Asia y el Pacífico, África y Europa. Además, el Organismo está apoyando un proyecto regional de aplicación clínica de la SBRT y ayudando a los Estados Miembros a poner en marcha o mejorar sus servicios de SBRT. Muchos radiooncólogos, físicos médicos y radioterapeutas de los países participantes han recibido capacitación en diversos aspectos de la SBRT, con inclusión de la garantía y el control de la calidad.

209. La SRS y la SBRT gozan de amplia aceptación y su uso va en aumento. Los resultados publicados de estudios clínicos correctamente realizados han afianzado su papel en diversos entornos clínicos. Además, la SRS y SBRT están siendo evaluadas en un gran número de ensayos clínicos, ya sea por sí solas o en combinación con fármacos dirigidos o inmunoterapia, en muchos cánceres primarios y secundarios. Los datos de los experimentos en animales muestran que la inmunoterapia puede potenciar la respuesta local del tumor a la radiación y que, a su vez, la administración de dosis altas de radiación puede potenciar los efectos sistémicos de la inmunoterapia, lo que hace que la SRS o la SBRT practicada junto con la inmunoterapia sea una combinación ideal. La SRS y la SBRT pueden ser tratamientos más eficaces en relación con el costo que la radioterapia convencional en muchos entornos clínicos.

## **E.2. Neuropsiquiatría: Revolución de la imagenología molecular en la enfermedad de Alzheimer**

### **E.2.1. Antecedentes**

210. La demencia es una enfermedad neurodegenerativa en gran parte irreversible que se caracteriza por el deterioro de la función mental; afecta a la memoria, el pensamiento, el comportamiento y la capacidad de realizar las actividades cotidianas. De los 47 millones de personas que se estima que tienen demencia en el mundo, dos tercios viven en países en desarrollo.

211. Los síntomas clínicos distintivos pueden ser difíciles de diagnosticar en las primeras fases; sin embargo, las técnicas nucleares pueden ayudar a detectar el proceso patológico de fondo varios años antes de que aparezcan los síntomas.

212. Hay muchos tipos diferentes de demencia; la enfermedad de Alzheimer es la más frecuente, y causa entre el 60 % y el 70 % de los casos a nivel mundial. Otros tipos comunes de demencia son la demencia vascular o multiinfarto, que representa aproximadamente el 25 % de los casos; la demencia con cuerpos de Lewy (el 15 % de los casos), y la demencia frontotemporal. La demencia puede deberse también a afecciones como la enfermedad de Parkinson, la sífilis y la enfermedad de Creutzfeldt–Jakob. Una persona puede tener más de un tipo de demencia.

213. Los trastornos como la enfermedad de Alzheimer, la más temida después del cáncer, representan una carga pesada en todo el mundo y tienen un impacto socioeconómico y médico considerable. La demencia es, en el mundo entero, una de las principales causas de discapacidad y dependencia entre las personas mayores.

214. Aunque no existe una cura conocida para la demencia, hay varios enfoques específicos para tratar los síntomas, planificar la atención y orientar a los cuidadores y familiares, según la causa del problema. Además, algunos medicamentos pueden ayudar en las fases iniciales, retrasando la evolución de la enfermedad; otras medidas pueden mejorar la calidad de vida de las personas con demencia y de quienes las cuidan. Así pues, para mejorar la atención de los pacientes es esencial un diagnóstico diferencial más temprano y exacto.

215. La demencia se diagnostica por lo general mediante una evaluación de la anamnesis y de los resultados de pruebas cognitivas concebidas para indicar la actividad intelectual, como el pensamiento, el razonamiento o la memoria. La detección de un posible deterioro cognitivo es el primer paso para decidir si un paciente debería someterse a una evaluación más a fondo.

### **E.2.2. Diagnóstico**

216. La medicina nuclear, conocida también como imagenología molecular, se ha desarrollado considerablemente en los últimos decenios. Desde la década de 1990, la imagenología del cerebro mediante tomografía por emisión de positrones (PET) con el radiofármaco fluorodesoxiglucosa (FDG) y la imagenología con tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT) de perfusión cerebral han sido fundamentales para el diagnóstico clínico de diversos trastornos cerebrales, entre ellos la enfermedad de Alzheimer y otras formas de demencia.

217. Los estudios por imagenología molecular son útiles en los casos complejos de demencia, y cuando están presentes también otras afecciones y no está claro sin más a qué enfermedad son atribuibles los síntomas. El accidente cerebrovascular es una afección concomitante frecuente. Puede influir en la función cerebral por sí mismo, y algunos de sus síntomas son parecidos a los de la demencia neurodegenerativa. La imagenología molecular permite a los médicos distinguir entre estas afecciones.

218. La PET es un medio de probada eficacia para evaluar a los pacientes con trastornos neurodegenerativos, especialmente para el diagnóstico de la demencia. El uso de fluorodesoxiglucosa (FDG) permite evaluar el metabolismo de la glucosa en el cerebro y, de ese modo, hacer un diagnóstico temprano adecuado o un diagnóstico diferencial, reconocer la demencia progresiva en las fases iniciales, vigilar la evolución de la enfermedad y evaluar la respuesta al tratamiento con medicamentos.

219. Los trazadores también abren nuevas perspectivas para el estudio de la neuropatología de fondo de la demencia, como la acumulación de proteínas amiloides y proteínas  $\tau$  y la presencia de trastornos inflamatorios o vasculares. La PET con diferentes trazadores ofrece biomarcadores fiables que pueden ayudar a los médicos a diagnosticar diversos trastornos causantes de demencia, especialmente en el caso de las enfermedades mixtas.

220. Recientemente, ha llegado a los entornos clínicos de muchos países la imagenología por PET de amiloides. Las PET de amiloides permiten detectar con exactitud, *in vivo*, las placas amiloides que indican uno de los procesos patológicos fundamentales de la enfermedad de Alzheimer. Esta tomografía, que capta de forma sumamente específica los depósitos de proteínas anormales en el cerebro, puede ayudar a mejorar las recomendaciones para el diagnóstico y el tratamiento. Su valor clínico se está evaluando actualmente mediante ensayos realizados en varios centros simultáneamente.

221. Otras técnicas nuevas de imagenología por PET son la evaluación de la proteína  $\tau$  y de la inflamación. La  $\tau$  es una proteína asociada a los microtúbulos que es esencial para la estabilidad y el funcionamiento neuronales, y cuya hiperfosforilación y agregación anómala están implicadas en varias enfermedades neurodegenerativas, conocidas como ‘taupatías’. La más común es la enfermedad de Alzheimer.

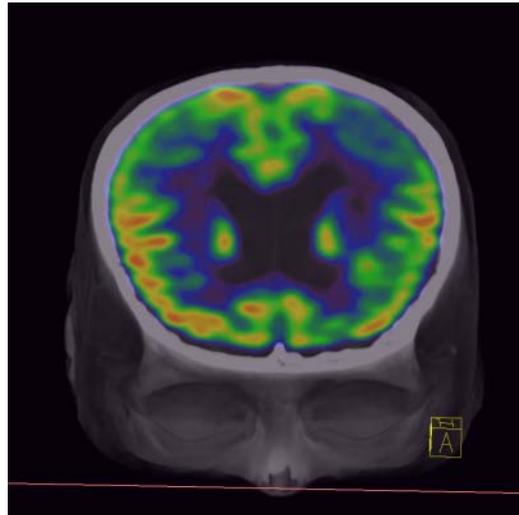
222. Estas técnicas no solo mejoran la atención cotidiana de los pacientes, sino que también proporcionan un conocimiento crucial del propio proceso patológico, lo que contribuirá a mejorar los avances terapéuticos.

### **E.2.3. Iniciativas y sensibilización a nivel mundial**

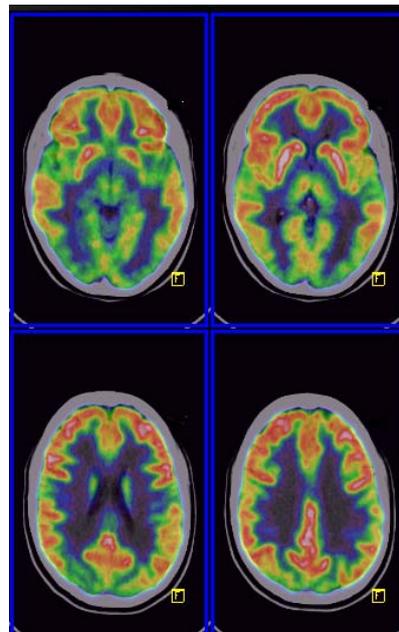
223. Hay varias iniciativas mundiales en curso para hacer frente a la carga que representa la demencia. Entre las más importantes cabe mencionar la definición de la demencia como una prioridad mundial, el rápido desarrollo de la neuroimagenología y la investigación médica de nuevos tratamientos. Además, algunas organizaciones están incluyendo la demencia en sus agendas, por ejemplo el G7, con su iniciativa titulada Acción Mundial contra la Demencia, la Conferencia Ministerial de la OMS sobre la Acción Mundial contra la Demencia y, más recientemente, la Fundación Bill y Melinda Gates.

224. El Organismo participa en trabajos y actividades para crear conciencia sobre la importancia de la demencia y de otras enfermedades neurológicas. Las actividades comprenden proyectos coordinados de investigación, cursos regionales de capacitación y talleres nacionales sobre la importancia de las técnicas de la medicina nuclear para obtener imágenes de las enfermedades cerebrovasculares y neurológicas, incluida la demencia. El Organismo ha creado el Consorcio de Neuroimagenología del OIEA con los objetivos de investigar la utilidad de la neuroimagenología con técnicas modernas como la PET/TC para diagnosticar correctamente el deterioro cognitivo leve, y determinar si la presencia de afecciones concomitantes, como la infección por el VIH, las enfermedades cerebrovasculares y el traumatismo craneoencefálico, da lugar a un diagnóstico menos exacto que en los pacientes sin esas afecciones. Actualmente hay pocas pruebas científicas sobre este subconjunto de pacientes; por lo tanto, la nueva información será útil para los Estados Miembros. Los talleres del Programa de estudios del OIEA para profesionales de la medicina nuclear, celebrados en la Escuela Superior de Medicina de la Universidad de Osaka en el Japón, se centraron en la importancia de las técnicas de la medicina nuclear para la imagenología de las enfermedades cerebrovasculares y neurológicas, como los tumores cerebrales, la epilepsia y la demencia. Se han celebrado también talleres de neuroimagenología para mejorar la competencia de los físicos de medicina nuclear en la interpretación de los estudios de neurología nuclear que incluyen las demencias en la Argentina, el Brasil, Eslovenia, Filipinas y Tailandia.

225. Para apoyar la formación médica continua, el sitio web del Campus de Salud Humana del Organismo tiene una sección dedicada a la neuroimagenología, que ofrece a los visitantes casos didácticos, conferencias, una bibliografía recomendada y directrices, una guía para preparar los informes de las exploraciones médicas y materiales didácticos utilizados en los cursos de capacitación del Organismo.



*Fig. E-1. Reconstrucción volumétrica de un estudio con PET/TC en una paciente diabética de 65 años con la enfermedad de Alzheimer. En el estudio de medicina nuclear con PET/TC se empleó FDG con  $^{18}\text{F}$  para determinar el tipo de demencia y el avance de la enfermedad. (Fotografías: Dr. Iván Díaz, Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía de México)*



*Fig. E-2. Paciente varón de 75 años con antecedentes de hipertensión y signos clínicos de demencia. En el estudio de medicina nuclear con PET/TC se empleó FDG con  $^{18}\text{F}$  para determinar el tipo de demencia y el avance de la enfermedad. Las imágenes confirman los cambios causados por la enfermedad de Alzheimer. (Fotografías: Dr. Iván Díaz, Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía de México)*

## **F. Medio ambiente**

### **F.1. Técnicas nucleares en la investigación sobre los plásticos marinos**

226. Los océanos cubren más del 70 % de la superficie de la Tierra, y contribuyen sin duda alguna a mantener un clima favorable a la vida y a mitigar algunos de los efectos negativos del cambio climático. Con una buena ordenación de sus recursos, los océanos pueden hacer asimismo una contribución

importante a la creación de empleo y al sustento de grandes sectores de la población mundial. Lamentablemente, los océanos son también el repositorio final de buena parte de la contaminación de origen terrestre, incluidas las diversas descargas agrícolas, municipales e industriales de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Como consecuencia de esas actividades, los océanos están ahora plagados de fragmentos plásticos de todos los tamaños, y los animales marinos como los organismos bentónicos, el zooplancton, los moluscos, los peces, las aves marinas y las ballenas pueden ingerir las partículas más pequeñas. Mientras que el impacto visible y muy mediático de los macroplásticos en los organismos marinos está bien documentado, el daño que pueden causar los microplásticos, definidos normalmente como las partículas de diámetro inferior a 5 mm,<sup>17,18</sup> está mucho menos claro (fig. F-1).



*Fig. F-1. Los residuos plásticos, incluidos los microplásticos, están ya por todas partes en el océano y pueden ser ingeridos por diversos organismos marinos, bioacumularse en ellos y plantear un riesgo para la salud humana. Fotografía: cortesía de J.L. Teyssie/OIEA.*

227. Con el fin de respaldar el desarrollo de mejores estrategias y herramientas de mitigación, el Organismo está utilizando técnicas nucleares e isotópicas para evaluar el impacto de los factores de estrés comunes y nuevos, incluidos los efectos de los plásticos en los organismos marinos. Actualmente se están desarrollando técnicas de ese tipo para cuantificar el movimiento de los microplásticos marinos y los contaminantes orgánicos conexos dentro de los ecosistemas marinos y costeros y en sus redes alimentarias interconectadas. Algunos contaminantes orgánicos del agua del mar se adhieren firmemente a las superficies de los plásticos; estos microplásticos y los contaminantes que transportan plantean una amenaza adicional para los organismos marinos.<sup>19</sup> Las técnicas nucleares permiten estudiar la ‘cinética de sorción’, o la forma en que los contaminantes orgánicos se adhieren a los microplásticos, así como los procesos y la velocidad de degradación de esos contaminantes. Utilizados en acuarios experimentales controlados, estos métodos proporcionan datos cuantitativos que brindan una oportunidad sin igual de comprender las repercusiones biológicas de los microplásticos marinos.

228. Los plásticos marinos son polímeros orgánicos sintéticos que en general son baratos de producir y, por diseño, sumamente duraderos. Con el tiempo, todos los plásticos se vuelven quebradizos y se parten en fragmentos más pequeños, que pueden seguirse degradando si están expuestos a una radiación ultravioleta sostenida. Los polímeros más abundantes que se encuentran en el océano son el polietileno

<sup>17</sup> Andrady, A.L., Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* 62, 1596-1605. En la sección F hay varias referencias a esta publicación.

<sup>18</sup> United Nations Environment Programme, *Marine plastic debris and microplastics – Global lessons and research to inspire action and guide policy change*. UNEP, Nairobi (2016). En la sección F hay varias referencias a esta publicación.

<sup>19</sup> Law, K.L., Thompson, R.C., Microplastics in the seas. *Science* 345, 144-145. En la sección F hay varias referencias a esta publicación.

de alta y baja densidad, el policloruro de vinilo, el poliestireno, el polipropileno y el tereftalato de polietileno. Juntos, estos polímeros representan más del 95 % de la producción mundial de plásticos.<sup>20</sup> Puesto que están diseñados específicamente para resistir a la corrosión, la mayoría de estos plásticos se consideran “de difícil degradación” y persisten en el medio marino por 100 años o más.

229. Las partículas de microplásticos están presentes en numerosos organismos marinos, también en especies que utilizamos y consumimos en nuestra alimentación habitual, como muchos moluscos y peces de aleta. Debido a su pequeño tamaño, estas partículas plásticas pueden depositarse en determinados órganos internos y convertirse así en vectores eficaces de la transferencia química de los contaminantes.<sup>21</sup> Además de los efectos adversos causados por la simple ingestión de los microplásticos, pueden producirse también efectos tóxicos secundarios cuando los contaminantes adheridos se disocian de los microplásticos dentro de los órganos y experimentan transformaciones bioquímicas (fig. F-2). Un ejemplo de un efecto biológico adverso de los microplásticos es la interferencia endocrina (es decir, la expresión génica alterada) que se ha observado en algunos peces que habían ingerido inadvertidamente compuestos plásticos.<sup>22</sup> Aún hay lagunas importantes en la comprensión del destino y la toxicidad de los microplásticos y los contaminantes conexos en el ser humano, y las nuevas investigaciones del Organismo procurarán colmarlas.



*Fig. F-2. La ingestión de microplásticos por la biota marina, como los mejillones, los gusanos, los peces y los organismos zooplanctónicos (como el que se muestra en la fotografía) es aún un campo poco estudiado. Cole, M. et al. (2013). Microplastic ingestion by zooplankton, Environ. Sci. Technol., 2013, 47 (12), págs. 6646 a 6655.*

---

<sup>20</sup> Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T.S., Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin* 62, 2588-2597.

<sup>21</sup> Engler, R.E., The Complex Interaction between Marine Debris and Toxic Chemicals in the Ocean. *Environmental Science and Technology* 46, 12302–12315.

<sup>22</sup> Lusher, A.L., Hollman, P.C.H., Mendoza-Hill, J.J., Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 615, Rome.

230. Las técnicas nucleares de laboratorio proporcionarán nueva información fundamental sobre las interacciones y los efectos de una amplia variedad de micropartículas plásticas y los contaminantes tóxicos conexos, incluidos los contaminantes orgánicos persistentes (COP) y elementos traza como el mercurio, el cadmio y el plomo.

231. Los radioisótopos ofrecen un método sin paralelo para cuantificar el movimiento y los efectos biológicos de los microplásticos y los contaminantes conexos. Se pueden concebir experimentos que utilicen radioisótopos como trazadores de los microplásticos, en las concentraciones ambientales y con los organismos marinos de importancia comercial. De esta forma, con una partícula de microplástico radiomarcada es posible reunir información sobre las tasas reales de captación en los organismos, y sobre los procesos de degradación de los microplásticos con el tiempo. Además, estas técnicas de marcado isotópico pueden utilizarse para determinar cuantitativamente las transformaciones bioquímicas dentro de los organismos y, finalmente, la biocinética de la depuración.

232. Para completar el cuadro, pueden emplearse métodos analíticos complementarios, como la espectrometría de masas por compuestos o la espectrometría de masas con plasma acoplado por inducción de alta resolución, que utilizan la firma isotópica de los contaminantes para rastrear sus fuentes y sus rutas. Por consiguiente, la aplicación de técnicas isotópicas y nucleares puede ofrecer una oportunidad sin paralelo de estudiar aspectos importantes de las repercusiones biológicas de los microplásticos que aún no están claros, como los posibles efectos en las especies acuáticas en diferentes fases de su ciclo de vida; los efectos en las poblaciones, las comunidades y los ecosistemas; la cinética de la internalización (por ejemplo, la transferencia a través de la pared intestinal); y el papel de los microplásticos como importantes vectores de exposición y de bioacumulación de los contaminantes orgánicos persistentes y los metales traza adsorbidos.

233. La información que se reúna con esta nueva investigación permitirá entender mejor los efectos de los microplásticos y los contaminantes orgánicos conexos en los organismos marinos de importancia para la sociedad y el comercio, y ayudará a los Estados Miembros a fortalecer sus programas de inocuidad y seguridad de los alimentos de origen marino, que deben basarse en una vigilancia exacta y oportuna de la salubridad de los alimentos.

## **G. Producción de radioisótopos y tecnologías de la radiación**

### **G.1. Terapia con partículas $\alpha$ : Nuevas aplicaciones terapéuticas de radiofármacos con emisores $\alpha$**

234. Los radiofármacos terapéuticos contienen radioisótopos emisores de partículas energéticas que depositan su energía con bastante rapidez en la materia con la que se encuentran, una propiedad que se conoce con el nombre de alta transferencia lineal de energía (TLE). La distancia que recorren las partículas emitidas y la tasa a la que depositan su energía en la materia dependen de la energía y la masa de la partícula. Las partículas  $\beta$ , que son esencialmente electrones, tienen un recorrido mucho más largo que las partículas  $\alpha$  de igual energía. En otras palabras, las partículas  $\alpha$ , que tienen una masa casi 7300 veces superior a la de los electrones, depositan su energía a una distancia mucho menor que las partículas  $\beta$  de la misma energía. Por lo tanto, la TLE de las partículas  $\alpha$  es mucho mayor que la de las partículas  $\beta$ .

235. La primera generación de radiofármacos terapéuticos, marcados con radioisótopos emisores de partículas  $\beta$ , como el yodo 131, se ha utilizado por decenios para el tratamiento del cáncer y de otras enfermedades. Aunque las partículas  $\beta$  destruyen eficazmente las células cancerosas debido a su largo recorrido, que en el tejido es del orden de algunos milímetros, pueden también dañar las células sanas

vecinas, incluso en condiciones optimizadas. Por otra parte, las partículas  $\alpha$  tienen una mayor TLE y un recorrido más corto en el tejido vivo, por lo general de solo unos cuantos micrómetros. Por ello, son una opción mejor para irradiar específicamente las células blanco, que suelen medir algunos micrómetros. La terapia radiofarmacéutica con partículas  $\alpha$  sería un método eficaz si el radiofármaco emisor de esas partículas se encontrara cerca del núcleo de la célula blanco, que se considera la diana subcelular. El reto consiste, pues, en colocar el emisor  $\alpha$  suficientemente cerca de las células blanco para causar el daño específico deseado.

236. En el cuadro 1 se enumeran varios radionucleidos emisores de partículas  $\alpha$  que podrían utilizarse en radiofármacos. Los numerosos esfuerzos realizados en los últimos decenios para desarrollar radiofármacos eficaces basados en la emisión de partículas  $\alpha$  han dado algunos resultados muy prometedores.

Cuadro G-1. Radionucleidos emisores de partículas  $\alpha$  y sus aplicaciones

Radionucleido	Período de semidesintegración	Producción	Aplicación
Ac 225	10 días	Cadena de decaimiento del U 233 Th 229 (decaimiento $\alpha$ ) Ra 226 (p, 2n)	Radioterapia con péptidos
Ra 224	3,66 días	Th 228 (decaimiento $\alpha$ )	Terapia paliativa en pacientes con cáncer de mama y de próstata y metástasis óseas
Ra 223	11,4 días	Cadena de decaimiento del Ac 227 Th 227 (decaimiento $\alpha$ )	
Bi 213	45,6 minutos	Cadena de decaimiento del Ac 227 Generador de Ac/Bi	Radioterapia con péptidos
Bi 212	60 minutos	Cadena de decaimiento del Ac 227 Generador de Ra-Bi/Pb	Radioterapia con péptidos (posible)
At 211	7,2 horas	Bi 209 ( $\alpha$ , 2n)	Radioinmunoterapia

### G.1.1. Radio 223

237. El cloruro de radio 223 es uno de los radiofármacos emisores de partículas  $\alpha$  de la primera generación. Es un radiofármaco atractivo porque es una molécula química inorgánica simple que es fácil de preparar y entender. En 2013, la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos aprobó el uso de cloruro de radio 223 en el alivio del dolor óseo, y desde entonces este radiofármaco está disponible en el comercio con el nombre de Xofigo. El radio, que químicamente es parecido al calcio, se acumula con gran eficiencia en el tejido óseo en forma natural. El cloruro de radio 223 da resultados excelentes como radiofármaco terapéutico para el alivio del dolor en pacientes con metástasis óseas. Actualmente se utiliza en el manejo de pacientes con cáncer de próstata u ovárico y con metástasis. Sin embargo, el reducido número de productores y la complejidad técnica de la producción de radio 223 limitan la disponibilidad, aumentan el precio y reducen la accesibilidad en la mayoría de los países, especialmente en el mundo en desarrollo.

### G.1.2. Generador de actinio 225/bismuto 213

238. La experiencia con el cloruro de radio 223 impulsó la investigación encaminada a desarrollar radiofármacos que pudieran utilizarse para tratar tumores distintos de las metástasis óseas con ayuda de moléculas portadoras tales como péptidos y anticuerpos. La búsqueda de un radionucleido emisor  $\alpha$  polivalente que pudiera emplearse para marcar péptidos o anticuerpos llevó a estudiar el bismuto 213, un emisor  $\alpha$  con un período de semidesintegración de 45,6 minutos, como posible radionucleido 'teranóstico', es decir, con funciones diagnósticas y terapéuticas. Habida cuenta del breve período de semidesintegración y de las limitaciones de la producción directa de bismuto 213, un generador de actinio 225/bismuto 213 es la mejor opción para producir bismuto 213 utilizable en las radiofarmacias hospitalarias. El generador de actinio 225/bismuto 213 está disponible con una alta actividad específica y, debido a sus propiedades físicas y químicas favorables, se está utilizando ya en un gran número de estudios con voluntarios sanos y en varios ensayos clínicos. Este sistema demuestra la viabilidad, inocuidad y eficacia terapéutica del tratamiento con partículas  $\alpha$  dirigidas que utiliza péptidos y moléculas inmunitarias como agentes portadores.<sup>23</sup> Los métodos para producir actinio 225 utilizando un generador de radionucleidos de actinio 225/bismuto 213 han demostrado su eficacia en algunos institutos de investigación. Sin embargo, el generador aún no está ampliamente disponible, debido al reducido número de fabricantes. La producción actual en los institutos de investigación cubre apenas la limitada demanda para los ensayos clínicos en curso.<sup>24</sup> Se necesitan una evaluación del mercado y un estudio general de la demanda para aclarar cuál será la demanda comercial efectiva.

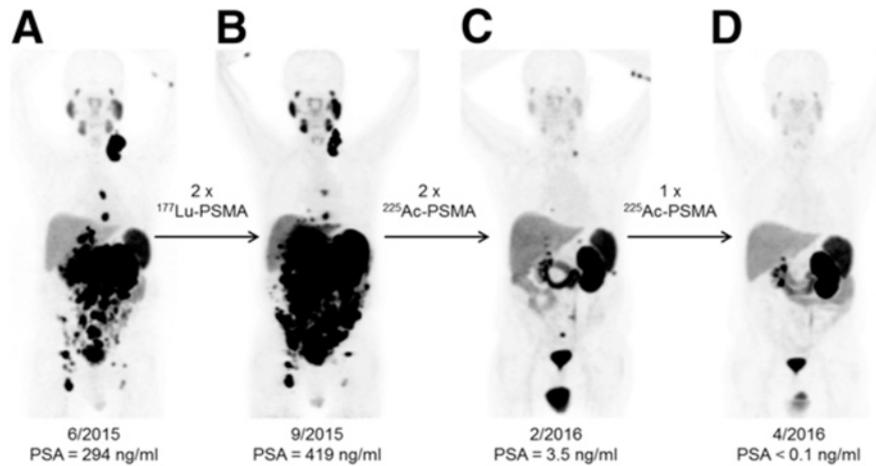
### G.1.3. Actinio 225

239. Recientemente, el uso del marcado directo con actinio 225 en aplicaciones clínicas ha demostrado su gran potencial como radiofármaco teranóstico. Se ha empleado actinio 225 unido a una porción portadora que lo lleva hasta las células del cáncer de próstata, el antígeno prostático específico de membrana (PSMA), para tratar a pacientes con cáncer de próstata en fase avanzada. Los resultados (que se muestran en la figura G-1) han despertado el interés por este radiofármaco en todo el mundo. Uno de los problemas de la preparación y distribución del PSMA con actinio 225 es la producción y disponibilidad de este radioisótopo, porque todas las vías de producción tienen algunos inconvenientes. Para satisfacer la demanda potencialmente alta de actinio 225 prevista en el futuro próximo, habrá que resolver esos inconvenientes. Los Laboratorios Nacionales Canadienses están construyendo un generador basado en torio 229 con capacidad para producir decenas de mCi de actinio 225 al año.

---

<sup>23</sup> Morgenstern, A., Bruchertseifer, F., Apostolidis, C., Bismuth-213 and actinium-225 -- generator performance and evolving therapeutic applications of two generator-derived alpha-emitting radioisotopes, *Curr Radiopharm.* 5(3) (2012) 221-227.

<sup>24</sup> McDevitt, M.R. *et al.*, An <sup>225</sup>Ac/<sup>213</sup>Bi generator system for therapeutic clinical applications: construction and operation, *Appl Radiat Isot.* 50 (1999) 895-904.



*Fig. G-1. Las PET/TC con  $^{68}\text{Ga}$ -PSMA-11 de un paciente muestran una progresión del tumor (B) en la reestadificación después de 2 ciclos de tratamiento con  $^{177}\text{Lu}$ -PSMA-617 emisor de partículas  $\beta$ , en comparación con la propagación inicial del tumor (A). En cambio, la reestadificación después de los ciclos segundo (C) y tercero (D) con  $^{225}\text{Ac}$ -PSMA-617 emisor de partículas  $\alpha$  mostró una respuesta impresionante.<sup>25</sup>*

#### G.1.4. Astató 211

240. Otro emisor  $\alpha$  muy conocido que tiene propiedades adecuadas para su uso como radiofármaco es el astató 211. La producción del astató 211 como radionucleido de un halógeno tiene limitaciones que se deben a la necesidad de utilizar ciclotrones aceleradores de partículas  $\alpha$  que rara vez están disponibles, a los bajos rendimientos y a la escasa eficacia del marcado. Esto ha limitado su aplicación en el último decenio.<sup>26</sup> Hasta ahora, no se ha informado de ningún ensayo clínico de radiofármacos que utilicen este radionucleido. Por consiguiente, el reto de superar los problemas de producción y disponibilidad y de facilitar el establecimiento de un proceso de producción radiofarmacéutica sistemática sigue vigente.<sup>27</sup>

241. Los éxitos recientes en el uso de radiofármacos emisores de partículas  $\alpha$  han despertado el interés en utilizar estas moléculas para el tratamiento del cáncer. El estudio sostenido de su uso en todo el mundo será útil y oportuno.

<sup>25</sup> Clemens Kratochwil, C. *et al.*,  $^{225}\text{Ac}$ -PSMA-617 for PSMA-Targeted  $\alpha$ -Radiation Therapy of Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer, *J Nucl Med* 57 (2016) 1941–1944.

<sup>26</sup> Elgqvist, J., Targeted alpha therapy: part I. *Curr Radiopharm.* 4 3 (2011) 176.

<sup>27</sup> OIEA, Report of the Technical Meeting on Alpha emitting radionuclides and radiopharmaceuticals for therapy (2013) [http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/working\\_materials/TM-44815-report-Alpha-Therapy.pdf](http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/working_materials/TM-44815-report-Alpha-Therapy.pdf).



**IAEA**

Organismo Internacional de Energía Atómica

[www.iaea.org](http://www.iaea.org)

Organismo Internacional de Energía Atómica  
Vienna International Centre, P.O. Box 100  
1400 Viena, Austria  
Teléfono: (+43-1) 2600-0  
Fax: (+43-1) 2600-7  
Correo electrónico: [Official.Mail@iaea.org](mailto:Official.Mail@iaea.org)

GC(62)/INF/2