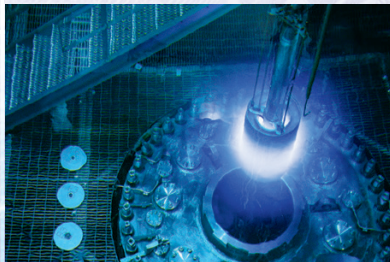
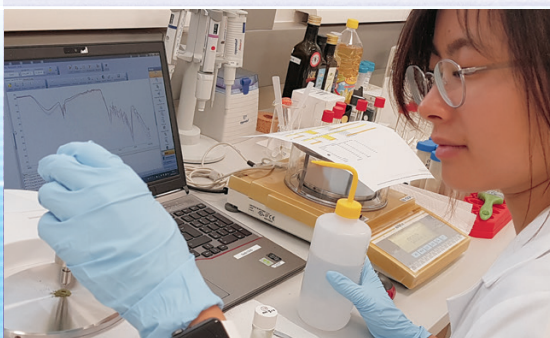
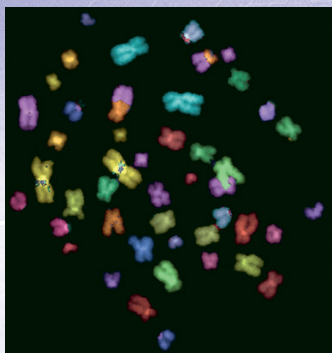


# EXAMEN DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR DE

2020



**IAEA**

Organismo Internacional de Energía Atómica





EXAMEN DE LA  
TECNOLOGÍA NUCLEAR DE 2020

GC(64)/INF/2

Examen de la Tecnología Nuclear de 2020

IAEA/NTR/2020

Impreso por el OIEA en Austria  
Septiembre de 2020



# Prefacio

En respuesta a lo solicitado por los Estados Miembros, la Secretaría elabora cada año un amplio *Examen de la Tecnología Nuclear*.

El *Examen de la Tecnología Nuclear de 2020* trata sobre los siguientes temas: las aplicaciones eléctricas, la fisión avanzada y la fusión, las aplicaciones de aceleradores y reactores de investigación, los radioisótopos y las tecnologías de la radiación, la salud humana, y las técnicas nucleares en la alimentación y la agricultura.

La versión preliminar se presentó a la Junta de Gobernadores en su reunión de marzo de 2020 en el documento GOV/2020/4. La presente versión definitiva se elaboró teniendo en cuenta las deliberaciones habidas durante la Junta de Gobernadores, así como las observaciones recibidas de los Estados Miembros.

# Índice

|   |    |
|---|----|
| Resumen ejecutivo .....   | 1  |
| Informe principal.....  | 5  |
| A. Aplicaciones eléctricas.....   | 5  |
| A.1. La energía nucleoelectrica en la actualidad.....   | 5  |
| A.1.1. Países con centrales nucleares en funcionamiento .....   | 7  |
| A.1.2. Nuevos proyectos de los programas nucleoelectricos ya existentes .....   | 9  |
| A.1.3. Países en fase de incorporación.....   | 10 |
| A.2. Proyecciones de crecimiento de la energía nucleoelectrica .....  | 12 |
| A.3. Ciclo del combustible.....   | 13 |
| A.3.1. Parte inicial.....   | 13 |
| A.3.2. Garantía del suministro .....  | 16 |
| A.3.3. Parte final .....  | 17 |
| A.4. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de los desechos radiactivos.....  | 18 |
| A.4.1. Clausura de instalaciones nucleares .....  | 18 |
| A.4.2. Rehabilitación ambiental.....  | 20 |
| A.4.3. Gestión de desechos radiactivos.....   | 22 |
| B. Fisión avanzada y fusión.....  | 26 |
| B.1. Fisión avanzada .....  | 26 |
| B.1.1. Reactores refrigerados por agua .....  | 27 |
| B.2. Sistemas de neutrones rápidos.....   | 29 |
| B.2.1. Reactores refrigerados por gas .....   | 31 |
| B.2.2. Reactores pequeños y medianos o modulares .....  | 32 |
| B.2.3. Iniciativas internacionales que promueven sistemas de energía nuclear innovadores  | 35 |
| B.2.4. Aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear .....   | 35 |
| B.3. Fusión .....   | 36 |
| C. Aceleradores y reactores de investigación .....  | 38 |
| C.1. Aceleradores e instrumentación conexas .....   | 38 |
| C.1.1. Una instalación de doble haz abre nuevas oportunidades para el estudio de los<br>materiales .....                            | 38 |
| C.1.2. MACHINA — Acelerador Móvil para el Análisis No Destructivo del Patrimonio<br>Cultural <i>In Situ</i> .....                   | 39 |
| C.1.3. Obtención de imágenes de células enteras con haces de iones focalizados de<br>energías del orden del megaelectronvoltio..... | 40 |
| C.1.4. Las tecnologías de los aceleradores con láser prometen el advenimiento de<br>diversas aplicaciones .....                     | 41 |
| C.2. Reactores de investigación .....   | 41 |
| D. Radioisótopos y tecnologías de la radiación .....  | 44 |

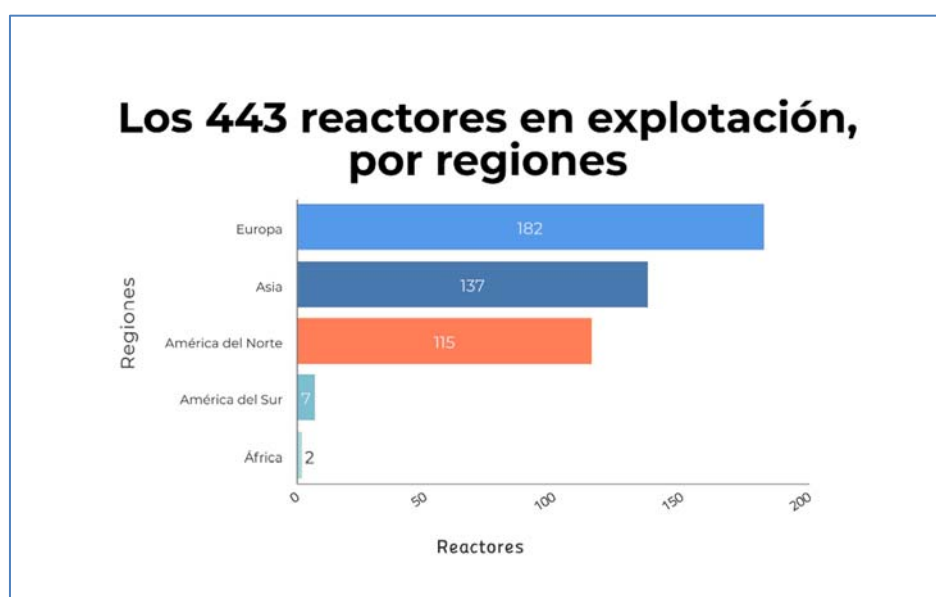
|   |    |
|---|----|
| D.1. Soluciones al problema de los plásticos: Aplicación de técnicas nucleares .....  | 44 |
| D.2. Un avance en las tecnologías de los aceleradores introduce la terapia por captura neutrónica en boro en los hospitales .....                                 | 47 |
| D.2.1. Progresos en la generación de fuentes de neutrones con aceleradores compactos  | 47 |
| D.2.2. Radiofármacos teranósticos y BNCT .....  | 49 |
| D.3. El Medical Isotope Browser: Una herramienta para encontrar nuevas vías de producción de radioisótopos en la lucha contra el cáncer y otras enfermedades..... | 50 |
| E. Salud humana .....   | 51 |
| E.1. Nuevo método de doble trazador isotópico para evaluar la calidad de las proteínas en el ser humano .....   | 51 |
| E.1.1. Las proteínas y sus repercusiones en el crecimiento y desarrollo infantil.....   | 51 |
| E.1.2. Calidad de las proteínas .....   | 51 |
| E.1.3. Método del doble trazador isotópico para la evaluación de la calidad de las proteínas en el ser humano .....   | 52 |
| E.1.4. Marcado intrínseco de las legumbres con óxido de deuterio durante el crecimiento en el campo.....  | 52 |
| E.1.5. Estudio en seres humanos con comidas de prueba a base de legumbres con marcado intrínseco .....  | 52 |
| E.1.6. Utilidad del método .....  | 53 |
| E.2. La biodosimetría como herramienta de diagnóstico/predicción útil para las emergencias y la medicina radiológicas.....  | 53 |
| E.2.1. La biodosimetría relaciona los biomarcadores con las dosis.....  | 54 |
| E.2.2. Métodos biodosimétricos normalizados .....   | 55 |
| E.2.3. Un repaso a los nuevos métodos biodosimétricos desarrollados desde 2000.....   | 55 |
| E.2.4. Mirada al futuro .....   | 56 |
| F. Alimentación y agricultura.....  | 57 |
| F.1. Mejora de las aplicaciones de la técnica de los insectos estériles en la prevención y erradicación de plagas de insectos invasores .....                     | 57 |
| F.1.1. Antecedentes .....   | 57 |
| F.1.2. Mejoras en las tecnologías y estrategias de la TIE .....   | 59 |
| F.1.3. Las plagas de insectos invasores — prevención y preparación .....  | 60 |
| F.2. Técnicas nucleares al servicio de los sistemas de trazabilidad de los alimentos .....  | 61 |
| F.2.1. Antecedentes .....   | 61 |
| F.2.2. Técnicas nucleares .....   | 61 |
| F.2.3. Bases de datos .....   | 64 |
| F.3. Técnicas nucleares de vigilancia de los gases de efecto invernadero para mitigar las repercusiones del cambio climático .....                                | 65 |
| F.3.1. Antecedentes .....   | 65 |
| F.3.2. Aplicación de la tecnología del <sup>13</sup> C sobre el terreno.....  | 66 |



|   |    |
|---|----|
| F.3.3. Técnica del rastreo con nitrógeno 15 para la medición del N <sub>2</sub> O y la determinación de sus fuentes ..... | 67 |
| F.3.4. Novedades en las mediciones del NH <sub>3</sub> sobre el terreno.....  | 67 |
| F.3.5. Perspectivas para el futuro .....  | 68 |

## Resumen ejecutivo

1. Al final de 2019, los 443 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en el mundo (figura A-1) tenían una capacidad total de 392,1 GW(e). En 2019 se pusieron en régimen de parada definitiva 13 reactores, se conectaron a la red otros 6 y se inició la construcción de 5. Las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguieron centradas en Asia, donde se encuentran 35 de los 54 reactores en construcción y 61 de los 74 reactores que se han conectado a la red desde 2005.



*Fig. A-1. Reactores nucleares de potencia en explotación en 2019.*

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

2. Treinta países utilizan actualmente la energía nucleoelectrica, y otros 28 están estudiando la posibilidad de incluirla en su canasta energética, planificando esta medida o trabajando ya activamente en ella. Cuatro países en fase de incorporación están construyendo sus primeras centrales nucleares, dos de las cuales están casi terminadas, y varios otros que han decidido introducir la energía nucleoelectrica se encuentran en fases avanzadas de la preparación de la infraestructura.

3. Las proyecciones de 2019 de la capacidad nucleoelectrica mundial elaboradas por el Organismo ofrecen diferentes estimaciones de la contribución futura de la energía nucleoelectrica a la generación mundial de electricidad, en función, en parte, de que se añada o no un nivel importante de capacidad nueva para compensar la posible retirada del servicio de diversos reactores. En las proyecciones bajas hasta 2030, la capacidad nuclear instalada neta disminuye gradualmente, para luego repuntar y alcanzar los 371 GW(e) en 2050. En las proyecciones altas, la capacidad aumenta un 25 % de aquí a 2030 y un 80 % de aquí a 2050, situándose en 496 GW(e) y 715 GW(e), respectivamente. A mediados de siglo, la proporción correspondiente a la energía nucleoelectrica en la generación total de electricidad del mundo sería del orden del 6 % en la proyección baja y de aproximadamente el 12 % en la proyección alta, frente a alrededor del 10 % en 2019.

Las ventajas relacionadas con la mitigación del cambio climático, la seguridad energética y las políticas ambientales y socioeconómicas son las principales razones por las que muchos países han decidido establecer programas nucleoelectricos o ampliar los que ya tienen. En la Conferencia Internacional sobre el Cambio Climático y el Papel de la Energía Nucleoelectrica, organizada por el OIEA en octubre de 2019, en cooperación con la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos, se subrayó la contribución fundamental que podía hacer la energía nucleoelectrica al logro de los objetivos referentes al clima al acelerar la transición hacia un suministro de energía con bajas emisiones de carbono.

4. Según los pronósticos, la producción mundial de uranio de 2019 iba a ser parecida a la de 2018, situándose en torno a 53 500 toneladas. La persistencia de los precios bajos redujo considerablemente la exploración de este mineral; los proyectos nuevos quedaron en suspenso, y varias minas e instalaciones de procesamiento antes activas permanecieron en estado de servicio y mantenimiento. Las capacidades mundiales de conversión, enriquecimiento y fabricación de combustible siguen siendo más que suficientes para satisfacer la demanda actual y la demanda proyectada para el futuro.
5. En octubre de 2019, el Organismo recibió un envío de uranio poco enriquecido (UPE) en una instalación construida para ese fin en Kazajstán, estableciendo oficialmente el Banco de UPE del OIEA, destinado a garantizar a los países el suministro de combustible nuclear.
6. Para los próximos años se espera un trabajo considerable en la clausura de reactores de potencia, reactores de investigación, otras instalaciones del ciclo del combustible, conjuntos críticos, aceleradores e instalaciones de irradiación, con las actividades de rehabilitación correspondientes. Tecnologías ya probadas y nuevas están aportando mejoras continuas en estos ámbitos.
7. 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. Finlandia está construyendo una instalación, Suecia se encuentra a la espera de una decisión final sobre su solicitud de licencia, y Francia está finalizando la solicitud de la licencia para su instalación. En varios países se están haciendo progresos en proyectos de disposición final en pozos barrenados para las fuentes radiactivas selladas en desuso, comprendidos los proyectos piloto apoyados por el Organismo en Ghana y Malasia. Para todas las demás categorías de desechos radiactivos hay instalaciones de disposición final operativas en distintas partes del mundo.
8. Los reactores nucleares avanzados y sus aplicaciones, vistos como un medio capaz de contribuir a la transición mundial hacia sistemas energéticos más sostenibles, asequibles y fiables, están adquiriendo importancia en todas las regiones del mundo. Esta tecnología, que podría integrarse en los futuros sistemas de generación de energía eléctrica sin emisiones de carbono y con altas proporciones de diferentes fuentes de energía renovable, comprende los reactores pequeños y medianos o modulares (SMR).
9. Hay un creciente interés en utilizar la energía nuclear en aplicaciones no eléctricas como la desalación de agua de mar, la producción de hidrógeno y la calefacción y refrigeración urbanas, así como en varias aplicaciones industriales de alto consumo de energía. Los SMR son particularmente adecuados para estas aplicaciones, conocidas también como cogeneración, que pueden compensar una parte importante de los costos de producción de la energía nucleoelectrica.
10. En el sitio de construcción del ITER se observan progresos sustanciales, con más del 73 % de las obras civiles terminadas. Según los planes, el ITER comenzará a funcionar a plena capacidad de fusión en torno a 2035. Varios Estados Miembros están ejecutando también una variada gama de programas de investigación y desarrollo sobre la fusión. Un hito importante es la construcción del JT-60SA, un



tokamak superconductor, que está en curso en Naka (Japón), en el marco de una colaboración internacional de Europa y el Japón.

11. Los 250 reactores de investigación que están en funcionamiento en 54 países siguen cumpliendo una función estratégica de apoyo a los sectores médico, industrial, educativo y nucleoelectrónico. En total, hay 9 reactores de este tipo en construcción en 6 países, y otros 14 previstos en 11 países. Los reactores de investigación son instalaciones nacionales fundamentales para el desarrollo de la infraestructura y los programas de ciencia y tecnología nucleares. En 2019, una nueva organización de investigación, el Instituto de Investigaciones sobre Energía Atómica de Corea, pasó a ser un Centro Internacional basado en Reactores de Investigación designado por el OIEA.

12. Hasta el momento, 99 reactores de investigación y 4 instalaciones de producción de isótopos de uso médico han sido convertidos al uso de UPE, en lugar de uranio muy enriquecido (UME), o están en régimen de parada confirmada. En 2019 comenzaron los preparativos para la devolución de combustible de UME del reactor de investigación IVG.1M de Kazajstán a la Federación de Rusia tras la conversión del IVG.1M para que utilizara combustible de UPE. También empezaron los preparativos para la degradación del combustible de UME del reactor de investigación IGR de Kazajstán hasta un nivel de enriquecimiento inferior al 20 %. Al final de 2019, el programa de devolución del combustible de UME de origen estadounidense había concluido la retirada de aproximadamente 1600 kg de combustible de UME nuevo e irradiado de reactores de investigación, el Programa de Retirada del Huelgo completó la retirada o confirmó la disposición de aproximadamente 2875 kg de combustible de UME y el programa de devolución del combustible de UME de origen ruso había finalizado la retirada de unos 2300 kg.

13. Las tecnologías de la radiación cumplen los principios fundamentales de la química ‘verde’ y ofrecen múltiples posibilidades de procesamiento de materiales como los polímeros, conocidos también como plásticos, mediante la formación o ruptura controladas de enlaces químicos. La eficacia de estas tecnologías en la química de los polímeros ha quedado ampliamente demostrada, entre otras cosas con la innovadora modificación de las propiedades de los polímeros, la creación de materiales y compuestos poliméricos especiales, y el reciclado de los desechos correspondientes. El interés por esta tecnología va en aumento, y los Estados Miembros están solicitando con creciente insistencia la adaptación de las tecnologías de la radiación para hacer frente al reto mundial del reciclado de los desechos plásticos.

14. La terapia por captura neutrónica en boro (BNCT) es una técnica que utiliza neutrones para la irradiación selectiva a nivel de las células tumorales. Es especialmente adecuada para el tratamiento del cáncer cerebral, el cáncer de cabeza y cuello y el cáncer cutáneo. Basada en la reacción entre un neutrón y un átomo de boro, esta terapia que destruye en forma selectiva solo las células cancerosas podría convertirse en un tratamiento radicalmente diferente de la radioterapia convencional y promete ser una opción viable para el tratamiento del cáncer. Ha habido grandes avances en la BNCT en los centros participantes de todo el mundo. Se han hecho progresos considerables en la optimización de los compuestos de boro y en el control de su acumulación en las células tumorales, y se han desarrollado sistemas de cálculo de dosis en tres dimensiones. El interés por el tema se ha acentuado tras un importante avance tecnológico en la producción de neutrones basada en aceleradores compactos, que permitirá contar con estas instalaciones en los hospitales y centros de investigación del cáncer.

15. La calidad de las proteínas es sumamente importante para satisfacer las necesidades nutricionales de la población en todo el mundo en desarrollo, especialmente de las mujeres gestantes y de los niños en la primera infancia. Los aminoácidos son cruciales para el crecimiento sano en los primeros años de vida. El nuevo método isotópico mínimamente invasivo que utiliza el deuterio y el carbono 13 mide la digestibilidad ileal efectiva de los aminoácidos esenciales y permite evaluar la calidad proteica de los alimentos en los seres humanos. Este nuevo método ayudará a determinar las fuentes de proteínas vegetales de buena calidad para el ser humano, específicamente de las legumbres, y servirá de base a la

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura en la formulación de sus recomendaciones sobre la calidad de las proteínas de consumo humano.

16. Los métodos biodosimétricos ayudan a detectar la exposición humana a la radiación y a cuantificarla. La biodosimetría retrospectiva puede incluso ayudar a detectar una exposición a la radiación ocurrida años antes. Recientemente se han introducido métodos biodosimétricos en la radioncología y la medicina nuclear, así como en la radiología diagnóstica e intervencionista.

17. Una nueva herramienta basada en la Web, el Medical Isotope Browser, permite predecir directamente el rendimiento en la producción de isótopos de uso médico sobre la base de la información introducida por el usuario. Esta herramienta puede ser utilizada por los investigadores médicos y la industria radiofarmacéutica para descubrir vías de producción de radioisótopos aún no exploradas. Esta será una contribución importante a la lucha contra el cáncer y otras enfermedades. La producción de isótopos de uso médico para fines terapéuticos o diagnósticos depende de procesos de reacción nuclear muy complejos, que solo pueden ser estudiados por los físicos nucleares a través de sus mediciones y teorías. El Medical Isotope Browser pone esta información fundamental al alcance de muchos usuarios no especialistas, mediante una interfaz gráfica de usuario para la producción de isótopos.

18. La prevalencia de especies invasoras va en aumento y está contribuyendo a la pérdida mundial de diversidad biológica. La técnica de los insectos estériles (TIE), desplegada como un componente importante de la gestión integrada zonal de plagas, puede prevenir el establecimiento de una población invasora, contenerla o erradicarla, sin dejar ninguna huella ecológica. Las tecnologías y los protocolos mejorados de producción masiva, esterilización y suelta de insectos estériles han elevado enormemente la eficacia en relación con el costo de la gestión integrada zonal de plagas con un componente de TIE, y ello ha permitido ampliar el uso de esta tecnología a otras plagas de insectos importantes, incluidas las plagas invasoras más conocidas que afectan a las plantas, los animales y la salud humana. Los análisis indican que los preparativos para poder responder rápidamente a una plaga antes de su establecimiento son mucho menos onerosos que las campañas de erradicación realizadas posteriormente.

19. Numerosos alimentos se venden a precios recargados en razón del ‘valor añadido’ por las denominaciones de origen, los métodos de producción o las características especiales declarados en la etiqueta. Los productos asociados a un lugar de origen pueden ser parte de un círculo virtuoso de calidad sostenible basado en la preservación de los recursos locales; esto incluye el etiquetado agrícola, artesanal, ético y nutricional, cuyas especificaciones añaden valor a los productos alimentarios. Para proteger a los consumidores del fraude alimentario y de posibles problemas no intencionales de nocividad de los alimentos, se requieren métodos analíticos que permitan verificar esas especificaciones de valor añadido en apoyo de los sistemas de trazabilidad. Varias técnicas nucleares, isotópicas y de disciplinas conexas han resultado ser adecuadas para verificar una amplia gama de indicaciones de valor añadido del etiquetado. Estas técnicas pueden ser un gran apoyo para el establecimiento de sistemas de trazabilidad que protejan y promuevan los productos alimentarios con especificaciones de valor añadido en el etiquetado. A la larga, la utilización más amplia de esta tecnología por los Estados Miembros constituirá una salvaguardia para los consumidores y los productores respetables, garantizará el cumplimiento reglamentario y ético, estimulará los mercados internos y reducirá las barreras al comercio internacional.

# Examen de la Tecnología Nuclear de 2020

## Informe principal

### A. Aplicaciones eléctricas

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

20. Al 31 de diciembre de 2019 había 443 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en el mundo, con una capacidad total de 392,1 GW(e)<sup>1</sup> (cuadro A-1). De ellos, el 83 % eran reactores moderados y refrigerados por agua ligera, el 11 % eran reactores moderados y refrigerados por agua pesada, el 3 % eran reactores refrigerados por agua ligera y moderados por grafito, y el 3 % eran reactores refrigerados por gas (figura A-2). Tres eran reactores rápidos refrigerados por metal líquido. Cerca del 89 % de la electricidad generada a partir de energía nuclear procedía de 376 reactores de agua ligera.

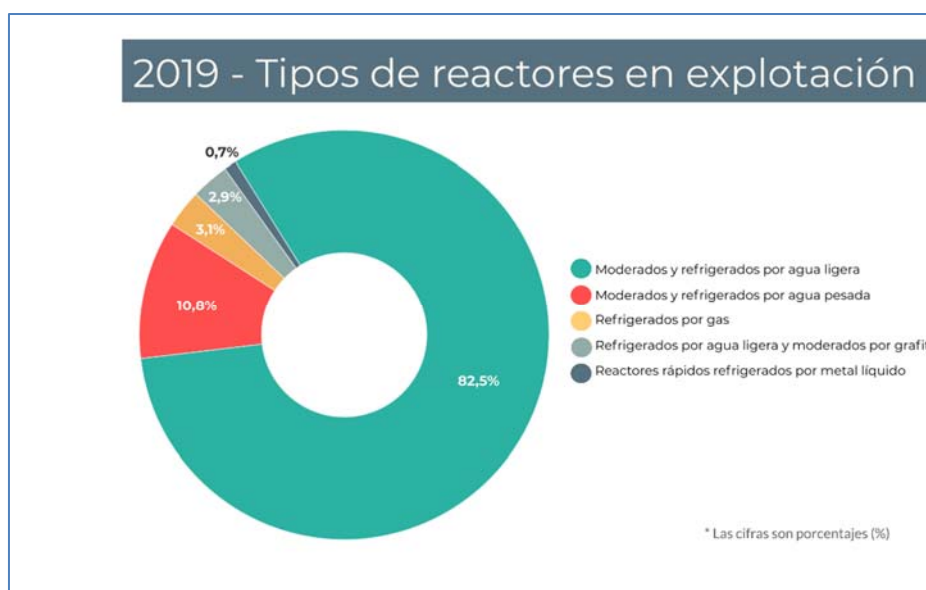


Fig. A-2. Reactores nucleares de potencia, por tipos.

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

21. En 2019 se conectaron a la red seis nuevos reactores de agua a presión (PWR): dos en China (Taishan 2, de 1660 MW(e), y Yangjiang 6, de 1000 MW(e)), tres en la Federación de Rusia (Novovoronezh 2-2, de 1114 MW(e), Akademik Lomonosov 1, de 30 MW(e) y Akademik Lomonosov 2, de 30 MW(e)) y uno en la República de Corea (Shin-Kori 4, de 1340 MW(e)), por un total de 5174 MW(e) de capacidad añadida en el mundo durante el año. En total, 13 reactores fueron puestos en régimen de parada definitiva: Philippsburg-2 en Alemania; Chinshan 2 en Taiwán (China); Pilgrim 1 y Three Mile

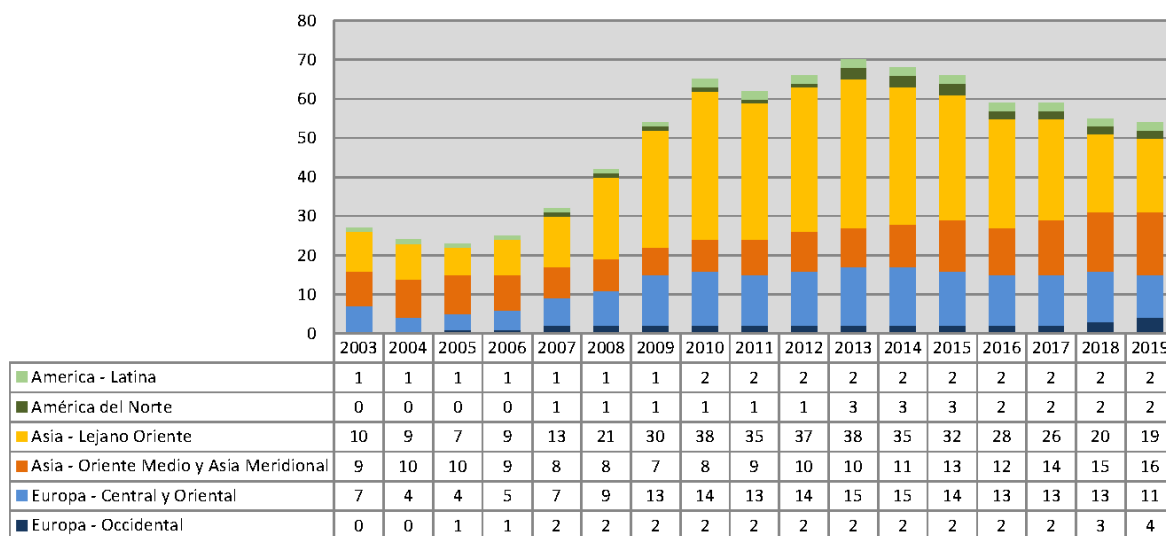
<sup>1</sup> Un GW(e), o gigavatio (eléctrico), equivale a mil millones de vatios de energía eléctrica.



Island 1 en los Estados Unidos de América; Bilibino 1 en la Federación de Rusia; Genkai 2 y Fukushima Daini 1-4 en el Japón; Wolsong-1 en la República de Corea; Ringhals-2 en Suecia y Muehleberg en Suiza.

22. Al 31 de diciembre de 2019 había 54 reactores en construcción. Han comenzado las obras de construcción de las unidades Zhangzhou 1 y Taipingling-1 de China, Kursk 2-2 de la Federación de Rusia, Hinkley Point C-2 en el Reino Unido y Bushehr-2 de la República Islámica del Irán. La expansión y las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguen concentradas en Asia (figura A-3), donde hay 35 reactores en construcción. También están en Asia 61 de los 74 nuevos reactores que se han conectado a la red desde 2005.

**Número de reactores en construcción, por región**



*Fig. A-3. Número de reactores en construcción, por región.*

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

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo (al 31 de diciembre de 2019)<sup>a</sup>

| PAÍS                         | Reactores en funcionamiento |                | Reactores en construcción |                | Electricidad nuclear suministrada en 2019 |             | Experiencia operacional total hasta el final de 2019 |       |
|------------------------------|-----------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---|-------------|--|-------|
|                              | Nº de unidades              | Total de MW(e) | Nº de unidades            | Total de MW(e) | TW·h                                      | % del total | Años   | Meses |
| ALEMANIA                     | 6                           | 8113           |                           |                |   |             | 846  | 7     |
| ARGENTINA                    | 3                           | 1641           | 1                         | 25             | 7,9                                       | 5,9         | 88   | 2     |
| ARMENIA                      | 1                           | 375            |                           |                | 2,0                                       | 27,8        | 45   | 8     |
| BANGLADESH                   |                             |                | 2                         | 2160           |   |             |  |       |
| BELARÚS                      |                             |                | 2                         | 2220           |   |             |  |       |
| BÉLGICA                      | 7                           | 5930           |                           |                | 41,4                                      | 47,6        | 303  | 7     |
| BRASIL                       | 2                           | 1884           | 1                         | 1340           | 15,2                                      | 2,7         | 57   | 3     |
| BULGARIA                     | 2                           | 2006           |                           |                | 15,9                                      | 37,5        | 167  | 3     |
| CANADÁ                       | 19                          | 13554          |                           |                | 94,9                                      | 14,9        | 769  | 6     |
| CHINA                        | 48                          | 45518          | 11                        | 10564          | 330,1                                     | 4,9         | 370  | 1     |
| COREA, REPÚBLICA DE          | 24                          | 23172          | 4                         | 5360           | 138,8                                     | 26,2        | 572  | 2     |
| EMIRATOS ÁRABES UNIDOS       |                             |                | 4                         | 5380           |   |             |  |       |
| ESLOVAQUIA                   | 4                           | 1814           | 2                         | 880            | 14,3                                      | 53,9        | 172  | 7     |
| ESLOVENIA                    | 1                           | 688            |                           |                | 5,5                                       | 37,0        | 38   | 3     |
| ESPAÑA                       | 7                           | 7121           |                           |                | 55,9                                      | 21,4        | 343  | 1     |
| ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA    | 96                          | 98152          | 2                         | 2234           | 809,4                                     | 19,7        | 4505   | 8     |
| FEDERACIÓN DE RUSIA          | 38                          | 28437          | 4                         | 4525           | 195,5                                     | 19,7        | 1334   | 5     |
| FINLANDIA                    | 4                           | 2794           | 1                         | 1600           | 22,9                                      | 34,7        | 163  | 4     |
| FRANCIA                      | 58                          | 63130          | 1                         | 1630           | 382,4                                     | 70,6        | 2280   | 4     |
| HUNGRÍA                      | 4                           | 1902           |                           |                | 15,4                                      | 49,2        | 138  | 2     |
| INDIA                        | 22                          | 6255           | 7                         | 4824           | 40,7                                      | 3,2         | 526  | 11    |
| IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA DEL | 1                           | 915            | 1                         | 974            | 5,9                                       | 1,8         | 8  | 4     |
| JAPÓN                        | 33                          | 31679          | 2                         | 2653           | 65,7                                      | 7,5         | 1899   | 6     |
| KAZAJSTÁN                    |                             |                |                           |                |   |             | 25   | 10    |
| MÉXICO                       | 2                           | 1552           |                           |                | 10,9                                      | 4,5         | 55   | 11    |
| PAÍSES BAJOS                 | 1                           | 482            |                           |                | 3,7                                       | 3,1         | 75   | 0     |
| PAKISTÁN                     | 5                           | 1318           | 2                         | 2028           | 9   | 6,6         | 82   | 5     |
| REINO UNIDO                  | 15                          | 8923           | 2                         | 3260           | 51,0                                      | 15,6        | 1619   | 7     |
| REPÚBLICA CHECA              | 6                           | 3932           |                           |                | 28,6                                      | 35,2        | 170  | 10    |
| RUMANIA                      | 2                           | 1300           |                           |                | 10,4                                      | 18,5        | 35   | 11    |
| SUDÁFRICA                    | 2                           | 1860           |                           |                | 13,6                                      | 6,7         | 70   | 3     |
| SUECIA                       | 7                           | 7740           |                           |                | 64,4                                      | 34,0        | 467  | 0     |
| SUIZA                        | 4                           | 2960           |                           |                | 25,4                                      | 23,9        | 224  | 11    |
| TURQUÍA                      |                             |                | 1                         | 1114           | N/A                                       | N/A         |  |       |
| UCRANIA                      | 15                          | 13107          | 2                         | 2070           | 78,1                                      | 53,9        | 518  | 6     |
| Total <sup>b, c, d</sup>     | 443                         | 392098         | 54                        | 57441          | 2586,2                                    |             | 18329  | 10    |

a. Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS) del Organismo: <https://pris.iaea.org/pris/>.

b. La electricidad total de origen nuclear suministrada en 2019 no incluye los datos de siete unidades de reactor alemanas, dado que la información correspondiente a estas unidades no se facilitó en el momento de la publicación.

c. Los totales incluyen los siguientes datos de Taiwán (China): 4 unidades en funcionamiento, 3844 MW(e); 2 unidades en construcción, 2600 MW(e).

d. La experiencia operacional total también incluye las centrales en régimen de parada de Italia (80 años y 8 meses), Kazajstán (25 años y 10 meses) y Lituania (43 años y 6 meses) y las centrales en funcionamiento y en régimen de parada de Taiwán (China) (224 años y 1 mes).

### A.1.1. Países con centrales nucleares en funcionamiento

23. Al final de 2019, más del 66 % de los 443 reactores nucleares de potencia en explotación, que aportaban una capacidad neta de 256,3 GW(e), llevaban más de 30 años en servicio. Los reactores de potencia con más de 40 años de servicio representaban el 17 % de la capacidad total. Un número

creciente de centrales nucleares están ejecutando programas de explotación a largo plazo y gestión del envejecimiento.

En 2019 se utilizaron en el mundo un total de 71 reactores nucleares de potencia (14 en Asia y 57 en Europa) para generar 2146,72 gigavatios-hora (GW·h) de equivalente eléctrico del calor en apoyo de aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear. De estos reactores, 10 apoyaron la desalación (con 48,01 GW·h), 56 la calefacción urbana (1870,6 GW·h) y 32 las aplicaciones del calor industrial (1248,01 GW·h).

24. En la Federación de Rusia hay dos reactores rápidos en funcionamiento. Beloyarsk 3, con una capacidad neta de 560 MW(e), ha suministrado 140 777 GW·h de electricidad desde que se conectó a la red en 1980. Beloyarsk 4, con una capacidad neta de 820 MW(e), ha suministrado 13 066 GW·h de electricidad desde el inicio de su explotación comercial en 2016.

25. En África, Eskom comenzó la reparación de sus reactores de Koeberg en Sudáfrica, con miras a prolongar su vida operacional en al menos 20 años.

26. En Asia, China empezó a utilizar dos reactores de tipo AP1000 puestos en servicio recientemente para la cogeneración. En Taiwán (China), de conformidad con los resultados de un referéndum celebrado en noviembre de 2018, se aprobó una enmienda que eliminó el requisito de poner fin a la explotación de todas las centrales nucleares en 2025. En la India se puso nuevamente en marcha la central nuclear de Kakrapar, tras la sustitución del canal de refrigeración y los tubos de alimentación.

27. El Japón sigue concentrando sus esfuerzos en rehabilitar el emplazamiento de la central nuclear de Fukushima Daiichi y en poner nuevamente en marcha las centrales nucleares inactivas. Desde su parada tras el accidente de Fukushima Daiichi, han vuelto a funcionar nueve reactores (todos ellos de agua a presión). Con la seguridad como primera prioridad, el Plan Estratégico de la Energía (2018) prevé que la energía nuclear sea una fuente de electricidad de carga base importante para el logro de una 'canasta energética óptima' para 2030 y una opción para la descarbonización para 2050.

28. En Europa, Francia aplazó por 10 años una reducción prevista de su parque de centrales nucleares y comenzó las obras de mejora y mantenimiento de su reactor Tricastin 1 de 900 MW(e), que podrían permitir la explotación de esta unidad por otro decenio. Sin embargo, el plan energético plurianual publicado a comienzos de 2019 fija el año 2035 como plazo para reducir al 50 % la proporción correspondiente a la energía nucleoelectrica en la matriz de electricidad del país. Para cumplir esta meta, se retirarán del servicio 14 reactores, lo que supondrá una reducción de la capacidad total de 12 600 MW(e). En Bélgica concluyeron las obras de reparación del hormigón en Doel 3, y en Rumania se está ejecutando un programa de modernización de la central nuclear de Cernavodă. En Suecia se aprobaron las prolongaciones de la vida útil de las Unidades 1 y 2 de la central nuclear de Forsmark, y en Ucrania se ejecutó un proyecto destinado a prorrogar por 10 años la vida operacional del reactor Ucrania 3.

29. En América Latina, la Argentina aumentó la capacidad de la central nuclear de Embalse en un 1,33 %, y prolongó su vida operacional en 30 años.

30. En América del Norte, el Canadá hizo inversiones importantes en proyectos de prolongación de la vida útil, y en 2020 entrará nuevamente en servicio la Unidad Darlington 2. En los Estados Unidos de América se ha prolongado a 60 años la vida operacional de la mayoría de los reactores existentes. La Comisión Reguladora Nuclear (NRC) aprobó la solicitud presentada por Florida Power & Light para prolongar en 20 años la explotación de las Unidades 3 y 4 de la central nuclear de Turkey Point. Esta es la primera vez que la NRC expide una licencia renovada que prolonga la explotación de un reactor de 60 a 80 años.

31. La fiabilidad de las centrales nucleares ha aumentado continuamente a lo largo de tiempo. La figura A-4 muestra el número de paradas de emergencia o disparos manuales y automáticos no programados registrados por cada 7000 horas de funcionamiento (aproximadamente un año) por unidad.

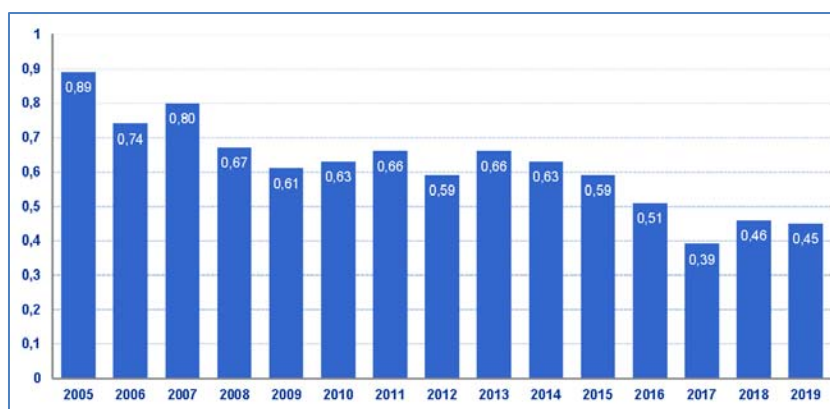


Fig. A-4. Tasa media de paradas de emergencia: número de paradas de emergencia automáticas y manuales no programadas por cada 7000 horas de funcionamiento de una unidad. (Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia del OIEA, <http://www.iaea.org/pris>)

### A.1.2. Nuevos proyectos de los programas nucleoelectricos ya existentes

32. De los 30 Estados Miembros con centrales nucleares en explotación, 15 están trabajando en la construcción de nuevas unidades. En total hay 45 proyectos de reactores, que aportarán una capacidad neta de 46 567 MW(e). En la figura A-5 se enumeran estos países, ordenados según el número de unidades que está construyendo cada uno y su capacidad neta total.



Fig. A-5. Quince Estados Miembros con programas nucleoelectricos están construyendo nuevas unidades en sus centrales nucleares

33. En 2019, China conectó a la red un segundo reactor EPR (Taishan 2) y un APCR-1000 (Yangjiang 6), aumentando así a 48 su número total de unidades nucleoelectricas en explotación. Sumando la capacidad de los cuatro reactores en funcionamiento en Taiwán, la capacidad

nucleoeléctrica total de China se elevó a 49 362 MW(e). Por su parte, Finlandia y Francia anunciaron la intención de conectar sus reactores EPR a la red en julio de 2020 y al final de 2022, respectivamente. En el Reino Unido, se vertió el primer hormigonado de los cimientos de Hinkley Point C.

34. En junio de 2019, Rosenergoatom, de la Federación de Rusia, recibió una licencia para explotar la central nuclear flotante Akademik Lomonosov hasta 2029, y en diciembre conectó los reactores a la red. (Véase más información en el párrafo 152).

35. La India, con 22 reactores en explotación y 7 en construcción, tiene previsto poner en funcionamiento 21 reactores nucleares de potencia nuevos, con una capacidad de generación combinada de 15 700 MW(e), de aquí a 2031.

### **A.1.3. Países en fase de incorporación**

36. De los 28 Estados Miembros que han manifestado interés en la energía nucleoelectrica, 18 han iniciado estudios sobre la infraestructura correspondiente, 4 han adoptado ya una decisión y están creando la capacidad institucional y la infraestructura necesaria con vistas a la contratación y financiación de una central nuclear, 1 (Egipto) ha firmado un contrato y está realizando los preparativos para la construcción, 2 (Bangladesh y Turquía) han comenzado las obras de construcción, y otros 2 (Belarús y los Emiratos Árabes Unidos) están terminando la construcción de su primera central nuclear.

37. En los Emiratos Árabes Unidos está casi ultimada la construcción de los cuatro reactores de la central nuclear de Barakah, y la expedición de la licencia de explotación de las primeras dos unidades es inminente. La carga de combustible de la Unidad 1 está programada para el primer trimestre de 2020, y la de la Unidad 2, para un año más tarde. En septiembre de 2019 se realizó una misión de Examen de Medidas de Preparación para Emergencias (EPREV) de seguimiento.

38. En Belarús se está construyendo la primera central nuclear en Ostrovets. La carga de combustible de la primera unidad está programada para el primer trimestre de 2020, con sujeción a la aprobación reglamentaria, y la puesta en servicio de la segunda unidad está prevista para 2021. Belarús acogió una misión del Servicio de Asesoramiento del OIEA sobre Sistemas Nacionales de Contabilidad y Control de Materiales Nucleares (ISSAS) y una misión del Grupo de Examen Preliminar de la Seguridad Operacional (Pre-OSART) en agosto de 2019, y ha solicitado una misión de Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear (INIR) de Fase 3 para febrero de 2020.

39. En Bangladesh está en curso la construcción de la central nuclear de Rooppur, con la puesta en servicio de las Unidades 1 y 2 prevista para 2023 y 2024, respectivamente. Se está efectuando el reconocimiento del emplazamiento para un segundo proyecto de central nuclear. Para 2020 está programada una misión del Servicio Integrado de Examen de la Situación Reglamentaria (IRRS). En 2021 se realizarán misiones del Servicio Internacional de Asesoramiento sobre Protección Física (IPPAS) y del ISSAS.

40. En Turquía prosiguió la construcción de la primera unidad de la central nuclear de Akkuyu, cuya puesta en servicio está programada para 2023, y se expidió la licencia de construcción de la segunda unidad. En 2020 se realizará una misión IPPAS, y está prevista una misión IRRS en 2021.

41. En Egipto, tras la aprobación de la licencia para el emplazamiento de una central nuclear de cuatro unidades en El Dabaa en marzo de 2019, está previsto iniciar los trabajos de construcción a mediados de 2020, si se recibe la aprobación reglamentaria. Según los planes, la puesta en servicio de la primera unidad concluirá en 2026, y la de las demás unidades, dentro de 2028. En 2019, Egipto acogió una misión de Diseño del Emplazamiento y los Sucesos Externos (SEED) en enero, y una misión INIR de Fase 2 en octubre-noviembre.

42. En la Arabia Saudita prosiguieron los trabajos preparatorios para la construcción paralela de un reactor modular pequeño (SMR) y dos centrales nucleares grandes. Actualmente se está realizando



la caracterización del emplazamiento de las centrales nucleares grandes. El inicio de la construcción del reactor modular avanzado integrado (SMART) está previsto para 2023, y su puesta en servicio, para 2028.

43. Jordania siguió realizando evaluaciones de la tecnología para seleccionar SMR adecuados. Una central de 200-200 MW(e) basada en la tecnología de SMR seleccionada se pondrá en servicio para 2030. A más largo plazo (después de 2030), está prevista una central nuclear grande.

44. Nigeria tiene planes para construir cuatro unidades de reactor, y espera iniciar la explotación oficial de la primera de ellas en 2027. Una decisión de reanudar el estudio de viabilidad preliminar, antes de finalizar el estudio de viabilidad propiamente dicho, podría causar un retraso adicional en el inicio de la explotación oficial.

45. En Polonia, tras la realización de consultas públicas, se prevé que en 2020 se tomará la decisión de seguir adelante con el programa de energía nucleoelectrica y la construcción de una central nuclear. La puesta en servicio de esta primera unidad está programada para 2033.

46. El Organismo sigue ayudando a los Estados Miembros a comprender los compromisos y obligaciones que entraña el desarrollo de la infraestructura necesaria para un programa nucleoelectrico, sobre la base del enfoque de los hitos, que apoya el establecimiento de programas de energía nucleoelectrica sostenibles y tecnológica y físicamente seguros.

En 2019 se actualizaron los planes de trabajo integrados y los perfiles nacionales de infraestructura nuclear de ocho Estados Miembros, mediante proyectos de cooperación técnica en la Arabia Saudita (enero), Turquía (enero), Jordania (febrero), Belarús (marzo), Polonia (marzo), Filipinas (noviembre), Kenya (diciembre) y Bangladesh (diciembre). Con una misión INIR de Fase 2 a Egipto y otra de Fase 1 de seguimiento a Ghana en 2019, las misiones INIR realizadas desde 2009 aumentaron a 29, en 21 Estados Miembros. Además, alrededor de 490 personas procedentes de 52 países en fase de incorporación o de ampliación participaron en 31 actividades de capacitación interregionales, en el marco del proyecto de cooperación técnica INT2018, titulado “Apoyo a la adopción de decisiones informadas y creación de capacidad para iniciar y ejecutar programas nucleoelectricos” (figura A-6).



*Fig. A-6. El apoyo integrado del OIEA a los países que inician nuevos programas nucleoelectricos ayuda a sentar las bases para construir una nueva central nuclear por medio de misiones de examen por homólogos, actividades específicas para identificar deficiencias y creación de capacidad.*

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

47. Las proyecciones del Organismo de 2019 (figura A-7), que se elaboraron en consulta con expertos regionales y reflejan la información más reciente sobre las políticas y las condiciones del mercado, ofrecen diferentes estimaciones de la contribución futura de la energía nucleoelectrónica a la generación mundial de electricidad, en función, en parte, de que se añada o no un nivel importante de capacidad nueva para compensar la posible retirada del servicio de diversos reactores. En las proyecciones bajas hasta 2030, la capacidad nuclear instalada neta disminuye gradualmente, para luego repuntar y alcanzar los 371 GW(e) en 2050. En el caso de la proyección alta, la capacidad aumenta a 496 GW(e) para 2030 y a 715 GW(e) para 2050. Esto representa un aumento del 25 % de aquí a 2030, y de un 80 % de aquí a 2050. A mediados de siglo, la proporción correspondiente a la energía nucleoelectrónica en la capacidad total de generación eléctrica del mundo sería del orden del 6 % en la proyección baja y del 12 % en la proyección alta, frente a un 10 % aproximadamente en la actualidad.

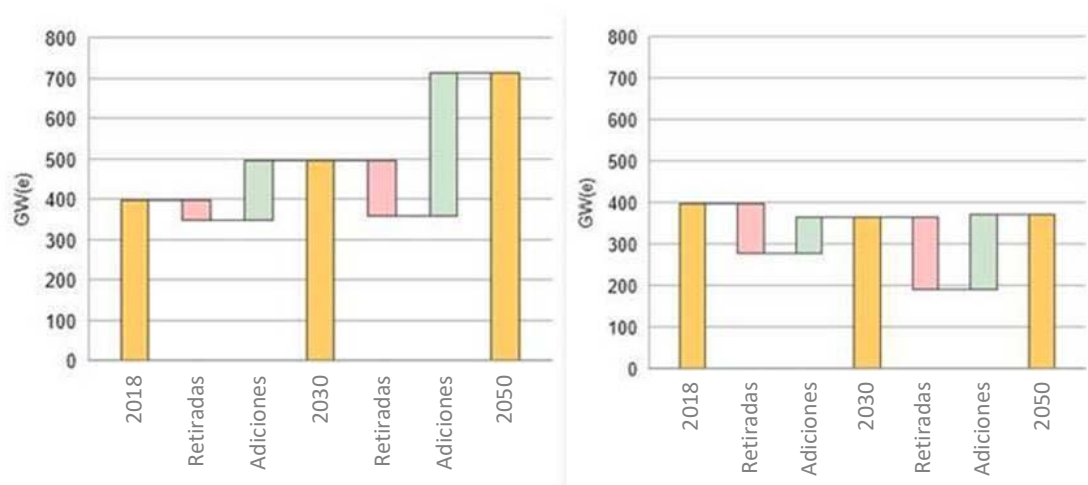


Fig. A-7. Proyecciones alta (izquierda) y baja (derecha) de la capacidad nuclear mundial.  
(Fuente: Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, Colección de Datos de Referencia del OIEA N° 1, 2018)

48. La amplia diferencia entre las proyecciones baja y alta se debe a la incertidumbre con respecto a la sustitución del gran número de reactores que está previsto retirar del servicio en torno a 2030 y en los años siguientes, especialmente en América del Norte y Europa. Sin embargo, las proyecciones de 2019 contienen menos incertezas que las de los años anteriores, debido a los recientes anuncios sobre el futuro de las centrales nucleares existentes en algunas regiones y los planes de ampliación a largo plazo. Es posible que se requiera una capacidad nueva sustancial para compensar las retiradas del servicio de distintos reactores en razón de la antigüedad, la competitividad y otros factores.

49. Junto con otras tecnologías de bajas emisiones de carbono, la energía nuclear puede satisfacer la creciente demanda de electricidad y energía no eléctrica hasta 2050, como parte de la transición hacia un suministro de energía sostenible. El 90 % de los escenarios de mitigación rigurosa del cambio climático sitúan la generación nuclear en 2050 por encima de la proyección baja más reciente del Organismo, y un 60 % la sitúan por encima de la proyección alta.

Los escenarios energéticos mundiales elaborados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático y la Agencia Internacional de Energía, así como por Gobiernos, sectores industriales y organizaciones no gubernamentales, prevén una contribución creciente de la energía nucleoelectrica a la mitigación del cambio climático a fin de alcanzar los objetivos del Acuerdo de París. Esto se refleja también en las conclusiones de la [Conferencia Internacional sobre el Cambio Climático y el Papel de la Energía Nucleoelectrica](#), organizada por el Organismo en 2019, en cooperación con la AEN de la OCDE.

50. En vista de las tendencias actuales de las políticas y los mercados que se reflejan en las proyecciones del Organismo, y ante las modestas metas de mitigación incluidas en las contribuciones determinadas a nivel nacional que han presentado los países en virtud del Acuerdo de París, los escenarios ilustran la necesidad de esfuerzos adicionales para aprovechar el considerable potencial de mitigación que encierra la energía nucleoelectrica con miras a alcanzar los ambiciosos objetivos mundiales referentes al clima.

### **A.3. Ciclo del combustible**

#### **A.3.1. Parte inicial**

##### **Recursos y producción de uranio**

Los precios al contado del uranio se mantuvieron bajos en 2019, por lo general entre 52 dólares/kg y 57 dólares/kg. El precio al contado del uranio ha variado relativamente poco desde 2018 (entre 47 dólares/kg y 59 dólares/kg) y está bajo desde 2013, lo que se ha traducido en una importante reducción de los programas de exploración del mineral.

51. Los nuevos proyectos que se encontraban en fase de planificación o de desarrollo han quedado suspendidos, y varias minas e instalaciones de procesamiento antes activas permanecieron en estado de servicio y mantenimiento en respuesta a los bajos precios al contado del uranio. Los pronósticos indican que la producción mundial de las minas activas en 2019 será parecida a la de 2018, que ascendió a 53 498 toneladas de uranio (t U). Esto representa una reducción de la producción mundial de uranio de aproximadamente el 15 % con respecto a 2016.

52. Kazajstán siguió siendo el principal productor de uranio del mundo. En 2019 había ocho minas de uranio en explotación, todas ellas de lixiviación *in situ*, y se estima que la producción total se situará entre 22 000 t U y 23 000 t U (algo más que las 21 705 t U producidas en 2018). En el Canadá, el segundo mayor productor, la mina de Cigar Lake y la correspondiente fábrica del lago McClean fueron los únicos productores de uranio activos en 2019, con una producción pronosticada en alrededor de 7000 t U, mientras que dos minas y otras tantas fábricas permanecieron en estado de servicio y mantenimiento indefinido a causa del bajo nivel de los precios del uranio. En Australia, la mina de uranio de Ranger redujo su producción en 2019 (con pronósticos que la sitúan entre 1400 t U y 1800 t U procesadas a partir de las existencias de mena), a medida que avanzaba hacia la clausura y la rehabilitación. La mina de cobre de Olympic Dam produjo uranio (unas 3000 t en 2019) como coproducto. Para la mina de lixiviación *in situ* de Four Mile, los pronósticos indican una producción de alrededor de 1200 t U en 2019. La producción total de Australia prevista para 2019 se sitúa entre 5600 t U y 5800 t U (algo menos que las 6517 t U de 2018, debido a la menor producción de la mina de Ranger).

53. En África, hay minas de uranio activas en Namibia y el Níger. Namibia tiene cuatro minas de uranio desarrolladas, dos en explotación (Rössing y Husab, con pronósticos de producción para 2019

de 2200 t U y 3028 t U, respectivamente) y dos en estado de servicio y mantenimiento, debido a los bajos precios del uranio (Langer Heinrich y Trekkopje). Sin embargo, a finales de 2019 se publicó un estudio preliminar de viabilidad para la reanudación de la explotación de la mina de uranio de Langer Heinrich dentro de 12 meses. El Níger tiene dos minas de uranio en explotación: Somair y Cominak. Se prevé que la producción de estas dos minas en 2019 será igual a la de 2018 (1769 t U en la mina de Somair y 1115 t U en la de Cominak). Globalmente, los pronósticos indican que la producción de uranio de África en 2019 se cifrará en 8100 toneladas.

54. La política nacional de China consiste en garantizar un suministro abundante de recursos de uranio para el desarrollo sostenible de la energía nucleoelectrica a mediano y largo plazo. China tiene actualmente siete minas nacionales de uranio en funcionamiento, con una producción anual combinada de 1650 t U. Además, China participa en varios proyectos de desarrollo mineral en el extranjero, principalmente en Kazajstán, Namibia y el Níger.

55. En Jordania central prosiguieron los estudios de viabilidad para la recuperación del uranio, y en 2020 se pondrá en servicio una planta piloto (basada en la tecnología de la lixiviación en pila) en el emplazamiento de esa región. También fue objeto de evaluación un proyecto para una planta de producción de concentrado de uranio en Salamanca (España).

### Conversión y enriquecimiento

56. La capacidad actual de conversión y enriquecimiento es más que suficiente para satisfacer la demanda mundial, si bien con un mercado segmentado y con la producción concentrada en solo unos cuantos proveedores. En la actualidad, cinco productores atienden la mayor parte de la demanda mundial de hexafluoruro de uranio ( $UF_6$ ), con una capacidad nominal de 62 000 t U anuales, pero una utilización de esa capacidad de solo el 56 % (una producción del orden de 34 500 toneladas) en 2019 (figura A-8). La oferta mundial de uranio enriquecido procede principalmente de las plantas de enriquecimiento comerciales, y también de suministros secundarios tales como el uranio enriquecido anteriormente o el nuevo enriquecimiento de las colas. La mayoría de la capacidad de enriquecimiento se encuentra en Europa y la Federación de Rusia (Orano, URENCO y la Corporación Estatal de Energía Atómica “Rosatom”), aunque la Corporación Nuclear Nacional de China (CNNC) se está convirtiendo en un proveedor interno de servicios de enriquecimiento en China y tiene previsto ofrecer estos servicios a nivel internacional en el futuro.



Fig. A-8. Capacidad mundial de conversión y enriquecimiento en 2019

## **Fabricación de combustible**

57. A fin de cumplir con la estrategia de diversificación de los suministros de combustible nuclear de la Agencia de Abastecimiento de la Euratom, la central nuclear de Kozloduy de Bulgaria anunció en febrero de 2019 que había encomendado a la filial sueca de Westinghouse Electric Company el estudio de las opciones para obtener una licencia e integrar un combustible mejorado en las dos unidades (5 y 6) de la central, en virtud de un contrato por valor de 3,1 millones de leva (1,8 millones de dólares). La compañía eléctrica checa ČEZ anunció en abril de 2019 que cargaría un lote experimental de seis conjuntos combustibles fabricados en la filial sueca de Westinghouse en la Unidad 1 de su central nuclear de Temelin. La compañía de combustible rusa TVEL (que forma parte de Rosatom) es el principal suministrador de combustible nuclear para las centrales nucleares de Kozloduy y de Temelin, y proporciona periódicamente a estas centrales nucleares combustibles avanzados más duraderos (TVSA-12 y TVSA-T.mod.2).

58. En febrero de 2019, Westinghouse Electric Company anunció el lanzamiento de su nueva generación de conjuntos combustibles diseñados para los reactores de agua en ebullición (BWR) (nombre comercial: Triton11, nombre técnico: BWR 11x11) con el fin de reducir considerablemente el costo del ciclo del combustible y aumentar la fiabilidad y seguridad de la explotación. Los nuevos conjuntos serán puestos a prueba por primera vez en las Unidades 1 y 2 de la central nuclear de Olkiluoto, que tiene BWR ABB-III de 900 MW(e), en Finlandia.

59. En marzo de 2019, la CNNC finalizó el ensayo de irradiación a largo plazo de un conjunto combustible nuclear nacional para reactores de agua a presión y comenzó la producción a gran escala de los conjuntos combustibles China Fuel 3 (en la principal planta de fabricación de combustible para PWR situada en Yibin, en la provincia de Sichuan (China), con pastillas de combustible procedentes de la Planta Metalúrgica de Ulba de Kazajstán) para el PWR Hualong 1 (HPR1000) diseñado en China.

60. En enero de 2019 se cargaron en el reactor de investigación MIR del Instituto de Investigación sobre Reactores Atómicos de Dimitrovgrad (Federación de Rusia) dos conjuntos combustibles experimentales con cuatro combinaciones distintas de pastillas de combustible avanzado (compuesto de dióxido de uranio y de una aleación de uranio y molibdeno con mayor densidad y conductividad térmica) y de materiales para el plaquado (hechos de una aleación de circonio con revestimiento de cromo o de cromo-níquel) fabricados por TVEL. Las pruebas con ambos conjuntos se llevaron a cabo durante 2019.

61. Southern Nuclear y Framatome anunciaron en abril de 2019 la carga de los primeros conjuntos combustibles a prueba de accidentes, fabricados con pastillas de combustible dopadas con óxido de cromo y vainas de aleación de circonio con revestimiento de cromo, en la Unidad 2 de la central Vogtle del estado de Georgia (Estados Unidos de América), durante la parada de recarga de la primavera. En octubre de 2019, BWX Technologies anunció que estaba procediendo a poner nuevamente en funcionamiento su línea de producción de combustible tri-isotrópico de oxcarburo de uranio en la instalación de Lynchburg del estado de Virginia (Estados Unidos de América).

62. En enero de 2019, TVEL firmó un contrato con el Departamento de Energía Atómica de la India para suministrar pastillas de combustible de uranio para los reactores de agua en ebullición de la central nuclear de Tarapur (en noviembre de 2019, se habían entregado 50 toneladas de pastillas de combustible). En julio de 2019, TVEL firmó un contrato con la Corporación de Energía Nucleoeléctrica Suneng y la Corporación Industrial China de Energía Nuclear, dos dependencias de la CNNC, para el suministro de combustible nuclear a las Unidades 7 y 8 de la central nuclear de China en Tianwan, en la provincia de Jiangsu. Asimismo, en julio de 2019, TVEL entregó una partida de combustible nuclear al reactor rápido experimental de China. En agosto de 2019, TVEL fue designada como proveedor exclusivo de combustible nuclear para ambas unidades de la central nuclear de Rooppur, en Bangladesh, durante toda su vida útil.



63. En agosto de 2019, se recibió y se cargó en el reactor rápido BN-800 de la central nuclear de Beloyarsk la primera partida industrial de combustible de óxidos mixtos, compuesta de 18 conjuntos combustibles fabricados en el Complejo Minero y Químico en Zheleznogorsk (Federación de Rusia). También se están llevando a cabo en la Federación de Rusia las pruebas de reactor con el combustible de mezcla regenerada (una mezcla reprocesada de uranio y plutonio) para reactores de potencia refrigerados y moderados por agua (WWER), así como con combustible de mezcla de nitruros de uranio y plutonio para reactores rápidos.

64. En septiembre de 2019, la Compañía Nacional de Generación de Energía Nuclear “Energoatom”, de Ucrania, y Westinghouse firmaron un acuerdo preliminar para la fabricación por Westinghouse del combustible de los reactores WWER-440 de Ucrania. En septiembre de 2019, durante una parada de recarga programada, se cargaron en la Unidad 2 de la central nuclear Byron de Exelon conjuntos de ensayo inicial de barras de combustible EnCore de Westinghouse, fabricadas en el Laboratorio Nacional de Idaho de los Estados Unidos de América con pastillas ADOPT de alta densidad (pastillas de dióxido de uranio de Westinghouse dopadas con óxido de cromo y alúmina para mejorar el rendimiento del combustible) y pastillas de siliciuro de uranio (que mejoran la seguridad y la rentabilidad económica de la planta) rodeadas de una vaina de circonio revestido de cromo (para aumentar la resistencia a la oxidación y la corrosión).

### A.3.2. Garantía del suministro

65. En diciembre de 2010, la Junta de Gobernadores del Organismo aprobó la creación del 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 (Kazajstán).

66. El Banco de UPE del OIEA en Kazajstán (figura A-9) fue establecido y comenzó a funcionar el 17 de octubre de 2019, cuando se recibieron en la Instalación de Almacenamiento de UPE del OIEA los 32 cilindros 30B llenos previstos en el contrato de suministro con Orano Cycle. Además, el 10 de diciembre de 2019 se recibieron los 28 cilindros 30B llenos estipulados en el contrato de suministro con Kazatomprom.



*Fig. A-9. Instalación de Almacenamiento de UPE del OIEA en Kazajstán con los contenedores de UPE. (Fotografía: Ministerio de Relaciones Exteriores de Kazajstán)*

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



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

#### **Transporte de combustible gastado**

68. En los Estados Unidos de América, la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) certificó el bulto de transporte HI-STAR 100MB de Holtec International en agosto de 2019. El diseño es una mejora de un modelo anterior que permite transportar combustible con mayores grados de quemado y tiempos de refrigeración más cortos que su predecesor. En la central nuclear de San Onofre se reanudaron en mayo de 2019 las transferencias de combustible gastado, que se habían suspendido en agosto de 2018. La NRC aprobó la reanudación de las operaciones, tras concluir la investigación de un incidente ocurrido durante la colocación de un recipiente de combustible gastado en la cámara de almacenamiento.

69. En agosto, el Gobierno de Belarús aprobó oficialmente una estrategia de gestión del combustible gastado para la nueva central nuclear del país. La estrategia prevé enviar el combustible gastado de la central nuclear a la Federación de Rusia para su reprocesamiento, así como la devolución de los desechos radiactivos para su disposición final en Belarús.

70. En la Federación de Rusia se realizaron las primeras transferencias de los conjuntos combustibles nucleares gastados dañados de la base técnica flotante de Lepse, en el astillero de Nerpa, a Murmansk. El combustible será enviado posteriormente a la planta de Mayak, para su reprocesamiento como parte de un programa gestionado por el Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo (BERD).

#### **Almacenamiento de combustible gastado**

71. Hasta la fecha, se han descargado de las centrales nucleares alrededor de 400 000 toneladas de metal pesado como combustible nuclear gastado, de las cuales aproximadamente el 30 % se ha reprocesado. El resto se almacena en las piscinas de los reactores o en las 151 instalaciones de almacenamiento de combustible gastado situadas fuera de los emplazamientos en 27 países. En 2019, más de 6630 conjuntos combustibles gastados procedentes de reactores RBMK-1000 de las centrales nucleares de Leningrado y Kursk se transfirieron y almacenaron en seco en el Complejo Minero y Químico.

72. En el Japón se publicaron en febrero las fotografías de los restos de combustible tomadas dentro de la vasija de contención primaria de la Unidad 2 de la central nuclear de Fukushima Daiichi. Al reconocimiento fotográfico siguió otro reconocimiento, hecho con una sonda teledirigida, en que fue posible tomar muestras de los restos en cinco lugares distintos, para una caracterización y un análisis más completos. En abril de 2019 comenzó la retirada de 566 conjuntos combustibles gastados de la Unidad 3 de la central nuclear de Fukushima Daiichi, tras las obras realizadas en la plataforma de servicio del reactor para eliminar los escombros del accidente. Los conjuntos combustibles serán transferidos a la piscina centralizada del emplazamiento.

73. En el Reino Unido comenzó en agosto de 2019 un programa quinquenal destinado a reembalar los contenedores históricos de plutonio de Sellafield, con la apertura del primero de esos contenedores y su reembalaje en un recipiente externo moderno y más robusto. La retirada del combustible del parque de reactores de Magnox llegó a su fin, al concluir las últimas transferencias de combustible gastado de los emplazamientos de Wylfa y Calder Hall en septiembre. El combustible gastado fue transportado a Sellafield, para su almacenamiento antes del reprocesamiento. Los trabajos destinados a retirar los elementos fértiles restantes del reactor rápido de Dounreay han llegado a su punto medio. Se requirieron herramientas teledirigidas especializadas para retirar los elementos atascados que se habían dejado dentro del núcleo en 1977, cuando el reactor fue puesto en régimen de parada.

74. En Ucrania, la Instalación de Almacenamiento Provisional de Combustible Nuclear Gastado de Chornóbil (para el almacenamiento y reprocesamiento del combustible gastado de las Unidades 1, 2 y 3 de la central nuclear de Chornóbil) finalizó la fase previa a la puesta en servicio en septiembre de 2019,

y entrará oficialmente en pleno funcionamiento una vez que el órgano regulador conceda al explotador (la central nuclear de Chornóbil) una licencia de explotación individual.

### Reprocesamiento de combustible gastado

75. Desde el cierre de la planta de reprocesamiento de óxido térmico del Reino Unido, la capacidad anual mundial de reprocesamiento de combustibles gastados comerciales es de aproximadamente 4000 toneladas por año (lo que podría aumentar una vez que la planta de reprocesamiento de Rokkasho vuelva a estar plenamente operativa).

## A.4. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de los desechos radiactivos

### A.4.1. Clausura de instalaciones nucleares

76. Al 31 de diciembre de 2019, había en el mundo 186 reactores de potencia en régimen de parada o en proceso de clausura. De ellos, 17 estaban totalmente clausurados, y varios otros estaban llegando a las etapas finales de la clausura. Más de 150 instalaciones del ciclo del combustible estaban en régimen de parada definitiva o en proceso de clausura, y cerca de 130 ya estaban clausuradas (figura A-10).

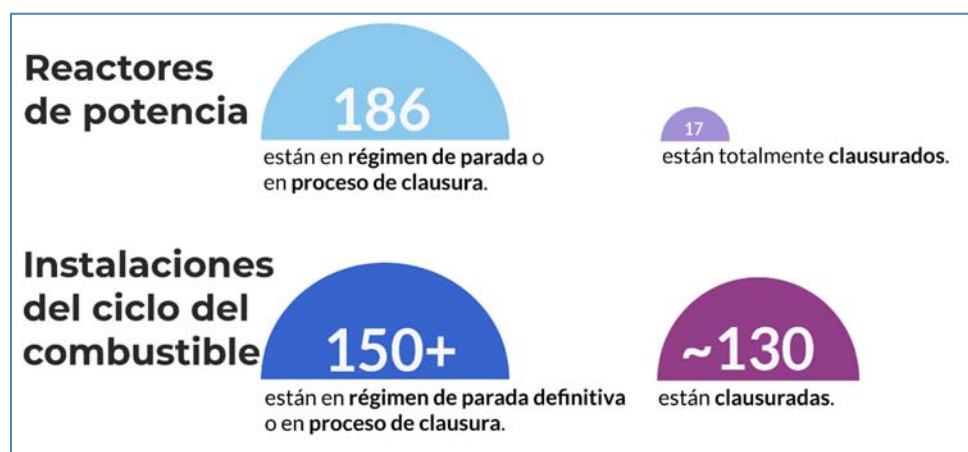
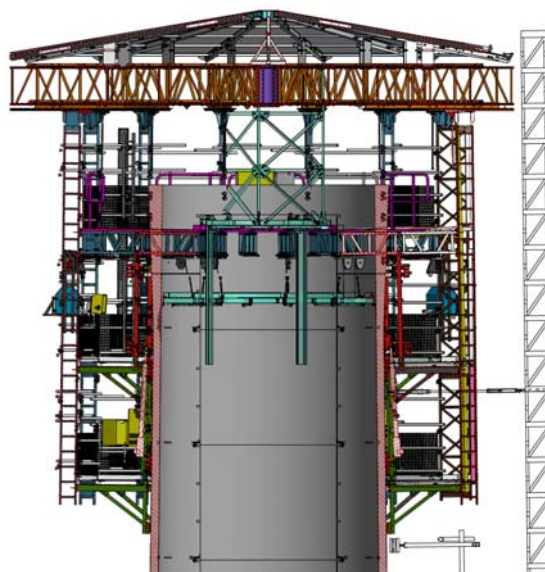


Fig. A-10. Situación mundial de las clausuras en 2019.

77. Al 31 de diciembre de 2019, más de 560 reactores de investigación y conjuntos críticos estaban en régimen de parada definitiva, y en 440 de ellos había concluido la clausura; cerca de 70 reactores de investigación se encontraban en la fase de clausura y alrededor de 60 estaban en régimen de parada definitiva a la espera de la clausura.

78. En septiembre de 2019, el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea firmó un acuerdo con Sogin, la empresa pública italiana responsable de las actividades de clausura y de la gestión de los desechos radiactivos, en relación con el desmantelamiento del reactor de investigación ISPRA-1.

79. El despliegue de tecnologías de clausura de valor comprobado y las actividades de investigación y desarrollo están ofreciendo mejoras continuas en esta esfera, principalmente en los países con grandes programas nucleoelectrónicos. Un ejemplo de una tecnología innovadora que se ha utilizado con éxito es la plataforma de desplazamiento vertical autónomo diseñada para ayudar a demoler la chimenea de ventilación de una antigua planta de reprocesamiento del emplazamiento de Sellafield (figura A-11).



*Fig. A-11. Plataforma de desplazamiento vertical autónomo diseñada para ayudar a demoler la chimenea de ventilación de una antigua planta de reprocesamiento del emplazamiento de Sellafield. (Fotografía: Sellafield Ltd.)*

80. En Bulgaria, Eslovaquia, Lituania y Ucrania prosiguen los proyectos de clausura de centrales nucleares respaldados por el Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo. Como ejemplos de los avances cabe señalar el traslado de los generadores de vapor de la sala del reactor de la central nuclear Bohunice V-1 a la sala de turbinas, para su fragmentación ulterior (figura A-12), y el inicio del proyecto de la central nuclear de Ignalina para el desmantelamiento de su reactor de alta potencia tipo canal y el almacenamiento del grafito.



*Fig. A-12. Retirada de los últimos 12 generadores de vapor, de 145 toneladas, de la central nuclear Bohunice V-1 clausurada en Eslovaquia. (Fotografía: Empresa de Actividades Nucleares y de Clausura JAVYS)*

81. El proyecto SHARE (Análisis por los Interesados de las Investigaciones sobre la Clausura) propuesto por varios países miembros de la Unión Europea fue aceptado por la Comisión Europea y dio inicio a mediados de junio de 2019. A más tardar al final de 2021, este proyecto presentará una hoja de ruta inclusiva para la investigación en campos técnicos y no técnicos, que permita a los interesados trabajar juntos para mejorar la seguridad, reducir los costos y minimizar el impacto ambiental de la clausura de las instalaciones nucleares.

82. El Organismo de Energía Atómica del Japón (JAEA) publicó la Hoja de Ruta de la Parte Final del Ciclo del Combustible, que expone la política a largo plazo de este Organismo para la clausura de sus instalaciones y para el procesamiento y la disposición final de los desechos radiactivos correspondientes. Esta hoja de ruta será examinada por el Servicio de Examen Integrado por Homólogos para la Gestión de Desechos Radiactivos y de Combustible Gastado, la Clausura y la Rehabilitación (ARTEMIS) en 2020.

83. En septiembre de 2019, la Corporación de Indemnización por Daños Nucleares y Facilitación de la Clausura del Japón publicó el Plan Estratégico Técnico de 2019 para la Clausura de la Central Nuclear de Fukushima Daiichi de la Compañía de Energía Eléctrica de Tokio, que contiene recomendaciones para determinar los métodos de recuperación de los restos de combustible de la Unidad 2, la primera unidad de la que se retirarán los restos. En el emplazamiento de la central nuclear de Fukushima Daiichi están avanzando los trabajos de clausura, en particular las investigaciones internas de la Unidad 2 y la retirada del combustible de la piscina de combustible gastado de la Unidad 3.

#### A.4.2. Rehabilitación ambiental

84. El explotador Magnox ha hecho grandes progresos en la rehabilitación de la antigua Planta de Tratamiento de Efluentes Líquidos del emplazamiento de Harwell en el Reino Unido (figura A-13). Los trabajos en el emplazamiento de 4,2 hectáreas comenzaron en febrero de 2018, y para el final de octubre de 2019 se habían excavado, analizado y asignado a las rutas apropiadas de disposición final fuera del emplazamiento 54 000 toneladas de materiales. Todos los desechos de las obras se embalan en bolsas para materiales a granel de 0,9 metros cúbicos, que se analizan por espectrometría gamma de alta resolución. Se espera concluir los trabajos de rehabilitación dentro del verano de 2020, para continuar con las labores destinadas a levantar los controles reglamentarios y concluir la recuperación del emplazamiento en 2021, después de lo cual el terreno será devuelto a su propietario para su reutilización como parte del desarrollo del Campus de Harwell.

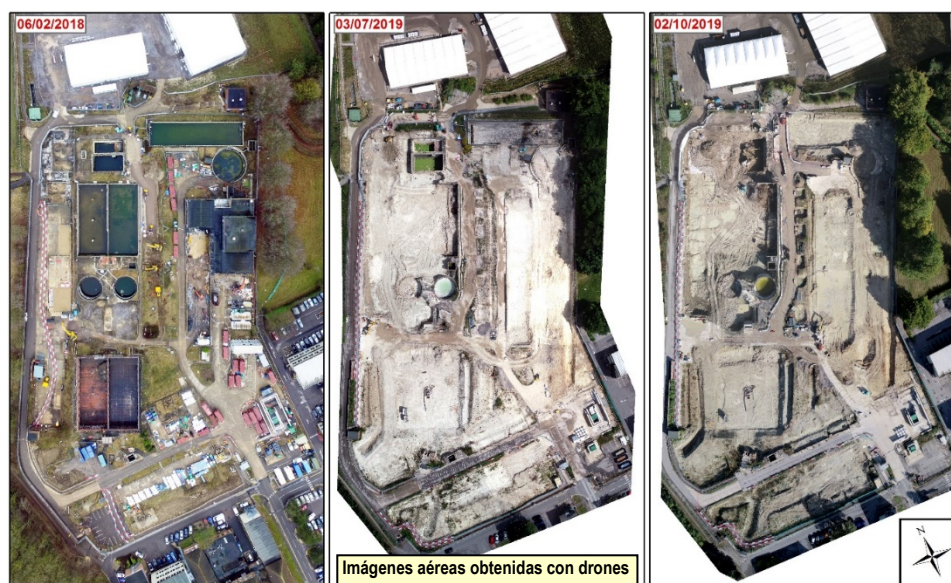


Fig. A-13. Imágenes aéreas obtenidas con drones que muestran los avances en la rehabilitación de la Planta de Tratamiento de Efluentes Líquidos del emplazamiento de Harwell, en el Reino Unido. (Fotografías: Magnox Ltd.)



85. En febrero de 2019, Energy Resources of Australia, el explotador de la mina de uranio de Ranger (figura A-14), finalizó el estudio de viabilidad del cierre de la mina, que contiene un calendario detallado para la rehabilitación y estima los costos conexos en 830 millones de dólares australianos. La rehabilitación progresiva comenzó ya en 2012, y los hitos importantes hasta la fecha comprenden el relleno del Tajo 1 con colas y escombros, la clausura de una rampa de exploración subterránea, el dragado de las colas de la instalación de almacenamiento de colas al Tajo 3, la construcción y explotación de un concentrador de salmuera para el tratamiento del agua, y el comienzo del restablecimiento de la vegetación. Con arreglo a las aprobaciones actuales, las actividades de extracción y procesamiento deberán cesar en enero de 2021, y la rehabilitación final deberá estar terminada para enero de 2026. Un objetivo fundamental de la rehabilitación es poner el ecosistema del emplazamiento en consonancia con el del entorno circundante, para que pueda finalmente incorporarse al Parque Nacional Kakadu.



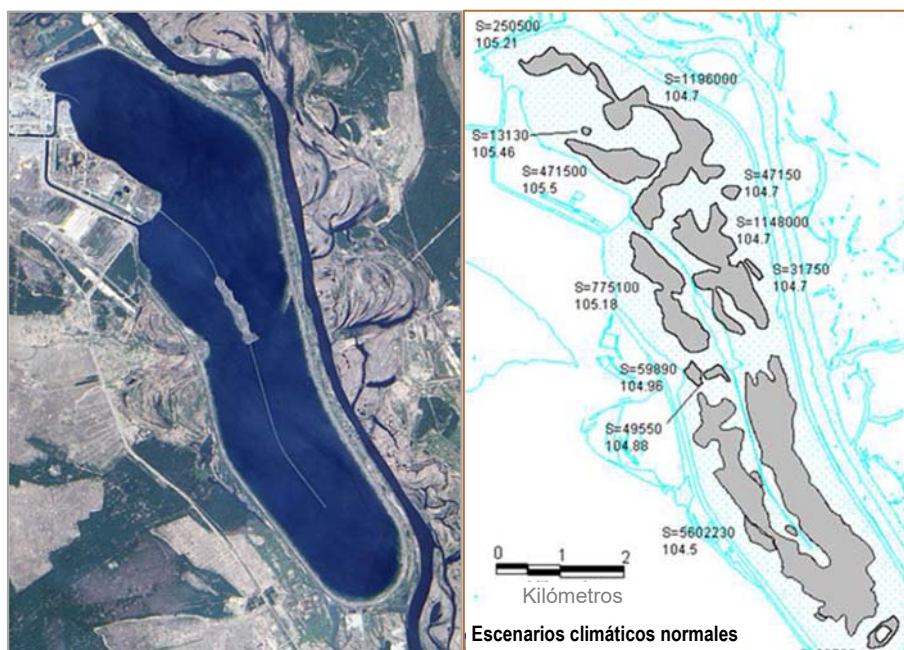
*Fig. A-14. Emplazamiento de la mina de uranio de Ranger.  
(Fotografía: Energy Resources of Australia)*

86. En los Estados Unidos de América, la Agencia de Protección Ambiental ha casi terminado las actividades de rehabilitación de un elemento importante del emplazamiento de la Mississippi Phosphates Corporation. Por un costo de aproximadamente 72 millones de dólares de los Estados Unidos, se ha instalado una cubierta especial sobre la pila de yeso occidental, que abarca una superficie de alrededor de 95 hectáreas. La base del sistema de cobertura es un material de polietileno lineal de baja densidad, que limitará la infiltración de la lluvia y reducirá la lixiviación de los contaminantes radiológicos y químicos de la pila. Esta cubierta permite el cierre definitivo del emplazamiento, reduciendo al mínimo el riesgo para las personas y el medio ambiente. El emplazamiento, que comenzó a explotarse en los años cincuenta, producía fertilizante de fosfato diamónico. Las operaciones cesaron en 2014, debido a la quiebra de la empresa, dejando más de 700 millones de galones de aguas residuales contaminadas y ácidas almacenadas en la instalación y residuos de fosfoyeso depositados en dos pilas. Una pila es un montículo creado por las lechadas de fosfoyeso y yeso.

87. En diciembre de 2019, Italia realizó avances considerables en la rehabilitación del emplazamiento de Trisaia al completar la retirada de una estructura de hormigón reforzado que contenía desechos radiactivos. Construida a finales del decenio de 1960, la estructura vertical y con forma de prisma estaba situada a 6,5 metros bajo tierra, tenía una masa de aproximadamente 130 toneladas y un volumen de 54 metros cúbicos.

88. En 2019 concluyó el proyecto de clausura de la piscina de refrigeración de la central de Chornóbil. Este proyecto comenzó en 2014, tras la realización de varios estudios radiológicos y ecológicos y la elaboración de un estudio de viabilidad y una evaluación del impacto ambiental con apoyo del

Organismo. Los estudios recomendaron que se cortara el suministro de agua a la piscina de refrigeración, para poder bajar el nivel del agua. También se recomendó que, durante esa reducción del nivel, se mantuviera la vigilancia ecológica y radiológica para garantizar en todo momento la seguridad de las personas y el medio ambiente. Los datos de la monitorización han indicado que, tal como había predicho el estudio de viabilidad, ha habido cambios ecológicos importantes y una amplia redistribución de los contaminantes radiológicos. La clausura ha reducido considerablemente los costos de funcionamiento del área de la piscina de refrigeración y ha mitigado los riesgos de inundación de la zona circundante. La situación ecológica del emplazamiento sigue mejorando de año en año, y la salud y la seguridad se mantienen mediante las restricciones impuestas en la zona de exclusión (figura A-15).



*Fig. A-15. Izquierda: imagen aérea de la piscina de refrigeración de la central nuclear de Chornóbil antes de la clausura. Derecha: simulación informática de las masas de agua restantes después de la clausura. (Fotografía: SSE Chornobyl NPP)*

#### **A.4.3. Gestión de desechos radiactivos**

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

Las opciones para la gestión de las fuentes radiactivas selladas en desuso al término de su vida útil están siendo estudiadas activamente e incluyen la disposición final conjunta con otros desechos en instalaciones adecuadas. Varios países, entre ellos Ghana y Malasia, están avanzando en sus proyectos de disposición final en pozos barrenados. En Malasia, el órgano regulador concedió la licencia para el proyecto al Organismo Nuclear Malasio en julio de 2019.

89. La puesta en servicio del conjunto de recursos móviles destinado al acondicionamiento de las fuentes radiactivas selladas en desuso de las categorías inferiores (categorías 3 a 5) en preparación para el proyecto de disposición final concluyó en junio de 2019, y en septiembre el conjunto de recursos fue enviado a Malasia. El comienzo de las operaciones de perforación de pozos está previsto para principios de 2020.

90. En 2019, Ghana terminó satisfactoriamente la caracterización y el acondicionamiento de las fuentes radiactivas selladas en desuso de las categorías 3 a 5, que han sido trasladadas a una instalación



de almacenamiento centralizado en espera de su colocación en un sistema de disposición final en pozos barrenados en el emplazamiento de la Comisión de Energía Atómica de Ghana.

91. En 2019 se llevaron a cabo varias operaciones de retirada de fuentes radiactivas selladas en desuso de las instalaciones de los usuarios para su almacenamiento en condiciones de seguridad tecnológica y física. En Macedonia del Norte se retiró la última fuente de este tipo de la categoría 1, y en Albania se retiraron dos de las categorías 1 y 2.

92. En varios otros Estados Miembros, entre ellos Chipre, Croacia, Eslovenia, Jordania, Nepal, Nicaragua y Túnez, ha comenzado la retirada de fuentes de las categorías 1 y 2.

93. En Curazao concluyeron las operaciones de acondicionamiento de fuentes radiactivas selladas en desuso y el personal local recibió la debida capacitación teórica y práctica en la gestión de esas fuentes.

94. Granada, Haití, Papua Nueva Guinea y San Vicente y las Granadinas, así como Curazao, establecieron y/o actualizaron sus inventarios nacionales de fuentes radiactivas selladas en desuso, además de los de las fuentes selladas en uso.

95. Varios Estados Miembros, entre ellos Barbados, Guyana, Kenya y Malasia, fortalecieron su capacidad de búsqueda y recuperación de fuentes huérfanas mediante actividades de capacitación nacionales y regionales.

96. El Catálogo Internacional de Fuentes y Dispositivos Radiactivos Sellados está siendo sometido a una amplia actualización del *software*, con aportaciones de los Estados Miembros y de interesados internos. En 2019 prosiguieron los esfuerzos para añadir más detalles sobre las fuentes y los dispositivos.

### **Gestión previa a la disposición final**

97. El Proyecto de Tratamiento Avanzado de Desechos Mixtos (AMWTP), realizado en el Laboratorio Nacional de Idaho del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), concluyó su misión en noviembre de 2019. Iniciado en 2003, este proyecto preparó más de 65 000 m<sup>3</sup> de desechos transuránicos de actividad intermedia (ILW) para su disposición final en la Planta Piloto de Aislamiento de Desechos (WIPP) de Nuevo México (Estados Unidos de América). El AMWTP utilizó una combinación de técnicas de recuperación, caracterización y tratamiento convencionales y de alta tecnología, incluida la robótica, para procesar los ILW del Laboratorio Nacional de Idaho y de otros 15 emplazamientos del DOE.

98. En julio de 2019 comenzaron los trabajos de procesamiento en la planta de procesamiento de desechos líquidos de la central nuclear de Chornóbil. Al mes de septiembre de 2019 había 120 bultos de desechos preparados para la disposición final. La capacidad de diseño de la planta es de 42 bultos de desechos por día (de 200 litros cada uno). Los primeros 120 bultos han sido trasladados al complejo de producción Vector para su disposición final.

99. En Finlandia se colocó la primera piedra de una planta de encapsulamiento de combustible nuclear gastado, y en septiembre de 2019 comenzó la construcción. La planta de encapsulamiento preparará el combustible nuclear gastado para su disposición final. Esta planta es un componente fundamental en la ejecución del programa de disposición final finlandés y está vinculada a la instalación de disposición final geológica que se está construyendo en Olkiluoto (Finlandia) (figura A-16).



*Fig. A-16. Construcción de la planta de encapsulamiento de combustible nuclear gastado de Posiva.  
(Fotografía: Posiva)*

100. En Georgia se propuso un emplazamiento para una instalación de almacenamiento provisional y una instalación de procesamiento con vistas a gestionar los desechos históricos existentes en el país. Esos desechos, heredados de las actividades realizadas entre los años cincuenta y ochenta, comprenden fuentes radiactivas, materiales radiactivos y otros artículos contaminados por sustancias radiactivas. La Unión Europea proporcionó financiación para el diseño de las instalaciones de almacenamiento provisional y procesamiento que está previsto construir en el emplazamiento. La Autoridad Sueca de Seguridad Radiológica (SSM), en colaboración con la Agencia Sueca de Desarrollo Internacional (SIDA), coordina las compras internacionales en apoyo del proyecto y presta asistencia al Gobierno de Georgia. En Moldova está en curso la ejecución de un proyecto para la gestión de los desechos radiactivos de la instalación de tipo Radon. Actualmente se están elaborando un plan detallado y los documentos técnicos conexos para la recuperación, la gestión de los desechos radiactivos y la descontaminación de la instalación.

101. En septiembre de 2019, el Reino Unido publicó una estrategia de gestión integrada de los desechos radiactivos para todos los desechos de ese tipo dimanantes de los 17 emplazamientos de la competencia de la Autoridad de Clausura de Instalaciones Nucleares, que incluyen centrales nucleares, instalaciones de reprocesamiento de combustible gastado, establecimientos de investigación y sitios de disposición final. También concluyó, tras seis años de trabajo, la descontaminación de los búnkeres del emplazamiento del Repositorio de Desechos de Actividad Baja que contienen materiales contaminados con plutonio. Los trabajos incluyeron el reembalaje y el traslado a instalaciones de almacenamiento seguro en Sellafield (Reino Unido).

### **Disposición final**

102. En 2019 siguieron funcionando las instalaciones de disposición final de desechos de actividad baja e intermedia de numerosos Estados Miembros. Entre ellas cabe mencionar las instalaciones de disposición final en zanjas para desechos de actividad muy baja (p. ej., en España, 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, la Federación de Rusia, Francia, la India, el Japón, 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, la Federación de Rusia, Finlandia, Hungría, Noruega, la República Checa y la República de Corea).

103. Además, se están construyendo las instalaciones de disposición final de desechos de actividad baja en la Instalación de Disposición Final Nacional (NDF) del emplazamiento de Radiana, cerca de la central nuclear de Kozloduy de Bulgaria, y en el emplazamiento del repositorio de desechos nucleares de Anarak de la República Islámica del Irán. Según los planes, la fase 1 de la construcción de la NDF concluirá al final de julio de 2021, y las operaciones de disposición final comenzarán tras la puesta en servicio en 2023 (figura A-17). En la República Islámica del Irán se están construyendo las instalaciones de apoyo operacional, que está previsto terminar en 2022, y se espera contar con una licencia de explotación para 2025.



*Fig. A-17. Construcción de la NDF en el emplazamiento de Radiana, cerca de la central nuclear de Kozloduy; la imagen muestra una parte del complejo administrativo (izquierda), el edificio de recepción de desechos y almacenamiento intermedio (derecha) y los cimientos de cemento-loess de la Plataforma de Disposición Final 1 (extrema derecha).*

104. En Lituania se anunció en marzo de 2019 la licitación para la construcción de una instalación de disposición final cerca de la superficie en la central nuclear de Ignalina, y el comienzo de las obras está previsto para 2020. En Bélgica se presentó en febrero de 2019 la solicitud de licencia para la instalación de Dessel.

105. En septiembre de 2019 concluyeron las negociaciones entre Croacia y Eslovenia sobre un posible repositorio conjunto de desechos de actividad baja, con el acuerdo de construir y explotar dos repositorios nacionales independientes. Eslovenia seguirá preparando la solicitud de licencia para la construcción del repositorio de Vrbina situado cerca de la central nuclear de Krško, y Croacia establecerá un repositorio en forma de cámaras de hormigón en Čerkezovac.

106. En el verano de 2019 concluyeron el diseño técnico y la evaluación de la seguridad correspondiente de un repositorio de desechos de actividad baja en El Tuwaitha (Iraq), que se presentaron al Ministerio de Ciencia y Tecnología del Iraq, en calidad de explotador, y al Ministerio de Medio Ambiente. El diseño técnico fue financiado por la Comisión Europea.

107. En el Pakistán se seleccionó un emplazamiento para una instalación de disposición final cerca de la superficie de desechos de actividad baja, en la meseta de Potwar, y se comenzó a trabajar en el diseño inicial.

108. En Alemania prosigue la construcción del repositorio Konrad para desechos de actividad intermedia, y en junio de 2019 concluyeron las obras de excavación para la estación de transferencia de desechos del pozo 2.

109. Varios Estados Miembros están haciendo progresos importantes en la disposición final de desechos de actividad alta (HLW). Finlandia está construyendo una instalación geológica profunda, Suecia se encuentra a la espera de una decisión final sobre su solicitud de licencia y Francia está finalizando la solicitud de licencia para la instalación de Cigéo. En Finlandia se han adjudicado los contratos de construcción de los dos primeros túneles de transporte de desechos y los cinco primeros túneles de deposición, donde se colocará el combustible nuclear gastado encapsulado. Según los planes, las obras de construcción de los túneles comenzarán a principios de 2020 y durarán dos años y medio, aproximadamente. En Suecia, el órgano regulador aprobó la información suplementaria proporcionada por la Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares (SKB) para dar respuesta a las preguntas planteadas por el Tribunal de Tierras y Medio Ambiente en el marco del proceso de concesión de la licencia para un repositorio geológico profundo. La decisión final recaerá en el Gobierno sueco. En Francia están avanzando los trabajos relativos al proyecto de Cigéo de construcción de un repositorio geológico profundo de desechos de actividad alta en la arcilla callovo-oxfordiense, y está previsto presentar la solicitud de licencia en 2020.

110. Otros Estados Miembros también lograron hitos programáticos importantes en la disposición final de desechos de actividad alta. En China se obtuvo el 6 de mayo de 2019 la autorización final para la construcción de un laboratorio de investigación subterráneo en la zona de Beishan del desierto de Gobi (formación granítica). Este laboratorio tiene por objeto investigar la idoneidad de la roca granítica local para albergar un repositorio geológico profundo de desechos de actividad alta. Se construirá a una profundidad de 560 metros, y estará abierto a las solicitudes de otros Estados Miembros interesados en realizar investigaciones o participar en ellas. Además, se está avanzando en la selección de un emplazamiento para un posible repositorio en una formación arcillosa de China. El primer proyecto terminó a finales de 2018 y fue aceptado por la Autoridad de Energía Atómica de China en octubre de 2019. Se han encontrado dos emplazamientos posibles, que se estudiarán más a fondo.

111. En el Reino Unido comenzó en Inglaterra (diciembre de 2018) y en Gales (enero de 2019) un nuevo programa de selección del emplazamiento para un repositorio geológico profundo de desechos radiactivos de actividad más alta. Actualmente, Radioactive Waste Management (RWM) Ltd. (el explotador) está trabajando activamente con las posibles comunidades interesadas y con la población en general para crear conciencia, responder a las preguntas y debatir la posibilidad de que acojan una instalación de disposición final geológica. RWM ha realizado un examen de alto nivel de los datos geológicos de interés para la seguridad de una instalación de disposición final geológica, que servirá de base para los debates iniciales.

112. En los Estados Unidos de América, la oficina externa de Carlsbad del DOE y la Nuclear Waste Partnership adjudicaron un contrato para la construcción de un nuevo pozo de servicio en la WIPP. El nuevo pozo es un elemento clave de los esfuerzos por restablecer el funcionamiento a plena capacidad del repositorio de desechos de actividad de baja e intermedia de Carlsbad, en Nuevo México, tras su reapertura el 9 de enero de 2017 y la aceptación del primer envío el 10 de abril del mismo año.

## **B. Fisión avanzada y fusión**

### **B.1. Fisión avanzada**

113. Los reactores nucleares avanzados y sus aplicaciones están en auge en todas las regiones del mundo, al ser vistos como sistemas de energía nuclear capaces de contribuir a la transición mundial hacia el establecimiento de sistemas energéticos más sostenibles, asequibles y fiables. Estos reactores son también más adecuados para formar parte de las futuras matrices de energía eléctrica sin emisiones



de carbono, que contendrán grandes proporciones de distintas fuentes de generación de electricidad. En particular, una tecnología prometedora es la de los SMR, que pueden satisfacer las necesidades básicas de energía eléctrica limpia con la flexibilidad operacional requerida para dar cabida a distintas energías renovables y responder a la demanda. Estos reactores son también particularmente adecuados para aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear, tales como la desalación, la producción de hidrógeno, la calefacción y refrigeración urbanas y varias aplicaciones industriales de alto consumo de energía.

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

114. Actualmente hay varios diseños de reactores refrigerados por agua con tecnologías evolutivas e innovadoras en construcción, puesta en servicio o explotación en distintas partes del mundo. Muchas de las lecciones aprendidas de la explotación de estos reactores en los últimos 50 años aún se están aplicando. Los avances recientes en la tecnología de los reactores refrigerados por agua comprenden mejoras de los diseños existentes y el desarrollo de diseños nuevos, el establecimiento de objetivos comunes de aumento de la seguridad, el uso más eficiente de los recursos y un aumento de la rentabilidad económica. En la mayoría de los conceptos evolutivos, los sistemas de seguridad tienen características pasivas que no dependen del suministro de energía eléctrica, e incluyen mayores inventarios de agua que permiten resistir por días, en lugar de horas, en caso de condiciones imprevistas, como un apagón prolongado en la central. Otro aspecto importante del desarrollo de los reactores refrigerados por agua es el diseño, ensayo y construcción de reactores de agua a presión (PWR) integrados pequeños, modulares y hechos en fábrica (véase la sección B.2.2).

115. En la Argentina, está previsto construir un reactor de agua pesada (HWR) CANDU 6 y se está estudiando la posibilidad de establecer también un reactor de agua a presión HPR1000. Además, este país tiene planificado desarrollar todas las capacidades de producción de combustible. En el Brasil, se están explorando las opciones de asociación para reanudar y terminar la construcción de la central nuclear Angra 3 con vistas a su explotación comercial a partir de 2026.

116. En el Canadá, está previsto terminar la renovación de las centrales nucleares de Bruce y Darlington de Ontario a más tardar en 2032, con una inversión total de 26 000 millones de dólares canadienses, y la central nuclear de Pickering será puesta en régimen de parada en 2025. En la Argentina, China, Rumania y el Reino Unido se está estudiando la posibilidad de construir nuevos reactores CANDU.

117. China sigue teniendo el programa nacional de desarrollo de reactores de agua ligera avanzados más ambicioso del mundo. El Gobierno ha reanudado el proceso de aprobación de nuevas centrales y está estudiando la posibilidad de aplicar la fijación de precios del carbono. Todas las nuevas centrales utilizarán la explotación plenamente digital, incluso para la instrumentación y el control y para los sistemas de protección de los reactores. Las nueve centrales nucleares de Qinshan han mantenido un factor de capacidad de aproximadamente el 90 % desde 2013. En lo que respecta a los reactores de agua pesada de China, la atención se centra en la explotación a largo plazo y en la prolongación de la vida útil de los tubos de presión, así como en la preparación para la sustitución de los tubos.

118. Según las proyecciones, la India aportará el 25 % del crecimiento mundial de la demanda de energía de aquí a 2040. La ampliación del parque actual se basa en los HWR indios de 700 MW(e) y en tecnologías de PWR importadas. El Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas está desarrollando un PWR avanzado de cuatro bucles y aproximadamente 900 MW(e) (el Reactor Indio de Agua a Presión), junto con las instalaciones de ensayo correspondientes. La cadena de suministros para la fabricación ha mejorado en este país.

119. En el Pakistán, se ha presentado una nueva solicitud de renovación de la licencia del reactor de agua pesada de la central nuclear de Karachi para el período 2019-2024.

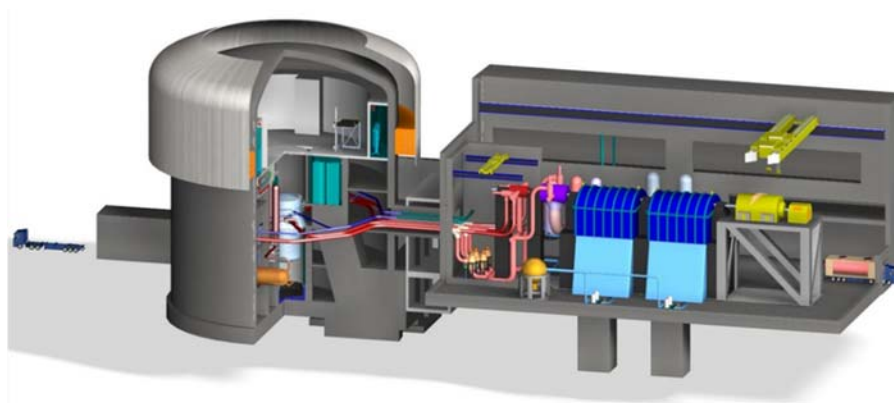
120. La Corporación de Energía Eléctrica de Corea está desarrollando reactores de agua a presión para los mercados de exportación, con la adición de un PWR avanzado de 1 GW(e) y de iPOWER, un PWR innovador completamente pasivo de 1250 MW(e), al reactor APR1400 ya existente. Las actividades de I+D relativas a los reactores de agua pesada se relacionan principalmente con la explotación a largo plazo, la gestión de la vida útil de los canales de combustible (FCLM) y la sustitución de los tubos, así como con las directrices para la gestión de accidentes muy graves. Las Unidades 2, 3 y 4 de Wolsong podrían ser los primeros reactores CANDU 6 en utilizar la FCLM para prolongar la vida de diseño de sus tubos de presión.

121. En Rumania está previsto iniciar la renovación de la Unidad 1 de Cernavodă en 2026, tras la prolongación de la vida útil de los tubos de presión más allá de las 210 000 horas previstas en el diseño.

122. La Federación de Rusia se concentró en: 1) prolongar la vida útil de sus 20 WWER en funcionamiento y 2) elevar la potencia de estos en entre un 4 % y un 10 %. Las prolongaciones de la vida útil se basan en factores técnicos y económicos que alargan la duración de las centrales en entre 11 y 30 años. Rosatom recibió 36 pedidos de unidades WWER de distintas partes del mundo, que se encuentran ahora en diferentes etapas de la negociación, la planificación o la construcción.

123. En los Estados Unidos de América hay un total de 98 reactores nucleares en funcionamiento en 60 centrales nucleares de 30 estados, que suministran alrededor de un quinto de la electricidad total consumida anualmente en el país. La antigüedad promedio de estos reactores nucleares es de unos 38 años. El reactor nuclear de potencia más antiguo que está en funcionamiento, la Unidad 1 de Nine Mile Point en Nueva York, comenzó a ser explotado comercialmente en diciembre de 1969. El reactor más nuevo, que entró en funcionamiento en 2016, es la Unidad 2 de Watts Bar. En cuanto a los dos reactores nuevos en construcción —las Unidades 3 y 4 de Vogtle, basadas en la tecnología AP1000 de Westinghouse, en Georgia—, está previsto que entren en servicio entre 2021 y 2022.

124. El Canadá, China, la Federación de Rusia, el Japón y la Unión Europea son los signatarios del arreglo que prevé la participación en una labor de I+D conjunta para desarrollar conceptos de reactores supercríticos refrigerados por agua (SCWR) (figuras B-1 y B-2). El principal propósito del SCWR es generar electricidad de forma eficiente, económica y segura. La mayoría de las centrales de SCWR se conciben con miras a generar una potencia superior a 1000 MW(e) a presiones de operación del orden de 25 MPa y temperaturas de salida del reactor que van de 500 °C a 625 °C. Por consiguiente, los SCWR podrían producir electricidad con eficiencias térmicas de entre el 43 % y el 48 %, lo que es considerablemente más que la eficiencia térmica del parque actual de sistemas de reactores nucleares. La alta temperatura de salida del núcleo de los SCWR facilita la cogeneración, que incluye la producción de hidrógeno, la calefacción y la producción de vapor.



*Fig. B-1. Diseño del SCWR canadiense: edificio del reactor y edificio de las turbinas.  
(Fuente: OIEA)*



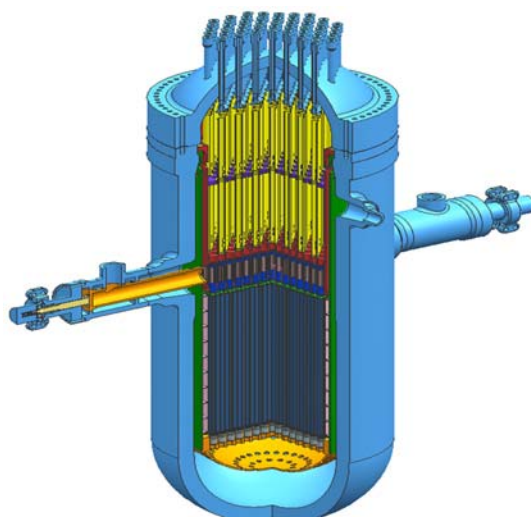


Fig. B-2. Concepto del núcleo del reactor en el diseño del SCWR chino. (Fuente: OIEA)

## B.2. Sistemas de neutrones rápidos

125. El primer reactor que produjo electricidad fue el Reactor Reprodutor Experimental I, de los Estados Unidos de América, en 1951. Este reactor de 100 kW(e) estaba refrigerado por un metal líquido, una aleación de sodio y potasio. Posteriormente se desarrolló en distintas partes del mundo la tecnología de reactor rápido más madura, el reactor rápido refrigerado por sodio (SFR), que ya ha superado los 400 años-reactor de experiencia operacional con unidades experimentales, de prototipo, de demostración y comerciales en varios países, como Alemania, China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, la India, el Japón y el Reino Unido. Hay varios reactores rápidos innovadores (de Generación IV) refrigerados por sodio, por plomo y por una mezcla eutéctica plomo-bismuto (LFR) y por gas (GFR) en desarrollo a nivel nacional e internacional. También se está desarrollando el reactor rápido de sales fundidas, como opción a largo plazo.

126. En la República Popular China está en fase de diseño y construcción un innovador SFR de demostración, el CFR-600, que debería entrar en funcionamiento en 2025. Varios institutos están desarrollando SMR refrigerados por plomo y por plomo-bismuto, con inclusión de sistemas accionados por acelerador (SAA). El primer reactor subcrítico de energía nula y aleación de plomo-bismuto de China, Qixing (Venus) III, alcanzó su primera criticidad el 9 de octubre de 2019 (figura B-3). El SAA de energía nula se utilizará para la investigación sobre la transformación de los desechos radiactivos de período largo en desechos de período corto.



Fig. B-3. El reactor Qixing (Venus) III alcanza su primera criticidad.  
(Fotografía: Instituto de Energía Atómica de China)

127. De conformidad con el programa nucleoelectrico en tres etapas de la India, la construcción del prototipo de reactor reproductor rápido (PFBR) de 500 MW(e) ha llegado a la etapa final; el reactor se encuentra en una fase avanzada de la puesta en servicio y se espera alcanzar la primera criticidad

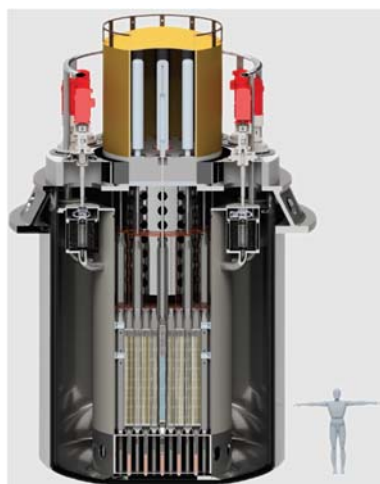
en 2020. El PFBR será el sucesor de un pequeño reactor de ensayo de 12 MW(e) construido por el Centro de Investigaciones Atómicas Indira Gandhi en 1985. Está previsto construir otros dos reactores reproductores rápidos en el mismo emplazamiento de Kalpakkam.

128. Desde 1980, la Federación de Rusia explota el BN-600, un prototipo industrial de reactor rápido refrigerado por sodio. Otro reactor de este tipo, el BN-800 de 880 MW(e), está en explotación comercial desde 2016. En agosto de 2019 terminaron los ensayos hidráulicos de la vasija del reactor de investigación rápido multipropósito (MBIR) (figura B-4), que reemplazará al reactor experimental BOR-60 en 2024. El BREST-OD-300 refrigerado por plomo y el SVBR-100 refrigerado por una mezcla de plomo-bismuto se encuentran en el proceso de concesión de licencias.



*Fig. B-4. Instalación del MBIR.*

129. El Gobierno francés decidió ampliar su programa de I+D sobre tecnología de SFR y retrasar los planes para construir un prototipo de SFR de Generación IV (Astrid). Bélgica ha decidido construir el MYRRHA, un reactor refrigerado por plomo-bismuto que puede funcionar en modo subcrítico y crítico como sistema accionado por acelerador; según los planes, la primera instalación estará en funcionamiento antes del final de 2024. El diseño de la primera central basada en el Reactor Sueco Avanzado Refrigerado por Plomo (SEALER) de 55 MW(e) del Reino Unido (SEALER-Reino Unido) (figura B-5) fue sometido al examen del Departamento de Empresas, Energía y Estrategia Industrial del Reino Unido. Otros diseños de reactor rápido que se están desarrollando en Europa son ALFRED, la demostración europea de un reactor rápido refrigerado por plomo de Generación IV con características similares a las de los SMR, que Rumania ha ofrecido construir en Mioveni, y ALLEGRO, un reactor rápido refrigerado por gas de carácter experimental.



*Fig. B-5. Diseño del reactor rápido refrigerado por plomo SEALER-Reino Unido de 55 MW(e).*

130. En los Estados Unidos de América, TerraPower ha terminado el diseño conceptual del núcleo del reactor de onda progresiva de ‘reproducción y quema’. Westinghouse está desarrollando un innovador reactor modular pequeño refrigerado por plomo de 450 MW(e). En febrero de 2019, el Departamento de Energía de los Estados Unidos anunció la intención de construir un reactor de ensayo versátil (VTR) para los estudios referentes a la irradiación con flujos neutrónicos de muy alta energía.

131. El OIEA apoya a sus Estados Miembros en el desarrollo de la tecnología de los reactores rápidos organizando y ejecutando proyectos coordinados de investigación (PCI), talleres y estudios sobre temas especiales. En particular, se están realizando dos PCI que contribuirán al adelanto de la tecnología de los reactores rápidos: el primero se refiere a los valores de referencia neutrónicos de los ensayos de puesta en marcha del Reactor Experimental Rápido de China y el segundo, a un análisis multifísico de un experimento de pérdida de flujo sin protección en la instalación de ensayo de flujo rápido (FFTF) de los Estados Unidos.

### **B.2.1. Reactores refrigerados por gas**

132. No obstante el largo historial de los reactores refrigerados por gas, los únicos que aún se explotan comercialmente son los 14 reactores avanzados refrigerados por gas del Reino Unido. Se prevé que algunos de estos reactores funcionarán hasta los primeros años del decenio de 2030, y que su vida útil se verá limitada principalmente por el comportamiento del grafito nuclear.

133. Los reactores refrigerados por gas que se están desarrollando para el despliegue a corto plazo son, sin excepción, reactores modulares pequeños de alta temperatura refrigerados por gas (HTGR). Sus diseños se basan en características de seguridad inherente y eliminan la mayoría de los sistemas de seguridad activa; el confinamiento de la radiactividad está garantizado por el combustible de partículas revestidas. Estos reactores, que utilizan helio como refrigerante y grafito como moderador y funcionan a temperaturas más altas (iguales o superiores a 700 °C) que las centrales nucleares actuales, aumentarán la eficiencia de la generación de electricidad y podrían, en principio, atender un amplio mercado de calor industrial.

134. En el Canadá están en curso varias actividades previas a la concesión de la licencia relacionadas con SMR, que incluyen cuatro diseños de HTGR. La Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear (CCSN) recibió la primera solicitud de licencia para un HTGR modular pequeño. La solicitud elaborada por Global First Power, con apoyo de Ontario Power Generation y de la Ultra Safe Nuclear Corporation, propone el despliegue de una central con un microrreactor modular de tipo HTGR en Chalk River, Ontario.

135. El comienzo de la explotación comercial del Reactor Modular de Lecho de Bolas de Alta Temperatura (HTR-PM) de China está programado para 2020. Esta planta de demostración a escala real, de 210 MW(e), consiste en 2 unidades de reactores acopladas a una misma turbina de potencia. Para el despliegue futuro, la misma configuración de reactores y generadores de vapor (6 unidades) se acoplará a una única turbina de potencia de 650 MW(e) en el diseño comercial HTR-PM600, y ya hay varios estudios de viabilidad en examen para el despliegue en China. El proyecto de renovación del reactor de ensayo HTR-10 ha concluido y está previsto realizar varias pruebas de demostración de la seguridad adicionales.

136. En el Japón se espera recibir el próximo año el permiso para poner nuevamente en marcha el reactor de ensayo de alta temperatura de 30 MW(t). En los años siguientes se realizarán nuevas demostraciones de la seguridad, se acoplará una turbina de potencia de helio y se demostrará la producción nuclear de hidrógeno a altas temperaturas. El Japón está impulsando también activamente el despliegue internacional de los SMR basados en su propia tecnología de HTGR mediante alianzas con otros países.

137. En los Estados Unidos de América están en curso actividades de cualificación del combustible, (ensayos de irradiación y calentamiento) que han confirmado la excelente retención de los productos de fisión del combustible tri-isotrópico (TRISO). Se han publicado los requisitos de diseño generales para

los reactores avanzados y los reactores de alta temperatura refrigerados por gas, que deberían facilitar un marco más adecuado para la concesión de licencias en el país. Prosigue la cualificación de algunos materiales, y se está prestando apoyo a las instalaciones de ensayo que ilustran las características de seguridad pasiva. El diseño del reactor de lecho de bolas XE-100 de 75 MW(e) y las actividades previas a la concesión de la licencia aún no han terminado.

138. Muchos países en fase de incorporación están estudiando la posibilidad de desplegar reactores de alta temperatura refrigerados por gas. La Arabia Saudita incluyó el despliegue de estos reactores en el Proyecto Nacional de Energía Atómica para las aplicaciones del calor industrial en el sector petroquímico. Jordania los incluyó en los estudios de viabilidad relativos al despliegue de SMR para la producción de electricidad, la desalación y la generación de calor industrial, y Polonia aún tiene planes de desplegar este tipo de reactores para aplicaciones del calor industrial. En Indonesia se ha renunciado a la construcción del reactor de potencia experimental de lecho de bolas de 10 MW(t), pero prosigue la I+D y está en curso un proyecto conjunto con China para desarrollar un reactor de tamaño comercial.

139. En la Comisión Europea continúan las actividades relacionadas con el despliegue de reactores de alta temperatura refrigerados por gas como parte del programa GEMINI+, que finalizará en 2020. En la Federación de Rusia y la República de Corea prosigue el desarrollo de tecnología. En Sudáfrica se ha interrumpido la labor de I+D relativa a un nuevo concepto de reactor de lecho de bolas AHTR-100.

140. El Organismo desarrolla y mantiene la Base de Conocimientos sobre el Grafito Nuclear, que contiene conocimientos y registros históricos sobre el grafito irradiado para facilitar el despliegue futuro de reactores moderados por grafito.

141. Además, han concluido los PCI del Organismo sobre la incertidumbre en el análisis de los reactores, la elaboración de criterios de diseño de seguridad para los HTGR modulares, y la aplicación del calor de los HTGR para una extracción de minerales más limpia y sostenible, y se están preparando los informes finales.

142. Atendiendo al creciente interés y al aumento de las solicitudes de los Estados Miembros, el Organismo ha realizado algunas actividades relacionadas con los reactores de sales fundidas (MSR). Se está preparando un documento acerca del estado de la tecnología de estos reactores, sobre la base de las actividades de I+D de los Estados Miembros. Algunas de las esferas de interés común con los reactores refrigerados por gas son los materiales a alta temperatura, el comportamiento del grafito y el combustible de partículas revestidas (utilizado en los diseños de reactores refrigerados por sales fundidas).

### **B.2.2. Reactores pequeños y medianos o modulares**

143. El desarrollo de la tecnología de los SMR para el despliegue inmediato y a corto plazo está avanzando en todo el mundo. En la Conferencia Internacional sobre el Cambio Climático y el Papel de la Energía Nucleoeléctrica, organizada por el Organismo en octubre de 2019, los Estados Miembros participantes señalaron que, con una producción típica de 300 MW(e), los SMR podrían constituir la fuente más efectiva de electricidad exenta de emisiones de CO<sub>2</sub> para sustituir las centrales que queman combustibles fósiles y están envejeciendo. Además, con el aumento de la proporción de energías renovables intermitentes en todos los continentes, los SMR se consideran indispensables para asegurar tanto el funcionamiento de carga base como la explotación flexible en sinergia con las energías renovables y asegurar así el suministro de energía.

144. Los mayores retos para el despliegue a gran escala de los SMR consisten en demostrar que la modularidad permitirá alcanzar los menores costos normalizados prometidos mediante la economía de la producción en serie, y en determinar si la simplificación del diseño y los tiempos más breves de construcción darán lugar a planes de financiación más fáciles y asequibles. Los países que poseen la tecnología y los países con economías en desarrollo que están estableciendo sus primeros programas nucleoelectrónicos aún distan mucho de tener una visión común de los requisitos y criterios que deben

cumplir el diseño y la tecnología de los SMR para ser viables. Por consiguiente, es de la máxima importancia que se definan las principales necesidades genéricas de los usuarios en relación con los SMR, teniendo en cuentas las diferentes políticas.

145. Más de 50 diseños y conceptos de SMR se encuentran en diferentes etapas del desarrollo para diversas aplicaciones.

146. En China y la Federación de Rusia concluyó la construcción de dos nuevas centrales nucleares con SMR, y se está trabajando en la puesta en marcha y en servicio con vistas a conectarse a la red de electricidad para la posible explotación comercial en 2020.

147. En la Argentina, en el emplazamiento de la central nuclear Néstor Carlos Kirchner, está en una etapa avanzada de la construcción el prototipo de módulo CAREM-25, en que se espera cargar el combustible y proceder a la puesta en marcha y en servicio en septiembre de 2022. El prototipo está diseñado para producir 100 MW(t) y 34 MW(e) brutos. Este SMR de tipo PWR integrado funcionará en modo de circulación enteramente natural y con características de seguridad pasiva. El CAREM-25 se desarrolló con tecnología nacional, y al menos un 70 % de sus componentes y de los servicios conexos proceden de empresas argentinas.

148. La hoja de ruta del Canadá para los SMR prevé posibles aplicaciones para la sustitución con y sin conexión a la red de las centrales de generación eléctrica alimentadas con diésel y combustibles fósiles, también en los sectores petrolífero y minero. Actualmente 12 diseñadores/suministradores de SMR están trabajando con la CCSN, y Global First Power está solicitando la licencia para la preparación del emplazamiento para un SMR en los Laboratorios de Chalk River.

149. En China ha concluido la construcción y se está procediendo a la puesta en servicio del HTR-PM, que producirá 210 MW(e) con dos módulos de reactor conectados a un sistema de turbogeneradores de vapor. En la sección B.2.1 figuran más detalles sobre el HTR-PM. China ha iniciado asimismo en Changjiang, en la provincia de Hainan, un proyecto de construcción del ACP100, conocido también como Linglong 1, que es un PWR integrado de 125 MW(e) diseñado como pequeño reactor de potencia multipropósito. Se estima que la construcción durará cinco años, con la puesta en marcha y en servicio previstas para 2025 con miras a generar electricidad, calor industrial y agua desalada. Con respecto a los SMR marinos basados en la tecnología de los reactores de agua a presión, China ha desarrollado tecnologías para tres diseños de SMR flotantes: el ACPR50S, el ACP100S y el CAP-F.

150. Durante la sexagésima tercera reunión ordinaria de la Conferencia General del Organismo, celebrada en septiembre de 2019, un consorcio nacional francés integrado por la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas de Francia, Électricité de France y TechnicAtome anunció el lanzamiento de NUWARD, un SMR de tipo PWR integrado de 170 MW(e) con convección forzada y sistemas de seguridad avanzados, que podría estar disponible en los mercados extranjeros a comienzos del decenio de 2030.

151. La Arabia Saudita y la República de Corea han aunado fuerzas para completar el diseño detallado de SMART, un PWR integrado de 110 MW(e) (365 MW(t)) del que los dos países tienen la propiedad conjunta. Este reactor se construirá en la Arabia Saudita y se utilizará para la cogeneración de electricidad y agua de mar desalada. El nuevo diseño optimizado ha aumentado la potencia e incorporado características de seguridad completamente pasiva. Una vez terminado, el diseño se presentará para la certificación en la República de Corea, en paralelo con la solicitud de licencia en la Arabia Saudita.

152. En la Federación de Rusia, la central nuclear flotante Akademik Lomonosov (figura B-6), con un SMR de tipo PWR compacto KLT-40S, llegó a Pevek, en la región de Chukotka, a mediados de septiembre, tras haber sido remolcada 4900 km, desde el muelle de recarga de combustible de Murmansk. La central nuclear flotante, que obtuvo la licencia de explotación en julio de 2019 y fue conectada a la red en diciembre del mismo año, consta de dos módulos de reactores KLT-40S de 35 MW(e) que juntos generan hasta 70 MW(e) y 50 gigacalorías de calor por hora, lo que es suficiente para abastecer de



energía eléctrica a una ciudad de 100 000 habitantes. El propósito de la central nuclear flotante es reemplazar la central clausurada de Bilibino y las centrales eléctricas a carbón que están envejeciendo, para suministrar electricidad a un complejo minero y a las plataformas petrolíferas del Ártico. Esta central nuclear puede producir también agua desalada.



*Fig. B-6. Central nuclear flotante Akademik Lomonosov. (Fotografía: Rosatom)*

153. En la Federación de Rusia, se está estudiando la posibilidad de construir el RITM-200, un SMR de tipo PWR integrado de 50 MW(e), en la República de Sajá (Yakutia). Este reactor fue diseñado y desplegado inicialmente para los buques rompehielos nucleares, pero ahora se está desarrollando la versión terrestre y conectada a la red, para su despliegue a corto plazo.

154. En 2019, el Reino Unido siguió trabajando en el desarrollo de tecnología para su SMR, un diseño de reactor modular pequeño basado en un PWR de tres bucles capaz de generar 450 MW de electricidad, con vistas a obtener la aprobación del diseño para el despliegue a nivel nacional en el decenio de 2030.

155. En los Estados Unidos de América, NuScale comenzó el examen de certificación del diseño con la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) en el primer trimestre de 2017 y se estima que recibirá la certificación del diseño a finales de 2022. El NuScale Power Module (NPM) es un reactor de agua a presión integrado con circulación natural y características de seguridad completamente pasiva. Los NPM de 60 MW(e) suministran energía eléctrica en forma incremental, pudiendo alcanzarse los 720 MW(e) brutos en una misma central nuclear. El tamaño de referencia actual de la central para los fines del diseño y la concesión de licencias es una configuración de 12 módulos, y se espera que esta central comience a funcionar a mediados del decenio de 2020 en el Laboratorio Nacional de Idaho.

156. La mayoría de los SMR refrigerados por agua son reactores de agua a presión ya sea compactos, integrados o de tipo bucle. Sin embargo, el Japón y los Estados Unidos de América han reforzado los proyectos de diseño y desarrollo de tecnología para el BWRX-300, un reactor de agua en ebullición (BWR) de circulación natural concebido para producir 300 MW(e), con características de seguridad pasiva y simplificación del diseño. El diseño de este SMR de tipo BWR con ciclo de vapor directo se basa en el ESBWR de 1520 MW(e) autorizado por la NRC.

157. A lo largo de 2019 avanzó también en varios países, como el Canadá y los Estados Unidos de América, el desarrollo de un subconjunto de SMR conocidos como microrreactores modulares. Un ejemplo de ellos es el Microrreactor Modular (MMR), con un gas de alta temperatura y un núcleo dotado de bloques prismáticos, diseñado para producir aproximadamente 5 MW(e). El MMR ha sido presentado a la CCSN para el examen del diseño del suministrador. Aún no existe un consenso mundial



sobre la definición y el intervalo de potencias de los microrreactores modulares. En los Estados Unidos de América se ha evaluado también el diseño de un reactor de agua a presión integrado denominado SMR-160.

158. En 2019, el Organismo inició un nuevo proyecto destinado a apoyar a los Estados Miembros interesados en establecer sistemas energéticos híbridos sin emisiones de carbono que comprendan distintas fuentes de energía renovable, SMR, el almacenamiento de energía y aplicaciones no eléctricas.

### **B.2.3. Iniciativas internacionales que promueven sistemas de energía nuclear innovadores**

159. El Proyecto Internacional sobre Ciclos del Combustible y Reactores Nucleares Innovadores (INPRO), establecido por el Organismo en el año 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 nucleoelectrica. El INPRO, integrado actualmente por 42 miembros —41 Estados Miembros del Organismo y la Comisión Europea— constituye un foro internacional en que se examinan las cuestiones de interés y la coordinación de las políticas, y en que los propietarios y los usuarios de la tecnología colaboran y se comunican sus necesidades e intereses en las esferas pertinentes.

160. A fin de promover una visión global del desarrollo sostenible de la energía nuclear en el siglo XXI, se han elaborado los documentos de las herramientas de modelización, análisis y formulación de hojas de ruta de los escenarios de sistemas de energía nuclear, que se publicarán próximamente. En 2019 se realizaron talleres y actividades de capacitación con estas herramientas en la Federación de Rusia y en México, y para 2020 está programada una actividad en Tailandia. El 2019 se celebró también, en la República de Corea, un Foro de Diálogo del INPRO titulado “Oportunidades y Desafíos de los Reactores Modulares Pequeños”. Estos foros de diálogo permiten al INPRO examinar junto con los Estados Miembros los aspectos de la sostenibilidad de los sistemas de energía nuclear que van cambiando.

### **B.2.4. Aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear**

Ya sea en forma de cogeneración o integrado con otros recursos de energía renovable, el uso de la energía nuclear en aplicaciones no eléctricas puede abrirse camino en una amplia variedad de sectores, como la desalación del agua, el transporte (p. ej., mediante la producción de hidrógeno para vehículos con pilas de combustible), el sector residencial (la calefacción y refrigeración urbanas) y las industrias (petroquímica, del acero y de producción de combustibles sintéticos).

161. En 2019 se utilizaron en el mundo un total de 74 reactores nucleares de potencia en explotación (15 de Asia y 59 de Europa) para generar 2122,92 gigavatios-hora (GW·h) de equivalente eléctrico del calor en apoyo de aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear. De estos reactores, 11 apoyaron la desalación (con 31,4 GW·h), 58 la calefacción urbana (1979,27 GW·h) y 33 las aplicaciones del calor industrial (1313,86 GW·h). El interés por las aplicaciones no eléctricas de la energía nuclear sigue aumentando en todo el mundo. El uso de la energía nuclear para atender estos sectores constituye un modo sostenible de garantizar la seguridad energética y combatir el cambio climático. La recuperación del calor residual de las centrales nucleares (es decir, del calor emitido por los condensadores de las centrales) y su uso en aplicaciones no eléctricas pueden conducir a un aumento global de la eficiencia térmica de la central y reducir el impacto ambiental de la descarga de ese calor residual en ríos y otros cuerpos de agua. La cogeneración con el calor residual recuperado puede compensar una parte importante de los costos de generación de la energía nucleoelectrica. 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 costos importantes en relación con el precio del agua producida por las plantas de desalación alimentadas por centrales eléctricas a gas o petróleo. De hecho, las centrales nucleares pueden generar también un calor industrial o vapor de proceso adecuado y económico, que es posible utilizar en varias otras aplicaciones, como la calefacción y refrigeración urbanas.

162. En China se anunció en noviembre de 2019 que Haiyang era la primera ciudad del país que estaba siendo abastecida con calor industrial, procedente de las dos unidades AP1000 de la central nuclear de Haiyang. Según la Compañía de Energía Nucleoeléctrica de Shandong (SDNPC), propietaria de la central nuclear de Haiyang, el proyecto se ampliará hasta abarcar toda la ciudad de Haiyang en 2021. La SDNPC estima que estas dos unidades pueden satisfacer la demanda futura de calefacción urbana en un área residencial de hasta 200 millones de metros cuadrados, permitiendo el ahorro de 6,6 millones de toneladas de carbón por año. Ya existen soluciones tecnológicas para el transporte de grandes cantidades de calor (del orden del gigavatio) por largas distancias (del orden de 100 km) con pérdidas mínimas de calor.

163. La desalación del agua de mar con el calor 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 e introducido en un sistema de desalación por destilación multiefecto se considera una opción viable en el estudio de proyectos de centrales nucleares. Esta opción permite satisfacer las necesidades de agua de una central nuclear durante todo su ciclo de vida: la construcción, la explotación y la clausura. Los adelantos en las tecnologías de la desalación, 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, aumentan el potencial de la desalación nuclear. La desalación integrada híbrida, térmica y por membrana, se considera una opción óptima, que 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, el Brasil, China, Egipto, la India, Jordania y el Pakistán, han expresado o reiterado su interés en la desalación nuclear.

164. Con el uso de la energía nuclear en la producción de hidrógeno, el parque flexible de reactores nucleares podría desempeñar un papel fundamental en la futura economía del hidrógeno y la mitigación del cambio climático. Las centrales nucleares actualmente en explotación pueden producir hidrógeno mediante la electrólisis avanzada de agua a baja temperatura. La rentabilidad económica de este proceso podría mejorarse utilizando la electricidad generada fuera de las horas punta. En los últimos años se han hecho progresos en varias otras tecnologías de producción de hidrógeno, como la electrólisis a alta temperatura y los ciclos de producción de hidrógeno termoquímicos o electrotermoquímicos. Estas tecnologías pueden integrarse en los futuros diseños de reactores de alta temperatura.

### B.3. Fusión

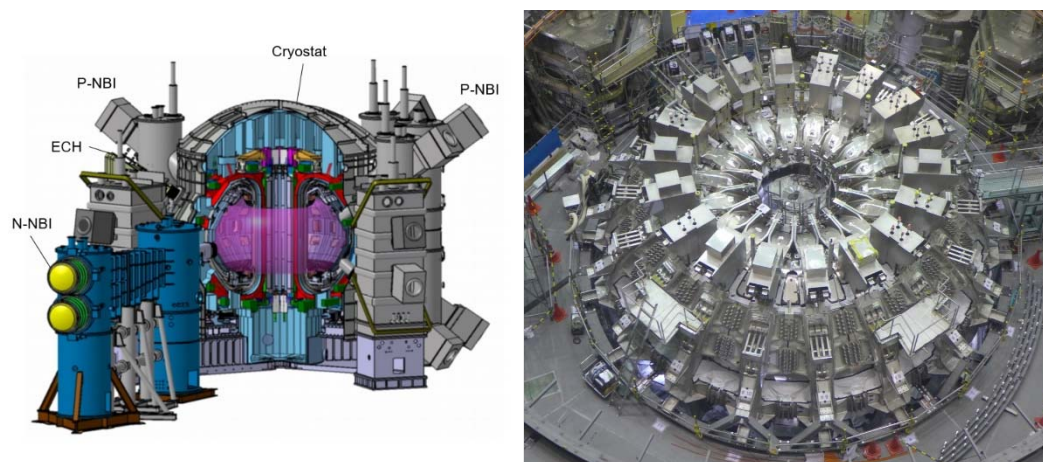
165. La construcción del ITER ha avanzado considerablemente y ya está terminado más del 73 % de las obras civiles (figura B-7). El calendario de construcción revisado de 2016 ha sido reconfirmado recientemente, manteniéndose intacto el plazo inicialmente acordado para la producción del primer plasma al final de 2025. El edificio del tokamak está listo para la instalación de la base del criostato, programada para marzo de 2020, y los trabajos relativos a este componente durarán más de cuatro años. Se espera que el ITER comience a funcionar a plena capacidad de fusión en 2035.



*Fig. B-7. Fotografías del emplazamiento de construcción del ITER en abril de 2014 (izquierda) y octubre de 2019 (derecha). (Fotografías: ITER)*

166. En junio de 2019, el OIEA y la Organización ITER reforzaron su cooperación de larga data mediante la firma de las Disposiciones Prácticas. En virtud de las nuevas disposiciones, la Organización ITER dará a conocer su experiencia relacionada con la seguridad de la fusión nuclear y la protección radiológica al OIEA y sus 171 Estados Miembros. Las dos organizaciones realizarán también actividades de educación sobre la física de plasmas y la ingeniería de la fusión, coordinarán actividades de difusión pública y cooperarán en la gestión de los conocimientos y el desarrollo de los recursos humanos.

167. Otro hito importante en el desarrollo de la fusión como fuente futura de energía es la construcción del JT-60SA (figura B-8), un tokamak superconductor, que está en curso en Naka (Japón), en el marco de una colaboración internacional de Europa y el Japón.



*Fig. B-8. Representación esquemática del JT-60SA (izquierda) y fotografía de la estructura toroidal ya casi terminada. (Fuente: P. Barabaschi y otros, presentado en la Conferencia del OIEA sobre Energía de Fusión de 2018)*

168. Con su puesta en servicio programada para 2020, el JT-60SA comenzará a funcionar cinco años antes que el ITER, por lo que sus experimentos respaldarán la puesta en servicio y la explotación del ITER. Algunos de los temas que se investigarán con el JT-60SA serán la física de partículas de alta energía, la ingeniería de la fusión, el desarrollo del régimen de explotación y, sobre todo, la producción de plasma y los métodos de control. Los experimentos del JT-60SA complementarán asimismo la investigación conjunta con el ITER, al abordar algunos de los aspectos físicos y tecnológicos más arduos que pueden tener que resolverse en las futuras centrales nucleares de fusión de demostración, como DEMO.

169. La estabilidad del plasma, la ciencia de los materiales y el impacto de las condiciones operativas en relación con DEMO fueron algunos de los temas tratados en el Sexto Taller del Programa DEMO del OIEA, celebrado en Moscú (Federación de Rusia) en octubre de 2019, en el que participaron cerca de 60 expertos procedentes de 14 países, la organización Fusion for Energy de la Unión Europea y la Organización ITER. En estos talleres,<sup>2</sup> que tienen lugar cada dos años, se examinan los principales desafíos científicos y técnicos de la central DEMO y se analizan los programas, las tareas y los distintos cursos de acción posibles. Aunque cada participante puede tener sus propias prioridades de investigación, el objetivo de estos talleres es coordinar los esfuerzos mutuamente beneficiosos y facilitar la colaboración internacional.

170. En 2019, el Departamento de Energía de los Estados Unidos puso en marcha un programa nacional de fusión que se centra en los adelantos tecnológicos importantes e incluye varias iniciativas de financiación y promoción de alianzas público-privadas. El objetivo es contar con un programa piloto

---

<sup>2</sup> Véase más información en [https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/DEMO\\_landing.aspx](https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/DEMO_landing.aspx).

que aproveche las oportunidades en los ámbitos fundamentales de la labor de I+D de la fusión y acelerar el avance en el desarrollo de la energía de fusión.

171. Entretanto, en los últimos cinco años se han establecido un número considerable de empresas privadas, así como de alianzas público-privadas, principalmente en el Canadá, los Estados Unidos de América y el Reino Unido, pero también en otros países europeos y en China. A este respecto, se ha creado en los Estados Unidos de América la Asociación de la Industria de la Fusión, como red internacional de empresas que trabajan para electrificar el mundo con energía de fusión, al objeto de promover la fusión como nueva fuente de energía.

172. La aparición de estas nuevas entidades, financiadas parcialmente con capitales privados, modificará probablemente el escenario tradicional del desarrollo de la fusión, en que el progreso dependía de proyectos financiados en gran medida por los Gobiernos. Por consiguiente, se necesitarán directrices y normas internacionales que sirvan de ayuda en el diseño y faciliten los procesos de concesión de licencias y la elaboración de procedimientos de seguridad tecnológica y física, planes de gestión de desechos y estudios de viabilidad general de los futuros reactores de fusión, con análisis costo-beneficio y escenarios de evaluación del impacto socioeconómico.

## **C. Aceleradores y reactores de investigación**

### **C.1. Aceleradores e instrumentación conexas**

173. En esta sección se presentan los principales adelantos en la tecnología de los aceleradores, sus aplicaciones y la instrumentación conexas. Las aplicaciones más comunes de los aceleradores comprenden la producción de radioisótopos para el diagnóstico y tratamiento médicos del cáncer; la generación de fuentes intensas de rayos X para la esterilización de equipo médico y de productos alimentarios; la producción de haces de partículas cargadas para los análisis de la ciencia de los materiales y la irradiación; la datación por radiocarbono; y la producción de neutrones basada en un acelerador, con aplicaciones que van desde la prospección de minerales y petróleo hasta las mediciones de datos nucleares o las fuentes intensas de neutrones por espalación.

#### **C.1.1. Una instalación de doble haz abre nuevas oportunidades para el estudio de los materiales**

174. Una instalación de doble haz de iones (figura C-1) que permite combinar los haces iónicos de dos aceleradores diferentes de modo que actúen simultáneamente, inaugurada en Zagreb, ha reforzado el estudio de los materiales en Croacia y ampliado la proyección mundial de las instalaciones con esas capacidades punteras.

175. Creadas con apoyo del OIEA, la Fuente de Iones de Helio y la Instalación de Doble Haz DiFU del Instituto Ruđer Bošković ayudarán a los científicos a poner a prueba y desarrollar nuevos materiales estructurales para diversas tecnologías de producción de energía. Las reacciones de fisión y fusión no solo generan electrones de alta energía sino también gases (hidrógeno y helio) que, tras un tiempo de exposición, pueden dañar las estructuras y los componentes del reactor. La tecnología de los haces de iones puede simular estas condiciones extremas y ayudar a desarrollar nuevos materiales suficientemente robustos para resistir a esas condiciones.





Fig. C-1. Fuente de Iones de Helio e Instalación de Doble Haz DiFU del Instituto Ruđer Bošković de Croacia. (Fuente: OIEA)

176. En esta instalación, dos haces dirigidos hacia una muestra de acero —el material utilizado normalmente para los reactores nucleares, debido a su robustez— permiten simular la interacción de los productos de las reacciones de fisión o fusión con este material y entender sus modificaciones. Además de dañar posiblemente la estructura cristalina del material, esta interacción nuclear crea productos gaseosos de transmutación como el helio y el hidrógeno, que pueden conducir a la formación de burbujas dentro del acero, con la consiguiente expansión del material. Sabiendo cómo y dónde se producen estas reacciones, los científicos pueden adaptar el material para contrarrestar los efectos no deseados.

### **C.1.2. MACHINA — Acelerador Móvil para el Análisis No Destructivo del Patrimonio Cultural *In Situ***

177. MACHINA es un acelerador de partículas compacto de la próxima generación desarrollado mediante una colaboración internacional del Instituto Nacional de Física Nuclear (INFN) de Italia y el Centro Europeo para la Investigación Nuclear (CERN) en Suiza, que podría representar un gran avance en el análisis elemental *in situ* de los objetos del patrimonio cultural. MACHINA responde a la necesidad de los curadores, los especialistas en historia del arte y los restauradores de examinar las obras de arte *in situ* con análisis de haces de iones no invasivos, lo que es fundamental en el caso de objetos artísticos inamovibles y de valor inestimable como los murales frágiles y los cuadros de grandes dimensiones o que puedan sufrir daños durante el transporte.

178. Como se ilustra en la figura C-2, MACHINA es un sistema compacto y transportable que utiliza la tecnología del Cuadrupolo de Radiofrecuencia de Alta Frecuencia (HF-RFQ) desarrollada por el CERN. Pesa poco (aproximadamente 300 kg), es fácil de transportar y puede desmontarse o volverse a armar en solo dos horas. Es robusto y sumamente compacto (2,5 m x 0,6 m en la base, con una altura ajustable de alrededor de 1 m) y tiene un consumo de electricidad ultrabajo (entre 7 kW y 8 kW en total). El primer prototipo<sup>3</sup> se utilizará en el Opificio delle Pietre Dure de Florencia (Italia), y se pondrá a disposición de otros laboratorios y museos europeos.

<sup>3</sup> Véase más información en <http://home.infn.it/en/media-outreach/2015-03-26-11-50-59/2693-piccolo-preciso-e-potente-arriva-machina-l-acceleratore-per-i-beni-culturali-2>.



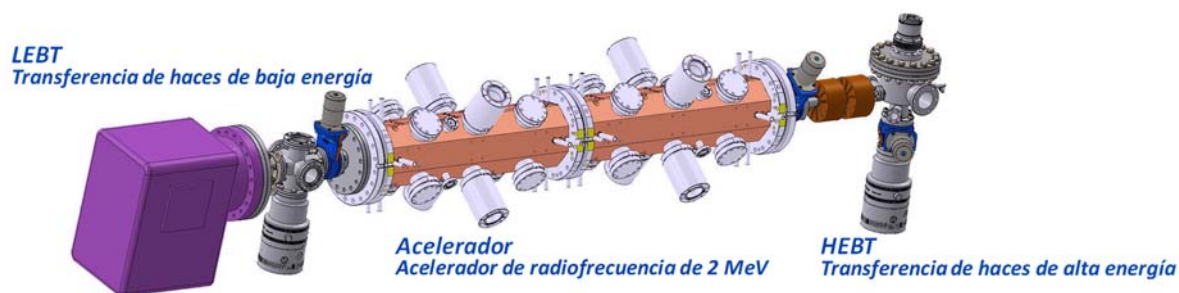


Fig. C-2. Ilustración esquemática de los principales componentes de MACHINA. La salida del haz de iones por el extremo de alta energía del acelerador permite analizar el artefacto. Las primerísimas aplicaciones se basan en la técnica PIXE, que utiliza los rayos X emitidos por las interacciones de las partículas con la materia. Detectando estos rayos X y evaluando los datos es posible determinar la composición de la muestra. (Fotografía: Proyecto MACHINA)

### C.1.3. Obtención de imágenes de células enteras con haces de iones focalizados de energías del orden del megaelectronvoltio

179. La posibilidad de visualizar las estructuras internas de una célula entera con resoluciones espaciales de menos de 100 nanómetros es importante para una amplia gama de aplicaciones de la biología, la administración de fármacos, la radiobiología y la radioterapia con haces de partículas (radiosensibilizadores de imagenología). Los haces de iones muy focalizados generados por aceleradores con energías del orden del megaelectronvoltio (MeV) ofrecen posibilidades sin paralelo para estas aplicaciones. Detectando simultáneamente la energía de los iones transmitidos (por microscopía iónica de transmisión de barrido (STIM)) y la luz visible que generan, los investigadores pueden registrar las imágenes para explorar tanto la estructura como la localización de las partículas. Esta forma de microscopía correlativa cuantitativa puede ser una herramienta poderosa para el estudio de la estructura y función de las células. Como se puede ver en la figura C-3, las nanopartículas tienen dificultades para penetrar en el núcleo de la célula, lo que permite evitar el daño directo al ADN en la irradiación posterior de la célula en experimentos de radiobiología.

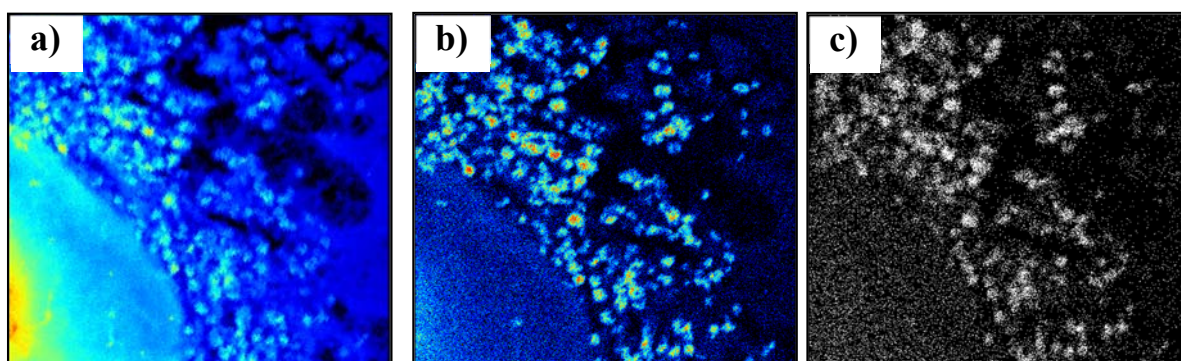


Fig. C-3. Imagen (tamaño de escaneo:  $13 \mu\text{m}$ ) de la absorción de nanopartículas de conversión ascendente de elementos de tierras raras en una célula HeLa. La acumulación de nanobastoncillos de 100 nm en el borde del núcleo de la célula se estudia utilizando tres modalidades de imagenología con haces de iones: a) la STIM axial, que indica la densidad; b) la STIM fuera de eje, que pone en evidencia la dispersión de las nanopartículas; y c) la fluorescencia inducida por partículas  $\alpha$ . Un haz de partículas  $\alpha$  de 1,6 MeV permitió obtener las imágenes de esta célula con una resolución espacial de menos de 50 nm. (Imágenes: cortesía de Andrew Bettioli, Centro para las Aplicaciones de Haces de Iones, Departamento de Física, Universidad Nacional de Singapur.)

180. De hecho, las nanopartículas pueden utilizarse para estudiar regiones específicas de la célula, como las mitocondrias. En un experimento de radiosensibilización (en el caso de la radioterapia con

haces de partículas), puede desearse visualizar el efecto del daño radiológico causado por esas nanopartículas en el ADN mitocondrial. Las mitocondrias celulares tienen un tamaño de aproximadamente una micra, por lo que el uso de imágenes de alta resolución es crucial. Las mitocondrias pueden ser bombardeadas simultáneamente con sondas fluorescentes y con nanopartículas; la imagenología correlativa permite localizar tanto las mitocondrias como las nanopartículas, lo que a su vez posibilita un estudio sistemático de la localización de las nanopartículas y el efecto de las diferentes dosis de irradiación.

#### C.1.4. Las tecnologías de los aceleradores con láser prometen el advenimiento de diversas aplicaciones

181. Los avances recientes de la tecnología láser de alta potencia<sup>4</sup> han permitido desarrollar láseres con pulsos de luz extremadamente breves, del orden del femtosegundo, e intensidades muy altas, superiores a  $10^{21}$  vatios/cm<sup>2</sup>. Dirigiendo estos pulsos hacia una lámina sólida es posible generar fuentes intensas de fotones, iones y neutrones (figura C-4), que luego pueden emplearse en un amplio espectro de aplicaciones, como los métodos de ensayo no destructivos en el sector aeroespacial; la obtención de imágenes radiográficas de objetos grandes; el diagnóstico *in operando* de las baterías de ion litio; el tratamiento por radiación para fabricar materiales sofisticados y funcionales; y la exploración activa de materiales nucleares sensibles, incluida la caracterización de desechos nucleares.

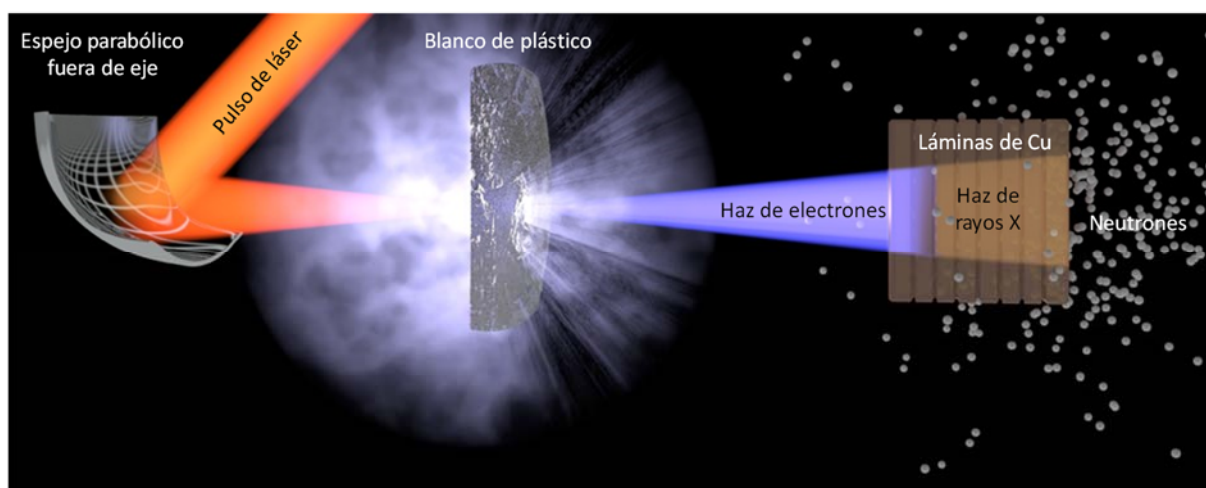


Fig. C-4. Representación esquemática de la producción de electrones y neutrones secundarios con tecnologías de aceleración con láser. (Fotografía: Ishay Pomerantz, Universidad de Tel Aviv, Israel)

182. Hasta ahora, las técnicas que emplean rayos láser han demostrado ser capaces de crear campos eléctricos de aceleración superiores en por lo menos cuatro órdenes de magnitud a los de los aceleradores convencionales, y el objetivo de la comunidad científica internacional de producir aceleradores de partículas miniaturizados y portátiles parece ser alcanzable dentro del próximo decenio.

## C.2. Reactores de investigación

183. Las aplicaciones más frecuentes de los reactores de investigación se enumeran en la figura C-5. Su potencia puede variar de cero (p. ej., en conjuntos críticos o subcríticos) a aproximadamente 200 MW(t), que es todavía un valor pequeño en comparación con los 3000 MW(t) de una central nuclear típica. Los reactores de investigación presentan una variedad de diseños mucho mayor que la de los reactores de potencia, y tienen también distintos modos de funcionamiento, que pueden ser constantes o pulsantes.

<sup>4</sup> Fuente: Acto paralelo a la sexagésima tercera reunión de la Conferencia General del Organismo, titulado “Fuentes de neutrones producidas por láser para aplicaciones nucleares” y organizado por Alemania.



Fig. C-5. Aplicaciones comunes de los reactores de investigación en el mundo<sup>a</sup>

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

<sup>b</sup> De un total de 237 reactores de investigación examinados (224 en funcionamiento y 13 en régimen de parada temporal al 31 de diciembre de 2019).

<sup>c</sup> Otras aplicaciones son la calibración y el ensayo de instrumentos, experimentos de blindaje, la creación de fuentes de positrones y estudios de incineración de desechos nucleares.

Según la Base de Datos de Reactores de Investigación del Organismo, se han construido 818 reactores de investigación en 67 países, y 250 de ellos, en 54 países, están en explotación. 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 Alemania (7). En el mundo hay 63 reactores de investigación que funcionan a niveles de potencia de 5 MW o más y que, por lo tanto, ofrecen flujos neutrónicos altos para productos y servicios industriales y médicos. En total, hay 9 reactores de investigación en construcción en 6 países, y 11 países tienen planes de construir otros 14 reactores de este tipo.

184. 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 prestar los servicios analíticos y de irradiación de los sectores privado y público y los servicios de estudio del medio ambiente y del patrimonio cultural. Estos reactores hacen una contribución estratégica a la formación y la capacitación. Ante la retirada del servicio de muchos de ellos debido al envejecimiento, las instalaciones restantes y las nuevas que se construyan deberán utilizarse con eficiencia, gestionarse bien y explotarse de manera sostenible. El Organismo alienta a los explotadores de reactores de investigación a que elaboren planes estratégicos para el uso de sus instalaciones, o actualicen los ya existentes. En los últimos tres años, 23 instalaciones presentaron sus planes estratégicos al Organismo para obtener asesoramiento. En 2019, el Organismo desarrolló el Examen Integrado de la Utilización de Reactores de Investigación (IRRUR) para ayudar a los Estados Miembros a optimizar el uso de sus reactores de investigación, y realizó la primera misión piloto IRRUR en Italia.

185. Más de la mitad de los reactores de investigación en funcionamiento en el mundo han superado los 40 años de servicio. 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 estas instalaciones y de la escasa planificación de la sucesión, la aplicación de buenos sistemas de gestión y de programas de explotación, mantenimiento y gestión de la vida útil adecuados será fundamental para que estos reactores puedan cumplir sus misiones de manera rentable. A este respecto, han sido muy útiles las misiones de Evaluación de la Explotación y el Mantenimiento de Reactores de Investigación (OMARR) a cargo de homólogos realizadas en Bangladesh, Indonesia, Portugal, la República Democrática del Congo, Tailandia y Uzbekistán. En varios de los 58 reactores de investigación que están en régimen de parada definitiva en 23 Estados Miembros está previsto comenzar la preparación para la clausura en el futuro próximo.

186. Se están construyendo reactores de investigación nuevos en la Arabia Saudita, la Argentina, la Federación de Rusia, Francia, 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. Los Exámenes Integrados de la Infraestructura Nuclear para Reactores de Investigación nuevos (INIR-RR) ofrecen apoyo y orientación a los Estados Miembros que están iniciando un nuevo proyecto de reactor de investigación. Se han realizado misiones INIR-RR en Nigeria y Viet Nam, y otras dos están todavía en curso en Tailandia y Zambia.

187. Los Estados Miembros que desean desarrollar o mantener su capacidad nuclear nacional para los programas de ciencia y tecnología, incluida la energía nucleoelectrónica, siguieron manifestando interés en tener acceso a reactores de investigación. Por lo tanto, en 2019 el Organismo consolidó y amplió sus cuatro instrumentos y herramientas, que comprenden el Reactor-Laboratorio por Internet (IRL), una herramienta de capacitación a distancia utilizada principalmente para la enseñanza académica (en 2019 continuó la transmisión de sesiones para las regiones de América Latina y el Caribe, se puso en servicio un reactor anfitrión del IRL en Marruecos y se hicieron progresos importantes en el establecimiento de reactores del IRL en la región de Asia y el Pacífico y en Europa); los Cursos Regionales con Reactores de Investigación, para la capacitación básica; la Iniciativa sobre Reactores de Investigación de Europa Oriental (EERRI) para la capacitación práctica avanzada, destinada principalmente a profesionales jóvenes (en 2019 se organizó un Curso con Reactor de Investigación en el Japón, y el 15º Curso de Capacitación de la EERRI se dictó en Austria, Eslovenia y la República Checa); y el plan de los Centros



de Excelencia Internacionales Basados en Reactores de Investigación designados por el OIEA (ICERR) para la capacitación específica avanzada de profesionales tanto jóvenes como ya experimentados.

188. Hasta la fecha, 99 reactores de investigación y 4 instalaciones de producción de isótopos de uso médico han sido convertidos al uso de UPE, en lugar de uranio muy enriquecido (UME), o están en régimen de parada confirmada. En 2019 comenzaron los preparativos para la devolución de combustible de UME del reactor de investigación IVG.1M de Kazajstán a la Federación de Rusia tras la conversión del reactor para que utilizara combustible de UPE. También se iniciaron los preparativos para la degradación del combustible de UME del reactor de investigación IGR de Kazajstán hasta un nivel de enriquecimiento inferior al 20 %.

189. Al final de 2019, el programa de devolución del combustible de UME de origen estadounidense había concluido la retirada de aproximadamente 1600 kg de combustible de UME nuevo e irradiado de reactores de investigación, el Programa de Retirada del Huelgo completó la retirada o confirmó la disposición de aproximadamente 2875 kg de combustible de UME y el programa de devolución del combustible de origen ruso había finalizado la retirada de unos 2300 kg.

190. Prosiguieron los esfuerzos internacionales para convertir los productores de isótopos de uso médico al empleo de blancos de UPE, en lugar de UME. Las breves interrupciones del servicio registradas en 2019 en algunos procesadores e instalaciones mundiales que producen molibdeno 99 por irradiación de blancos dieron lugar a cierta escasez regional de suministros. Los esfuerzos de los órganos de gestión de la cadena de suministro y de los principales productores internacionales, así como las eficaces medidas de mitigación de los profesionales sanitarios, compensaron en parte las fluctuaciones de la producción. Aproximadamente el 75 % del molibdeno 99 vendido en el mundo se produce ahora sin el uso de combustible o de blancos de UME. En los Estados Unidos de América comenzó a operar comercialmente en 2018 un nuevo productor de molibdeno 99 a partir de blancos no basados en el uranio y en 2019 empezó a ampliar sus instalaciones de producción.

## **D. Radioisótopos y tecnologías de la radiación**

### **D.1. Soluciones al problema de los plásticos: Aplicación de técnicas nucleares**

191. El rápido crecimiento de la producción de plásticos y los desechos plásticos que se generan posteriormente causan enormes problemas ambientales. El amplio uso de polímeros sintéticos de fácil acceso y relativamente baratos, como los termoplásticos (denominados comúnmente ‘plásticos’) y el caucho, han generado inmensas cantidades de desechos poliméricos, con los consiguientes problemas de gestión de desechos en los espacios al aire libre.

192. Los polímeros se utilizan ampliamente debido a su bajo costo, su fácil fabricación, su escaso peso y sus buenas propiedades mecánicas. El crecimiento de la población mundial, combinado con las ventajas de estos materiales, ha dado lugar a un drástico aumento de la cantidad de plásticos presentes en el medio ambiente en todo el mundo. En los últimos 20 años, la producción de polímeros sintéticos ha aumentado un 240 %. Si esta tendencia continúa, en 2050 habrá alrededor de 12 000 millones de toneladas de desechos poliméricos en los vertederos o en el medio ambiente.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., Production, use, and fate of all plastics ever made, *Science Advances* 3(7):e1700782 (2017).



193. Muchos desechos poliméricos representan composiciones de distintos materiales que son difíciles de separar, o incluso inseparables, lo que dificulta su reutilización. A diferencia de los polímeros naturales, los sintéticos son de degradación lenta y se fragmentan gradualmente formando partículas pequeñas, conocidas como microplásticos, que contaminan el ecosistema. Los datos estadísticos más recientes sobre la cantidad de desechos plásticos generada desde el comienzo de su fabricación indican que, hasta el año 2015, se habían producido aproximadamente 6300 millones de toneladas de esos desechos (5800 millones de toneladas en generación primaria y 500 millones de toneladas en generación secundaria), de las cuales alrededor del 9 % habían sido recicladas, un 12 % incineradas y un 79 % se desecharon, acumuladas en vertederos o en el medio ambiente natural.

194. Actualmente, la mitigación de la carga representada por estos desechos se basa en múltiples tecnologías cuya aplicación depende de la existencia de factores locales, regionales y nacionales que impulsen la gestión y mitigación de los desechos. La tasa media de reciclado en el mundo es todavía baja, y varía según los países (cuadro D-1).

*Cuadro D-1. Reciclado mundial de plásticos*

| Región/país                                 | Reciclado (%) | Recuperación de energía (%) | Gestionados: depositados en vertederos (%) | Mal gestionados (desconocido) (%) |
|---|---------------|-----------------------------|--|-----------------------------------|
| África                                      | 12            | 1                           | 26   | 62                                |
| Asia y Oceanía                              | 24            | 25                          | 15   | 37                                |
| Europa (incl. Turquía)                      | 27            | 31                          | 33   | 9                                 |
| Norteamérica                                | 11            | 13                          | 72   | 4                                 |
| Sudamérica y América Central (incl. México) | 15            | 11                          | 30   | 44                                |

*Fuente de los datos: Global Plastics Flow 2018 (Conversio Market & Strategy, febrero de 2018, [https://www.conversio-gmbh.com/res/Global\\_Plastics\\_Flow\\_Feb10\\_2020.pdf](https://www.conversio-gmbh.com/res/Global_Plastics_Flow_Feb10_2020.pdf))*

195. En la actualidad, el reciclado de los desechos poliméricos se realiza en grandes instalaciones que rara vez utilizan el tratamiento por irradiación. Las tecnologías de la radiación (figura D-1) cumplen los principios fundamentales de la química ‘verde’ y ofrecen múltiples posibilidades de procesar los materiales mediante la formación o ruptura controladas de enlaces químicos.



Fig. D-1. Ciclo de vida de los productos plásticos y generación y tratamiento de los desechos plásticos (Fuente: OIEA)

196. Los Estados Miembros están solicitando con creciente insistencia la adaptación de las tecnologías de la radiación para hacer frente al reto mundial del reciclado de los desechos poliméricos. Las tecnologías nucleares pueden contribuir a establecer una economía circular del plástico y complementar enfoques convencionales para la reducción de los volúmenes de desechos plásticos. Estas tecnologías de la radiación son ampliables, es decir que pueden emplearse para irradiar incluso grandes cantidades de desechos poliméricos. Este proceso de irradiación puede utilizarse con dos fines: modificar la estructura y las propiedades del plástico o descomponerlo para crear materias primas. En ambos casos, el nuevo material —modificado o creado para una función determinada— o la materia prima sirven para producir bienes de consumo comercialmente viables fabricados a partir de plástico reciclado, creando así beneficios rentables al tiempo que se reduce el volumen de desechos.

197. Utilizar las tecnologías de la radiación presenta una ventaja adicional singular en tanto en cuanto la radiación es una tecnología “verde”, ya que prescinde de los disolventes que se emplean en el reciclado de los polímeros químicos y que, de otro modo, contribuirían a la contaminación medioambiental y a las emisiones de carbono. El reciclado para obtener nuevos productos por medio de las tecnologías de la radiación resulta especialmente atractivo cuando el reciclado primario de los desechos plásticos ya no es posible, ya que, con la tecnología convencional, muchos termoplásticos solo pueden reciclarse una o dos veces. Así, el reciclado de desechos plásticos mediante la tecnología de la radiación es una contribución innovadora que puede complementar enfoques convencionales de reciclado de desechos plásticos.

198. Las técnicas nucleares también permiten monitorizar y evaluar de manera fiable y exacta los efectos de los microplásticos marinos en el medio ambiente por medio de trazadores isotópicos. Estos trazadores poseen un grado de precisión sin precedentes y la sensibilidad necesaria para determinar de manera exacta la presencia de desechos plásticos en el medio ambiente, monitorizar sus movimientos y evaluar dichos desechos. Esta información puede utilizarse para orientar decisiones en materia de políticas.

199. Sin embargo, los métodos afianzados de la tecnología de la radiación para la síntesis de nuevos materiales y la desinfección de líquidos y gases tóxicos no pueden aplicarse directamente a los desechos poliméricos. Por lo tanto, se necesitan nuevos trabajos de investigación y desarrollo. El reciclado y la reutilización de los polímeros son deseables en todos los casos posibles, y es crucial que el proceso de reciclado sea eficiente, económico y sostenible.

Una nueva aplicación que transforma los desechos plásticos en un material apto para aplicaciones sostenibles y escalables es el uso de esos desechos en la mejora del comportamiento mecánico y la durabilidad de la pasta de cemento y el hormigón. La producción mundial de cemento es la tercera fuente más importante de emisiones de carbono, lo que significa que el uso de plásticos reciclados en el hormigón podría tener una ventaja adicional desde el punto de vista ambiental.<sup>6</sup>

200. Las futuras instalaciones de reciclado de plásticos por irradiación deberían utilizar equipos integrados de haces de electrones con una buena relación costo-eficacia y que puedan adquirirse de empresas pequeñas y medianas. La modificación de los polímeros por irradiación debería efectuarse de preferencia en una atmósfera de aire, sin una presión excesiva y aplicando un tratamiento con haces de electrones y parámetros optimizados. La reglamentación normativa sobre la trazabilidad de los materiales debería comenzar a estudiarse desde el inicio mismo del desarrollo de cualquier sistema de materiales novedosos obtenidos a partir de desechos poliméricos reciclados.

## **D.2. Un avance en las tecnologías de los aceleradores introduce la terapia por captura neutrónica en boro en los hospitales**

### **D.2.1. Progresos en la generación de fuentes de neutrones con aceleradores compactos**

#### **¿Qué es la terapia por captura neutrónica en boro?**

La BNCT es una terapia extraordinaria que se basa en la idea de administrar selectivamente compuestos de boro a los tejidos tumorales, para luego irradiarlos con neutrones. El boro captura esos neutrones, después de lo cual se produce la emisión de partículas  $\alpha$  y el retroceso de los núcleos de litio, dos fenómenos con una transferencia de energía muy alta dentro de una distancia de frenado sumamente corta, comparable al tamaño de una célula. Las mayores ventajas de la BNCT en el tratamiento clínico son la elevada eficacia biológica intracelular y la localización precisa del daño en la célula tumoral. Con los recientes avances en la tecnología de los aceleradores, la terapia por captura neutrónica en boro (BNCT) está más cerca de ser una opción posible para el tratamiento clínico del cáncer.

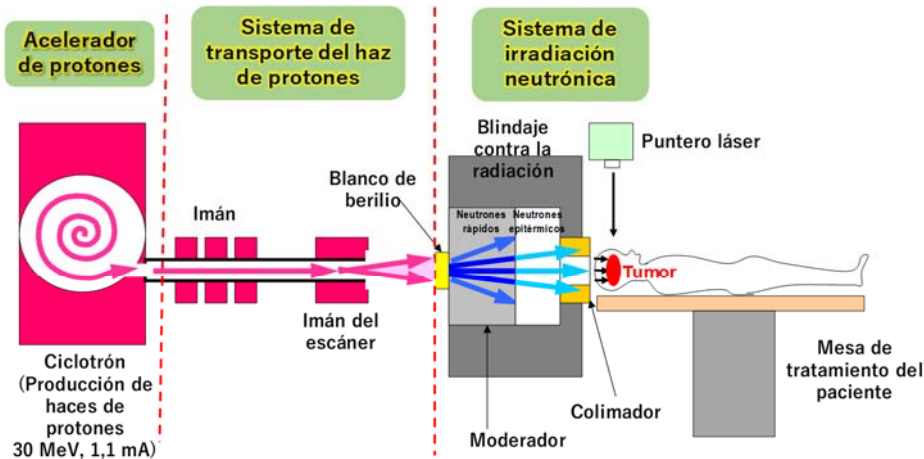
201. La terapia por captura neutrónica en boro se ha aplicado hasta ahora principalmente en centros de reactores de investigación capaces de ofrecer haces de neutrones de la intensidad y calidad requeridas para la irradiación de los pacientes. En los dos últimos decenios, más de 1000 pacientes han recibido esta terapia en instalaciones de todo el mundo, y ha habido progresos importantes en la optimización de los compuestos de boro, incluidos su uso y el control de su acumulación en las células tumorales. Sin embargo, muchos de esos reactores están ahora en régimen de parada o han interrumpido sus actividades relacionadas con la BNCT, especialmente debido a la dificultad de combinar el entorno de un reactor con los requisitos clínicos. Actualmente, solo cuatro reactores siguen ofreciendo esta terapia como posible tratamiento del cáncer. Por otra parte, ha habido un aumento importante de las instalaciones y los proyectos de BNCT que se han propuesto crear y utilizar fuentes de neutrones compactas basadas en aceleradores de partículas, todos ellos en el ámbito de hospitales universitarios o centros de

---

<sup>6</sup> Schaefer, C.E. y otros, Irradiated recycled plastic as a concrete additive for improved chemo-mechanical properties and lower carbon footprint, *Waste Management* 71 (2018) 426-439.

oncología. Algunas de estas instalaciones ya han iniciado los ensayos clínicos, y hay nuevas instalaciones en estudio en todo el mundo.

202. Los diferentes componentes tecnológicos de la BNCT basada en aceleradores se ilustran en la figura D-2, que muestra la aceleración de protones hasta energías que van de unos pocos megaelectronvoltios (MeV) hasta 30 MeV, con corrientes medias de los haces de entre algunos miliamperios (mA) y decenas de mA, y su colisión con blancos de elementos ligeros, como el litio (Li) o el berilio (Be). Ello produce neutrones rápidos que, a su vez, son colimados, moderados y dirigidos hacia la zona de irradiación del paciente, como se ilustra en el esquema. En la figura D-3 se presentan también algunos elementos fundamentales de la instalación.



(Cortesía de Sumitomo Heavy Industry Ltd.)

Fig. D-2. Representación esquemática de la BNCT basada en un acelerador.  
(Fuente: Industrias Pesadas Sumitomo, Japón)



Fig. D-3. Componentes del acelerador y del blanco (izquierda) y sitio de irradiación del paciente (derecha) en un centro de BNCT basada en un acelerador.  
(Fotografías: Centro Médico de BNCT de Kansai, Japón)

203. El Organismo está ahora revisando y actualizando su documento técnico (TECDOC) titulado *Current Status of Neutron Capture Therapy* (TECDOC del OIEA N° 1223), publicado en 2001, para incorporar todos los resultados obtenidos en las instalaciones de BNCT basada en un reactor en los dos últimos decenios e incluir las nuevas tendencias y los progresos realizados en los centros de BNCT con aceleradores creados dentro de los hospitales. En el cuadro D-2 se resumen las diferentes instalaciones de BNCT basadas en aceleradores, con sus parámetros técnicos y su estado actual.

Cuadro D-2. Lista de las instalaciones de BNCT basadas en aceleradores, con su estado actual.  
(Fuente: OIEA)

| País                | Instalación   | Acelerador     | Proyectil (energía incidente) + blanco | Corriente máxima de diseño (actual) (mA) | Estado actual      |
|---------------------|---|----------------|--|--|--------------------|
| Japón               | Universidad de Kioto  | Ciclotrón      | p(30,0MeV)+Be                          | 1 (1)                                    | Ensayos clínicos   |
|                     | Centro de investigación de la BNCT de Tohoku Meridional       |                |  |  |                    |
|                     | Centro Médico de BNCT de Kansai                               |                |  |  |                    |
|                     | Universidad de Tsukuba  | Lineal         | p(8MeV)+Be                             | 5 (1,8)                                  | Puesta en servicio |
|                     | Hospital Oncológico Nacional                                  | Lineal         | p(2,5MeV)+Li                           | 20 (12)                                  | Ensayos clínicos*  |
|                     | Centro de BNCT del Hospital de Edogawa                        |                |  |  | Construcción       |
|                     | Universidad de Nagoya   | Electrostático | p(2,8MeV)+Li                           | 15 (1)                                   | Puesta en servicio |
| Finlandia           | Hospital Universitario de Helsinki                            | Electrostático | p(2,6MeV)+Li                           | 30 (20)                                  | Ensayos clínicos*  |
| Argentina           | Centro Atómico Bariloche                                      | Electrostático | d(1,4MeV)+Be                           | 30 (1)                                   | Construcción       |
| Federación de Rusia | Instituto Budker de Física Nuclear                            | Electrostático | p(2,0MeV)+Li                           | 10 (2)                                   | En desarrollo      |
| Israel              | Instalación de Investigación Aplicada del Acelerador de Soreq | Lineal         | p(4,0MeV)+Li                           | 20 (2)                                   | En desarrollo      |
| China               | Hospital Humanitario de Xiamen                                | Electrostático | p(2,5MeV)+Li                           | 10 (-)                                   | En desarrollo      |
| Italia              | Instituto Nacional de Física Nuclear                          | Lineal         | p(4,0MeV)+Be                           | 30 (-)                                   | En desarrollo      |
| República de Corea  | A-BNCT  | Lineal         | p(10,0MeV)+Be                          | 8 (-)                                    | En desarrollo      |

\* La instalación está en funcionamiento y los ensayos clínicos ya están planificados.

## D.2.2. Radiofármacos teranósticos y BNCT

204. Los radiofármacos teranósticos pueden utilizarse en una combinación del diagnóstico y la terapia que representa una transición de la medicina convencional al enfoque médico personalizado y de precisión. La eficacia de la BNCT depende en gran medida de la concentración de boro y su distribución en las células tumorales que es preciso destruir. En la mayoría de los casos se utiliza boronofenilalanina (BPA) como vector de boro  $^{10}\text{B}$  en esta terapia. El desarrollo de la BPA marcada con flúor 18 ( $^{18}\text{F}$ -BPA) ha hecho posible vigilar la farmacocinética de la BPA con una tomografía por emisión de positrones (PET). La PET con  $^{18}\text{F}$ -BPA permite no solo obtener información sobre el tumor, sino



también evaluar la acumulación de boro en los tejidos tumorales y normales y observar la respuesta del tumor a la BNCT. Actualmente, la BNCT unida a una PET con  $^{18}\text{F}$ -BPA se utiliza contra diversos tipos de cáncer, como los gliomas, los cánceres de cabeza y cuello, el melanoma, el mesotelioma, el cáncer hepático y los tumores del pulmón (figura D-5).

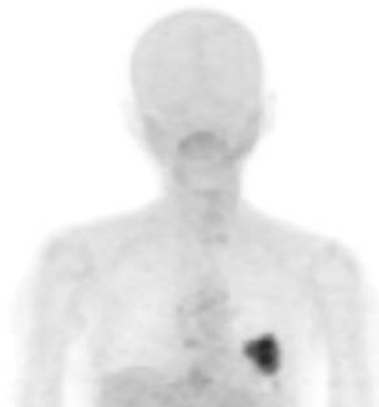
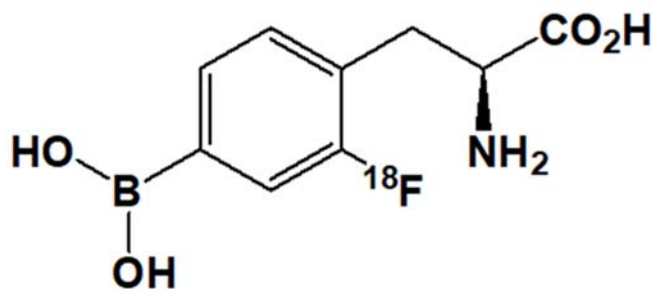


Fig. D-5. Izquierda: estructura molecular de la BPA marcada con  $^{18}\text{F}$  ( $^{18}\text{F}$ -BPA). Derecha: imagen de una PET que muestra la acumulación del compuesto de boro en un melanoma maligno metastásico del pulmón. (Fuente: Universidad de Osaka, Japón.)

205. La eficiencia de la BNCT mejoraría aún más si pudiera aumentarse la concentración de boro en las células blanco. Dado que la BPA contiene solo un átomo de  $^{10}\text{B}$  por molécula, es necesario desarrollar vectores que contengan más átomos de  $^{10}\text{B}$  en su estructura. Se están realizando numerosos estudios de investigación de estas moléculas en todo el mundo, pero dada la larga duración del proceso de desarrollo de fármacos, se requerirá cierto tiempo para efectuar los ensayos de las nuevas moléculas antes de poderlas aplicar en la BNCT.

### D.3. El Medical Isotope Browser: Una herramienta para encontrar nuevas vías de producción de radioisótopos en la lucha contra el cáncer y otras enfermedades

206. El Organismo ha desarrollado una nueva herramienta basada en la Web que permite predecir directamente el rendimiento en la producción de isótopos de uso médico sobre la base de la información introducida por el usuario. El Medical Isotope Browser puede ser utilizado por los investigadores médicos y la industria radiofarmacéutica para descubrir vías de producción de radioisótopos aún no exploradas. Esta será una contribución importante a la lucha contra el cáncer y otras enfermedades. La producción de isótopos para usos terapéuticos o diagnósticos depende de procesos de reacción nuclear muy complejos, que solo pueden ser estudiados por los físicos nucleares a través de sus mediciones y teorías. El Medical Isotope Browser pone esta información fundamental al alcance de muchos usuarios no especialistas mediante una interfaz gráfica de usuario.

207. El Medical Isotope Browser fue presentado oficialmente durante el Simposio Internacional sobre Tendencias en relación con los Radiofármacos, celebrado por el Organismo en Viena en octubre-noviembre de 2019. La primera versión se limita a los isótopos producidos por aceleradores de partículas cargadas. Los usuarios pueden especificar las características del acelerador, como el proyectil (protón, deuterón, tritio, helio 3 o partícula  $\alpha$ ), la corriente en microamperios y la energía incidente y de salida, así como el blanco y el radioisótopo que se desea producir. La herramienta permite obtener casi instantáneamente el rendimiento isotópico requerido como función de los tiempos de irradiación y enfriamiento, junto con una descripción completa de todas las impurezas producidas. La próxima versión incluirá también la producción de isótopos de uso médico con reactores de investigación y haces de electrones (figura D-6).

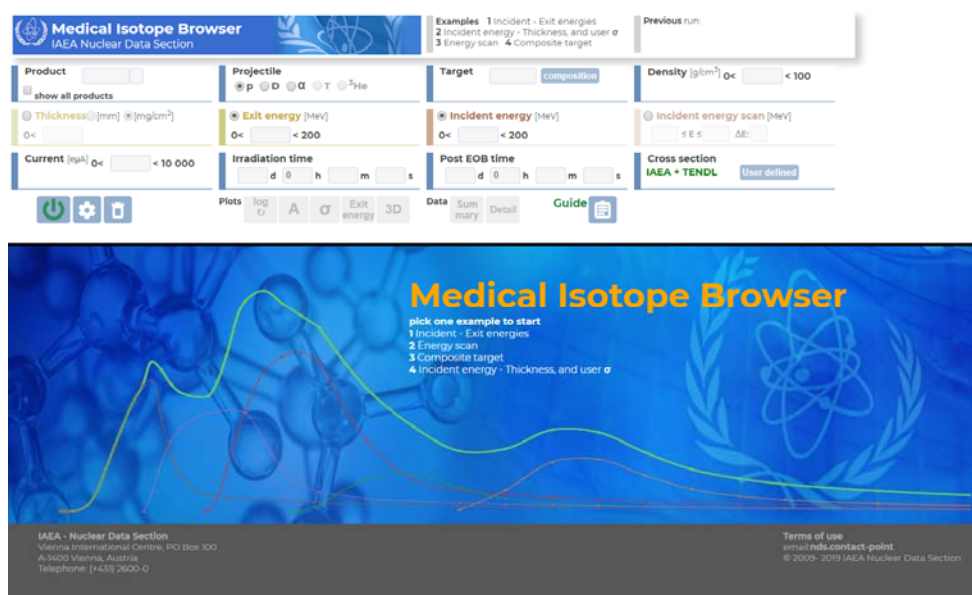


Fig. D-6. Página de presentación del Medical Isotope Browser, disponible en <http://nds.iaea.org/mib>.

## E. Salud humana

### E.1. Nuevo método de doble trazador isotópico para evaluar la calidad de las proteínas en el ser humano

#### E.1.1. Las proteínas y sus repercusiones en el crecimiento y desarrollo infantil

208. El suministro de proteínas en los primeros dos años de vida no solo determina el crecimiento, sino que también influye en el riesgo posterior de obesidad y enfermedades no transmisibles y puede repercutir en la velocidad de recuperación de una malnutrición aguda. Las proteínas se componen de aminoácidos esenciales y no esenciales. Los segundos puede ser sintetizados por el organismo, mientras que los aminoácidos esenciales deben ser aportados por la alimentación. En general, los niños con alto riesgo de retraso del crecimiento consumen alimentos que contienen cantidades insuficientes de la mayoría de los aminoácidos esenciales, como el triptófano, la metionina, la treonina, la fenilalanina y la lisina. Sin embargo, los datos disponibles sobre las necesidades de aminoácidos esenciales para el crecimiento en la primera infancia y su digestibilidad son insuficientes.

#### E.1.2. Calidad de las proteínas

##### ¿Lo sabía?

La digestibilidad de las proteínas varía según la fuente de la que proceden; las proteínas de origen animal suelen ser más digeribles que las de los alimentos de origen vegetal.

209. La calidad de una determinada proteína se define en función de la medida en que, cuando se consume, proporciona una cantidad de aminoácidos esenciales biodisponibles adecuada para el mantenimiento del cuerpo, el crecimiento, las necesidades fisiológicas, la actividad física y la capacidad de combatir infecciones. El tipo de aminoácidos esenciales que contiene la proteína, su digestibilidad y su posterior absorción son importantes. La combinación de estas características da una puntuación de la

calidad proteica de un alimento dado. Por ejemplo, la lisina y la treonina están presentes en cantidades subóptimas en la mayoría de los cereales, mientras que las legumbres tienen un contenido insuficiente de metionina.

### **E.1.3. Método del doble trazador isotópico para la evaluación de la calidad de las proteínas en el ser humano**

210. Los métodos disponibles actualmente para medir la digestibilidad de los aminoácidos en el intestino delgado son invasivos, ya que requieren el acceso a los efluentes que abandonan esa porción del intestino, lo que se realiza por colocación de una sonda intestinal en el ser humano. Sin embargo, también puede utilizarse un método relativamente no invasivo, basado en una técnica que utiliza dos trazadores isotópicos, el deuterio ( $^2\text{H}$ ) y el carbono 13 ( $^{13}\text{C}$ ), en que se administran simultáneamente una proteína de prueba con un marcado isotópico intrínseco y una proteína ‘estándar’ marcada con un isótopo diferente. La proteína ‘estándar’ puede ser una mezcla de aminoácidos libres (que no requiere ninguna digestión) o una proteína entera (por ejemplo, la espirulina marcada con un isótopo) con una digestibilidad predeterminada. La relación posprandial de los aminoácidos esenciales con diferentes marcados isotópicos en la sangre permite evaluar la verdadera digestibilidad de los aminoácidos esenciales de la proteína sometida a ensayo. Esta técnica fue desarrollada en respuesta a una solicitud formulada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en el marco de un proyecto coordinado de investigación apoyado por el OIEA, titulado “Biodisponibilidad de las proteínas de alimentos de origen vegetal”. Como parte de este proyecto, se evaluó, utilizando la Puntuación de Aminoácidos Esenciales Digeribles recomendada por la FAO, la calidad proteica de una gran variedad de legumbres cultivadas localmente en el Brasil, la India, Jamaica, Marruecos, México, el Pakistán y Tailandia, con el apoyo técnico de expertos de Francia y el Reino Unido. El método se compone de las dos fases que se describen a continuación.

### **E.1.4. Marcado intrínseco de las legumbres con óxido de deuterio durante el crecimiento en el campo**

211. Las legumbres con marcado intrínseco se producen aplicando un bolo de óxido de deuterio ( $\text{D}_2\text{O}$ ) en el riego ordinario de la leguminosa. La planta se deja crecer hasta la maduración, después de lo cual se cosechan las semillas secas (figura E-1).



*Fig. E-1: Marcado intrínseco de legumbres con  $\text{D}_2\text{O}$  durante el crecimiento.  
(Fotografía: Wantanee Kriengsinyos, Universidad Mahidol, Tailandia)*

### **E.1.5. Estudio en seres humanos con comidas de prueba a base de legumbres con marcado intrínseco**

212. El método del doble isótopo se aplica mediante un protocolo de alimentación de ocho horas (en los adultos) o de seis horas (en los niños). En los protocolos para adultos se toman cinco muestras de sangre (al comienzo del experimento y luego a las cinco, seis, siete y ocho horas de haberse consumido

la comida de prueba), mientras que en los protocolos para niños de muy corta edad solo se toman tres muestras, una al comienzo del experimento y entre la quinta y la sexta hora. Por ejemplo, la legumbre o el alimento sometido a ensayo puede haber sido marcado intrínsecamente con  $D_2O$ , y la adición de una pequeña cantidad de proteína ‘estándar’ marcada con  $^{13}C$  permite comparar los aminoácidos esenciales de la legumbre de prueba con los de la proteína estándar administrada simultáneamente. Como proteína estándar puede utilizarse una proteína muy enriquecida en  $^{13}C$  que se obtiene de un organismo unicelular y está disponible en el comercio (la espirulina- $^{13}C$ ). La aparición de aminoácidos marcados en la sangre que están relacionados con la comida de prueba permite calcular la digestibilidad de la proteína de la legumbre (figura E-2). Además, si se añade un aminoácido marcado (la fenilalanina- $^{13}C$ ) a la comida de prueba, se puede estimar la absorción del aminoácido a partir de la aparición en la sangre de dicho aminoácido marcado.



*Fig. E-2: Comida de prueba y su consumo por una participante en el estudio.  
(Fotografías: Wantanee Kriengsinyos, Universidad Mahidol, Tailandia)*

### E.1.6. Utilidad del método

213. El método se ha aplicado ya a un grupo de lactantes y niños menores de dos años en la India para estimar la verdadera digestibilidad de los aminoácidos esenciales de cuatro alimentos de consumo habitual. Los resultados indicaron que la digestibilidad de algunos aminoácidos esenciales clave, como la metionina y la treonina, era muy baja. El estudio reveló asimismo una relación positiva entre la puntuación de digestibilidad de los aminoácidos de los alimentos y la estatura de los niños. La nueva información acerca de la digestibilidad de los aminoácidos será de enorme ayuda para la FAO en la elaboración de sus recomendaciones sobre la calidad de las proteínas para las personas de todas las edades, de conformidad con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 2, que apunta a acabar con el hambre en todo el mundo. Con la crisis emergente del cambio climático y la escasez de agua, es probable que disminuyan tanto el contenido proteico como el rendimiento de los cereales, mientras que el contenido proteico de las legumbres podría resultar menos afectado. El método del doble trazador brinda la posibilidad de determinar el contenido de proteínas y la digestibilidad de variedades vegetales resistentes a la sequía y proyectar el suministro futuro de proteínas de alta calidad con técnicas exactas.

## E.2. La biodosimetría como herramienta de diagnóstico/predicción útil para las emergencias y la medicina radiológicas

La biodosimetría ayuda a determinar la dosis de radiación recibida por una persona o un paciente. Este método utiliza marcadores biológicos, como las anomalías cromosómicas, que pueden observarse con un microscopio.

214. La biodosimetría emplea muestras biológicas, por ejemplo sangre, tomadas generalmente de personas que han sido expuestas a radiación, para determinar la exposición que sufrieron por inhalación, ingestión u otra vía. También se utiliza la resonancia paramagnética de los electrones del esmalte dental o los huesos para la dosimetría retrospectiva, método que en ocasiones recibe el nombre de biodosimetría. En una emergencia radiológica o nuclear, la biodosimetría es fundamental para determinar prontamente la dosis de radiación recibida por las personas expuestas (p. ej., los trabajadores expuestos o el público en general). La biodosimetría retrospectiva puede incluso ayudar a determinar la exposición radiológica sufrida años antes, como en el caso del accidente de Chornóbil o incluso de las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki. La biodosimetría podría también utilizarse en aplicaciones clínicas, por ejemplo para ayudar a los radioncólogos a obtener mejores resultados médicos.

### E.2.1. La biodosimetría relaciona los biomarcadores con las dosis

215. La biodosimetría es una de las ramas más desarrolladas de la radiobiología; sus aspectos técnicos están bien estudiados y han sido objeto de normalización internacional.<sup>7</sup> Cuatro normas ISO sobre el tema proporcionan orientaciones internacionales para los servicios de biodosimetría: ISO 19238:2014, ISO 21243:2008, ISO 17099:2014 e ISO 20046:2019.

216. En resumen, las curvas de calibración permiten relacionar los biomarcadores con la dosis recibida por el paciente (figura E-3). La determinación de la dosis es importante para escoger la estrategia de tratamiento médico adecuada para una persona que ha sido expuesta a la radiación en un accidente. Las curvas de calibración son el resultado de modelos matemáticos basados en datos empíricos; los errores no se muestran.

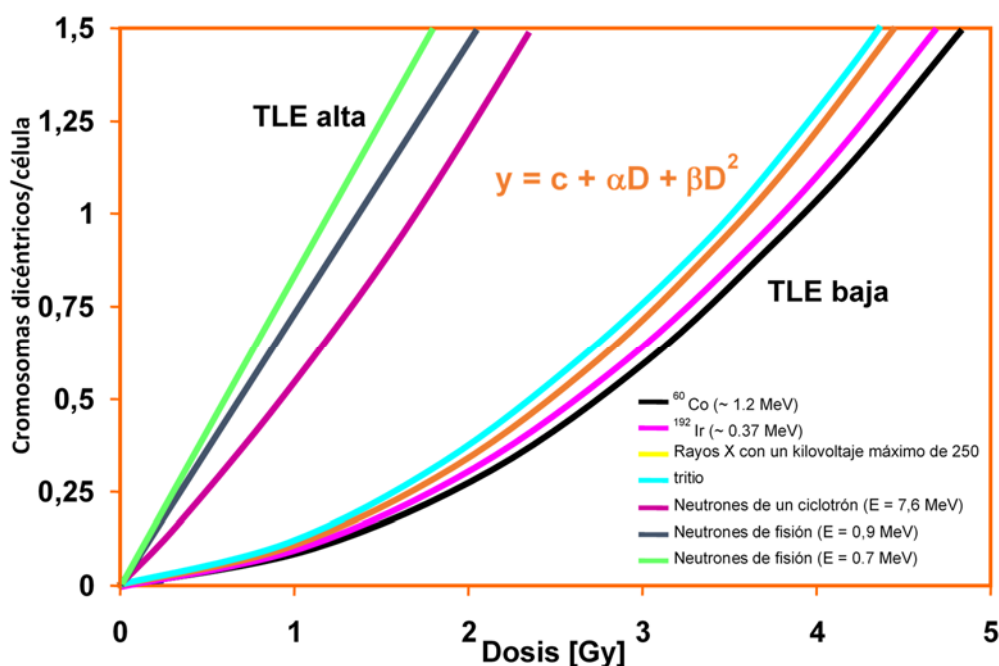


Fig. E-3 Curvas, lineales y lineales cuadráticas, de la relación entre los cromosomas dicéntricos y la dosis, con radiaciones de transferencia lineal de energía (TLE) alta y baja. (Fuente: Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies – Training Materials, Emergency Preparedness and Response, EPR-Biodosimetry/T 2012, OIEA, 2013.)

<sup>7</sup> OIEA, *Dosimetría citogenética: Aplicaciones en materia de preparación y respuesta a las emergencias radiológicas, EPR-Biodosimetry 2011* (2014), pág. 144.

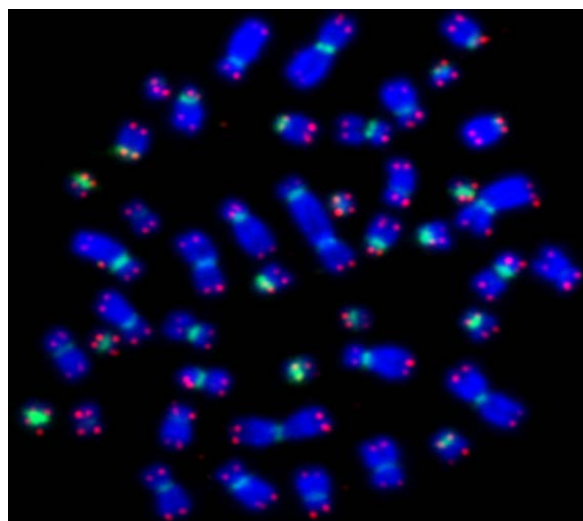


### E.2.2. Métodos biodosimétricos normalizados

217. Actualmente hay cuatro métodos normalizados de biodosimetría citogenética en uso: i) el análisis convencional de las aberraciones cromosómicas inestables (los ‘cromosomas dicéntricos’); ii) la medición de las aberraciones cromosómicas estables con el método de la hibridación *in situ* con sondas fluorescentes (FISH) (‘análisis de las traslocaciones’); iii) el análisis de la condensación prematura de cromosomas (PCC); y iv) la prueba de detección de micronúcleos por bloqueo de la citocinesis (CBMN).

### E.2.3. Un repaso a los nuevos métodos biodosimétricos desarrollados desde 20020

218. Recientemente se han introducido en la práctica biodosimétrica varios métodos nuevos que están revolucionando este campo de trabajo.<sup>8</sup> Los cromosomas dicéntricos presentes en los linfocitos humanos a causa de la radiación pueden detectarse utilizando el método del ácido peptidonucleico-FISH (APN-FISH) (figura E-4). Este es un método mejorado para determinar las aberraciones cromosómicas inestables, que permite realizar una puntuación más eficiente de las aberraciones dicéntricas. El uso de sondas teloméricas y centroméricas en la hibridación puede mejorar la resolución de la detección de cromosomas dicéntricos en el análisis.



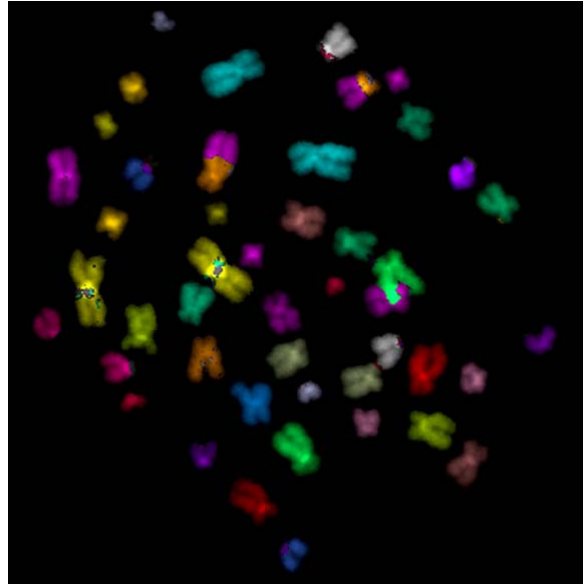
*Fig. E-4. Uso de sondas APN con cianina 3 (teloméricas) e isotiocianato de fluoresceína (centroméricas), representadas por las señales rojas y verdes, y tinción de contraste con 4',6-diamidino-2-fenilindol, representada en azul, en el método APN-FISH.*

*(Fotografía: Prof. Hande, Universidad Nacional de Singapur.)*

219. La técnica de hibridación *in situ* con fluorescencia multicolor (mFISH) es otro método, que permite detectar las aberraciones intercromosómicas en forma de traslocaciones cromosómicas causadas por la radiación ionizante en los linfocitos humanos (figura E-5).

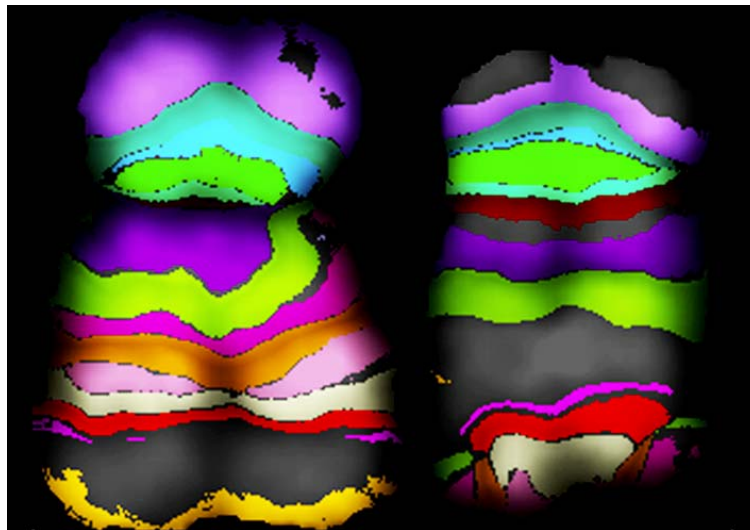
---

<sup>8</sup> Zeegers, D. y otros, Biomarkers of Ionizing Radiation Exposure: A Multiparametric Approach, *Genome Integrity* 8(1) (2017).



*Fig. E-5. En la técnica mFISH, cada cromosoma (1 a 22, X e Y) es teñido con un color diferente empleando un marcado combinatorio que produce una hibridación de 24 colores y permite visualizar toda traslocación inter cromosómica como una unión de colores en los cromosomas afectados.  
(Fotografía: Prof. Hande, Universidad Nacional de Singapur.)*

220. Por último, la técnica del bandeo cromosómico multicolor (mBAND), posiblemente el método biodosimétrico más avanzado, permite detectar las aberraciones intracromosómicas. Este tipo de biomarcador se considera una marca distintiva inconfundible de la radiación de alta transferencia lineal de energía (figura E-6).<sup>9</sup>



*Fig. E-6. Aberraciones intracromosómicas detectadas con la técnica mBAND-FISH en el cromosoma 5 mediante el marcado de diferentes segmentos con pintura de distintos colores.  
(Fotografía: Prof. Hande, Universidad Nacional de Singapur)*

#### **E.2.4. Mirada al futuro**

221. Los métodos biodosimétricos ayudan a detectar la exposición humana a la radiación, y también a cuantificarla y a analizar su posible fuente y naturaleza. Recientemente se han introducido métodos

---

<sup>9</sup> Vinnikov, V. y Belyakov, O., Clinical Applications of Biomarkers of Radiation Exposure: Limitations and Possible Solutions through Coordinated Research. *Radiat Prot Dosimetry*, 2019.

biodosimétricos en la radioncología y la medicina nuclear, así como en la radiología diagnóstica e intervencionista.<sup>10</sup> El Organismo ha puesto en marcha un nuevo proyecto coordinado de investigación que busca facilitar el diálogo entre los especialistas en biodosimetría y los radioncólogos.<sup>11</sup> Se espera que la notable mejora de los métodos biodosimétricos permita evaluar de forma más completa las consecuencias de las exposiciones médicas, planificadas o accidentales, a la radiación.

## **F. Alimentación y agricultura**

### **F.1. Mejora de las aplicaciones de la técnica de los insectos estériles en la prevención y erradicación de plagas de insectos invasores**

#### **F.1.1. Antecedentes**

222. Las especies invasoras pueden interferir con los servicios de los ecosistemas o perturbar el ecosistema completo, causando el declive de muchas de las especies nativas ya incluidas en la lista de especies amenazadas o en peligro.<sup>12</sup> Los efectos de las especies invasoras son superados solo por la destrucción de los hábitats como causa de la pérdida de biodiversidad mundial.<sup>13</sup> El considerable costo del control de las plagas invasoras y de la producción perdida es una cuestión transfronteriza que requiere una coordinación eficaz a escala regional e internacional.

223. El rápido crecimiento del transporte y el comercio internacionales, de la migración de poblaciones y de los desplazamientos de productos ganaderos y agrícolas entre distintas regiones geográficas ha elevado considerablemente las probabilidades de introducir plagas de especies invasoras en nuevas regiones. La tasa de introducción de especies exóticas pasó en los últimos 200 años de un promedio de 7,7 especies anuales entre 1500 y 1800 al nivel sin precedentes de 585 en 1996.<sup>14</sup> Con el tiempo, los artrópodos y otros invertebrados se han convertido en invasores cada vez más eficaces, con un aumento exponencial de las introducciones en los últimos 45 años. El daño infligido a la economía mundial por las especies invasoras se ha estimado 1,4 billones de dólares, que en 2002 representaban alrededor del 5 % de la economía mundial total.

#### **F.1.1.1. Relación entre las plagas de insectos invasores y el cambio climático**

224. El cambio climático causado por las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero no solo está modificando la distribución de muchas especies, sino que también está facilitando una mayor supervivencia de las plagas invasoras en regiones antes inhóspitas.<sup>15</sup> Mientras que el aumento de los movimientos e intercambios de bienes acelera la redistribución de muchas plagas de insectos, el clima y los cambios conexos del uso de la tierra crearán probablemente nuevos nichos ecológicos, permitiendo el establecimiento de nuevas plagas en nuevos territorios y causando importantes cambios en las áreas ocupadas por las especies (figura F-1).

---

<sup>10</sup> Vinnikov, V. and Belyakov, O., "Radiation Exposure Biomarkers in the Practice of Medical Radiology: Cooperative Research and the Role of the International Atomic Energy Agency (IAEA) Biodosimetry/Radiobiology Laboratory". *Health Physics*, 2020.

<sup>11</sup> *Ibid.*

<sup>12</sup> Charles, H., Dukes, J., Impacts of invasive species on ecosystem services, *Ecological Studies* 193 (2007) 217-237.

<sup>13</sup> Pimentel, D. (ed.), *Biological Invasions: Economic and Environmental Costs of Alien Plant, Animal and Microbe Species*, segunda edición (2011), CRC Press, Boca Raton, 369. La sección F contiene varias referencias a esta publicación.

<sup>14</sup> Hulme, P. E., Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization, *Journal of Applied Ecology* 46 (2009) 10-18.

<sup>15</sup> Ziska, L. H., Dukes, J. S. (eds.), *Invasive species and global climate change* (2014), CABI, Wallingford, 368.



*Fig. F-1. Ejemplo de una plaga de insectos invasores (polilla del cacto, Cactoblastis cactorum (Berg)).  
(Fotografía: Ignacio Baez, Centro de Ciencia y Tecnología de Sanidad Vegetal, Departamento de  
Agricultura de los Estados Unidos)*

225. Las proyecciones del cambio climático hasta 2050 predicen un aumento medio neto del 18 % de la presencia de artrópodos invasores. Esta expansión se aplica no solo a las plagas de las plantas, sino también a las enfermedades transmitidas por vectores, alterando las distribuciones temporoespaciales y la dinámica de poblaciones de los vectores y acelerando sus ciclos de vida, incluidos los de los parásitos, sus modos de transmisión y sus oportunidades de desarrollo en nuevos huéspedes. Las mayores temperaturas pueden acelerar el ritmo de desarrollo de las plagas y los organismos patógenos, acortando la duración de las generaciones y elevando así el número de generaciones por año, lo que a su vez puede conducir a un aumento del tamaño de las poblaciones de parásitos y organismos patógenos, y de la probabilidad de mutaciones a cepas más virulentas. Para mitigar o afrontar los problemas relacionados con estas nuevas plagas causadas por el clima y la globalización, se requieren nuevas leyes y políticas.<sup>16</sup> Es necesario apoyar la elaboración de métodos de control innovadores, como la técnica de los insectos estériles (TIE), para mitigar y gestionar estas incursiones biológicas y contener la expansión geográfica de las poblaciones de plagas exóticas.

#### **F.1.1.2 La TIE como herramienta para prevenir y erradicar las plagas de insectos invasores**

226. En muchos casos, las campañas de erradicación de plagas de insectos invasores carecen de herramientas para extirpar selectivamente todos los individuos de la población invasora y deben recurrir a la aplicación indiscriminada y a gran escala de fumigaciones de insecticidas, así como a la drástica supresión de los animales y plantas infestados, o incluso a la destrucción masiva de enteros rebaños, cultivos y huertos.

##### **Despliegue de la TIE**

La técnica del insecto estéril (TIE), desplegada como un componente importante de la gestión integrada zonal de plagas, puede prevenir el establecimiento de una población invasora, o contenerla y erradicarla, sin suscitar oposición pública ni dejar una huella ecológica. Al ser específica para cada especie y, por lo tanto, no afectar a otros organismos beneficiosos o que no se desea eliminar, es una herramienta ideal para ayudar a erradicar poblaciones de plagas de insectos invasores. Su integración es particularmente eficaz en las fases tardías de las campañas de erradicación, debido a su dependencia inversa de la densidad: cuanto más pequeña es la población objetivo, tanto más rápida es la erradicación. Además, la TIE se integra bien con otros métodos de supresión biológica. Dado que puede aplicarse desde el aire, es eficaz también en zonas de topografía irregular y de acceso limitado.

<sup>16</sup> Perrings, C., Dehnen-Schmutz, K., Touza, J., Williamson, M., How to manage biological invasions under globalization, *Trends in Ecology and Evolution* 20(5) (2005) 212-215.

### F.1.2. Mejoras en las tecnologías y estrategias de la TIE

227. En los últimos decenios, las tecnologías y los protocolos mejorados de producción masiva, esterilización y suelta de insectos estériles han elevado enormemente la eficacia en relación con el costo de la gestión integrada zonal de plagas con un componente de TIE, y ello ha permitido ampliar el uso de esta tecnología a otras plagas de insectos importantes, incluidas las plagas invasoras más conocidas que afectan a las plantas, los animales y la salud humana. Esto comprende el uso de la TIE para erradicar los brotes de incursiones de plagas y los establecimientos incipientes recientes. Si un Estado Miembro se enfrenta a la introducción de una especie invasora, se recopilan los datos relativos a las dosis recomendadas para la esterilización de los insectos y se publican en relación con las más de 360 especies de insectos que figuran en la Base de Datos Internacional sobre Desinfestación y Esterilización de Insectos (IDIDAS).

228. Un ejemplo de un uso preventivo de la TIE son los programas de sueltas preventivas contra la mosca mediterránea de la fruta ejecutados en California y Florida.<sup>17</sup> Estos estados de los Estados Unidos han sido objeto de incursiones cada vez más frecuentes de esta mosca, con repetidas detecciones y brotes en zonas urbanas, especialmente donde existen aeropuertos internacionales. Estas incursiones, que se han relacionado con el contrabando de frutas y con el rápido crecimiento del volumen de las expediciones y el tráfico aéreo, han dado lugar a extensos y costosos programas de erradicación, que en un comienzo consistieron principalmente en fumigaciones aéreas de cebos de malatión sobre zonas urbanas, que causaron gran indignación pública. En respuesta a ello, en 1994 se empezó a ejecutar en California un programa de sueltas preventivas de moscas mediterráneas de la fruta que ahora abarca 4582 km<sup>2</sup> de la cuenca de Los Angeles y el condado de Orange. En comparación con los años anteriores a estas sueltas preventivas, los brotes de California se han reducido en más de un 98 %. En las zonas de Florida en que se han aplicado programas de sueltas preventivas, no ha habido ningún brote de mosca mediterránea de la fruta.<sup>18</sup> Gracias a ello, no obstante las continuas incursiones de esta plaga invasora, la parte continental de los Estados Unidos de América sigue estando reconocida internacionalmente como zona exenta de la mosca mediterránea de la fruta.

229. Un ejemplo del uso de la TIE para erradicar brotes de incursiones de plagas y establecimientos incipientes recientes es la erradicación de la mosca mediterránea de la fruta de la República Dominicana. La presencia de esta mosca en la República Dominicana fue notificada en marzo de 2015. La inmediata prohibición de las importaciones impuesta por los principales socios comerciales del país causó una pérdida estimada en alrededor de 40 millones de dólares en concepto de exportaciones de frutas y hortalizas, poniendo en peligro miles de empleos. Como respuesta de emergencia, el Gobierno de la República Dominicana estableció el Programa Moscamed-RD.

230. La División Mixta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura, en estrecha cooperación con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y el Programa Moscamed Guatemala-México-Estados Unidos de América, prestó asistencia técnica a la República Dominicana para suprimir esta importante plaga invasora y aplicar la TIE como principal herramienta de erradicación. Otras organizaciones que participaron en este gran esfuerzo de apoyo a la República Dominicana fueron el Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Entre octubre de 2015 y mayo de 2017 se recibieron desde la instalación de El Pino de Guatemala y se soltaron en las zonas afectadas más de 4000 millones de

---

<sup>17</sup> Dowell, R. V., Siddiqui, I. A., Meyer, F., Spaugy, E. L., Mediterranean fruit fly preventative release programme in southern California, 369-375. En Tan, K. H. (ed.), *Proceedings: Area-Wide Control of Fruit Flies and Other Insect Pests. International Conference on Area-Wide Control of Insect Pests, and the 5th International Symposium on Fruit Flies of Economic Importance, 28 May-5 June 1998* (2000), Penerbit Universiti Sains, Malasia.

<sup>18</sup> Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, *2014 Review of Sterile Insect Release Facilities: Sarasota, Florida and Los Alamitos, California. Mediterranean Fruit Fly Preventive Release Program* (2014) 30.



moscas estériles (figura F-2). En julio de 2017 se declaró oficialmente erradicada la mosca mediterránea de la fruta.<sup>19</sup> Si se hubiera permitido el establecimiento de esta catastrófica plaga invasora, toda la región del Caribe y sus socios comerciales habrían corrido un grave riesgo de sufrir brotes devastadores y enormes pérdidas de ingresos de exportación.



*Fig. F-2. Preparación para la suelta aérea de insectos estériles.  
(Fotografía: Programa Moscamed de Guatemala)*

### **F.1.3. Las plagas de insectos invasores — prevención y preparación**

231. Para muchas regiones o países actualmente libres de una determinada plaga, la pregunta no es si llegará a producirse la invasión de esa especie, sino cuándo ocurrirá (figura F-3). Las tendencias de los viajes y el comercio mundiales aumentan cada vez más las probabilidades de que cualquier especie pueda llegar a cualquier parte del planeta.



*Fig. F-3. Inspección fitosanitaria del equipaje en un punto de entrada por perros que detectan especies invasoras que no han alcanzado la fase de maduración. (Fotografía: FUNBAPA, Argentina)*

232. Los análisis costo-beneficio indican por lo general que los preparativos para poder responder a las incursiones de manera rápida y eficaz son mucho más baratos que la ejecución de largas y costosas campañas de erradicación de resultados inciertos, o que permitir el establecimiento permanente de una plaga importante que luego requerirá un control a largo plazo. La TIE puede ser útil en la lucha contra

---

<sup>19</sup> Zavala-López, J. L., Marte-Díaz, G., Martínez-Pujols, F., Successful area-wide Mediterranean fruit fly eradication in the Dominican Republic. En J. Hendrichs, R. Pereira y M.J.B. Vreysen (eds.), *Area-wide integrated pest management: development and field application* (de próxima publicación).

muchas de las grandes plagas de insectos invasores; sin embargo, es frecuente que el conjunto de recursos TIE no esté disponible, o lo esté solo en parte, cuando se produce un nuevo brote de una plaga invasora. Por consiguiente, es importante desarrollar este conjunto de recursos para las peores plagas exóticas posibles que puedan combatirse mediante la TIE.<sup>20</sup>

233. La optimización de la tecnología utilizada para las aplicaciones zonales de la TIE, así como su diversificación para combatir otras plagas de insectos de gran importancia, ampliarán aún más el uso de la técnica y ofrecerán una herramienta estratégica para combatir la creciente introducción de plagas invasoras debido al aumento de los viajes y el comercio, el cambio climático y otros factores.

## **F.2. Técnicas nucleares al servicio de los sistemas de trazabilidad de los alimentos**

### **F.2.1. Antecedentes**

234. Numerosos alimentos se venden a precios recargados en razón del ‘valor añadido’ por las denominaciones de origen, los métodos de producción y las características especiales declarados en la etiqueta. Los productos asociados a un lugar de origen pueden ser parte de un círculo virtuoso de calidad sostenible basado en la preservación de los recursos locales y en otros factores que se describen en la publicación de la FAO titulada *Linking people, places and products*.<sup>21</sup>

235. Entre los métodos analíticos más prometedores para la verificación de la indicación geográfica figuran el análisis de isótopos estables y oligoelementos; la espectroscopia por resonancia magnética, incluida la resonancia magnética nuclear (RMN) y la resonancia paramagnética de los electrones o espectroscopia de resonancia paramagnética electrónica; y los perfiles por espectrometría de masas. Además, la Unión Europea ha recomendado que las nuevas indicaciones geográficas que se registren contengan una referencia a un procedimiento analítico adecuado para verificar la procedencia y/o las cualidades esenciales del producto.

#### **¿Qué es la indicación geográfica?**

La indicación geográfica define el origen y/o el método de producción de un alimento cuando una determinada calidad, reputación u otra característica de este son atribuibles esencialmente a su origen geográfico o al tipo de territorio del que procede. Las ventajas de la indicación geográfica comprenden la garantía de la calidad (reputación), la competencia leal, la protección del nombre en los mercados (internos e internacionales), el sobreprecio, la vinculación de productos valiosos con zonas rurales, la reconexión de los consumidores y los productores, y la protección de las tradiciones. La base de datos DOOR de origen y registro de productos agrícolas y alimentos de la Unión Europea, que contiene varios miles de productos alimentarios de todo el mundo, ofrece una visión general de los productos con indicación geográfica registrada.

### **F.2.2. Técnicas nucleares**

236. En los párrafos siguientes se describen las principales técnicas nucleares o isotópicas que permiten verificar el origen de los alimentos. Estas técnicas comprenden, entre otras, el análisis de las razones de isótopos estables de elementos pesados mediante la espectrometría de masas de ionización térmica

<sup>20</sup> Grupo de Especialistas en Especies Invasoras, Base de Datos Mundial sobre Especies Invasoras, Programa Mundial sobre Especies Invasoras (GISP) (2018). <http://www.issg.org/database/species/search.asp?st=100ss&fr=1&str=&lang=EN>.

<sup>21</sup> FAO, *Strengthening sustainable food systems through geographical indications: An analysis of economic impacts* (2018).

(TIMS) y la espectrometría de masas multicolectora con plasma acoplado por inducción (MC-ICP-MS); el análisis de elementos múltiples mediante la espectrometría de masas con plasma acoplado por inducción (ICP-MS), la espectroscopia por emisión óptica (OES) con plasma acoplado por inducción, la fluorescencia de rayos X (XRF), el análisis por activación neutrónica (AAN) y otras técnicas conexas. Además, pueden utilizarse técnicas tales como la espectroscopia por resonancia magnética nuclear y la espectroscopia de masas para la determinación del perfil metabólico o el cribado no específico, junto con otros métodos nucleares rápidos que permiten el análisis presuntivo, como la espectrometría de movilidad iónica (IMS).

237. La variedad y el carácter complementario de estas técnicas ofrecen una sólida base para determinar el origen y la autenticidad de los alimentos, en apoyo de los sistemas de trazabilidad y de las declaraciones de valor añadido. Además, el historial de éxitos de cada tecnología en la detección del origen y la adulteración de los alimentos es fundamental en la transferencia de conocimientos y la rápida aplicación y capacitación en los países y regiones que actualmente carecen de soluciones analíticas.

### **Mediciones de isótopos estables**

238. Las técnicas nucleares aprovechan la variación mundial sistemática de las razones de los isótopos estables de los bioelementos hidrógeno, carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre, medida utilizando la espectrometría de masas de relaciones isotópicas y las variaciones de los isótopos pesados del estroncio y otros indicadores biogeoquímicos. Como primera aproximación, las mediciones de los isótopos estables abundantes en la naturaleza proporcionan información sobre la fotosíntesis de las plantas o la alimentación (razones isotópicas del carbono y el nitrógeno) y sobre el origen geográfico (razones isotópicas del hidrógeno, el oxígeno, el azufre y el estroncio). Por ejemplo, la medición de las razones de los isótopos estables naturales de los bioelementos hidrógeno, carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre en los alimentos aporta a menudo información sobre el origen geográfico o la técnica de producción del alimento, mediante la asociación con las razones isotópicas en el medio ambiente o, por ejemplo, en los regímenes de alimentación de los animales. Los isótopos del estroncio, medidos utilizando la TIMS o la MC-ICP-MS, también ofrecen información relacionada con la geología de la región de producción, que se transmite, a través de las fracciones biodisponibles en los suelos, a las plantas y los animales. Dado que las 'huellas' de isótopos estables de los alimentos están intrínsecamente relacionadas con las características de la zona de producción, no resulta viable, desde el punto de vista económico, manipularlas o falsificarlas artificialmente.

### **Perfiles de elementos**

239. La determinación de los elementos presentes en los alimentos por medio de la ICP-MS proporciona información importante sobre sus concentraciones de macro, micro y oligoelementos que los vincula con el lugar de producción y con cualquier procesamiento tecnológico que pueda haber alterado su perfil de elementos, como la molienda o trituración. Las plantas reflejan en su composición los nutrientes movilizados y biodisponibles presentes en el suelo en que crecieron. Por ejemplo, los metales alcalinos, especialmente el rubidio y el cesio, se movilizan fácilmente en el suelo y penetran en las plantas, por lo que son buenos indicadores de la identidad geográfica.

240. La disponibilidad de oligoelementos depende de varios factores, como el pH, la humedad y la porosidad del suelo, y su contenido de arcilla y humus. Por lo tanto, teniendo en cuenta la variedad de suelos presentes y la biodisponibilidad, la composición elemental puede proporcionar: 1) una combinación distintiva de marcadores que caracterice el origen geográfico del alimento y 2) una forma independiente de verificar o respaldar los resultados de un sistema de trazabilidad. De igual modo, el perfil multielemental de los tejidos animales refleja, en cierta medida, la vegetación consumida por los animales y puede relacionarse con zonas de producción específicas, como en el caso del ganado lechero y de carne alimentado en tierras de pastoreo. Además, los perfiles de los elementos proporcionan información sobre la inocuidad de los alimentos en lo que respecta a la concentración de elementos posiblemente tóxicos como el arsénico, el cadmio, el plomo y el mercurio.

### Estudio de las huellas de metabolitos o metabolómica

241. El análisis de los metabolitos presentes en los alimentos es otra técnica importante de uso común para verificar la autenticidad. Los metabolitos son el resultado de los procesos celulares y moleculares de un organismo y pueden caracterizarse por resonancia magnética nuclear y espectroscopia de masas. La metabolómica puede ser específica, centrada en grupos de metabolitos interrelacionados que proporcionan información funcional directa para la modelización, o genérica, es decir, destinada a detectar patrones de metabolitos que permitan diferenciar los distintos conjuntos de muestras y elaborar modelos para la clasificación de muestras de materiales desconocidos mediante el patrón o la huella metabólicos. Todas estas técnicas hacen un gran uso del análisis estadístico multivariante para elaborar e interpretar los resultados (figura F-4).

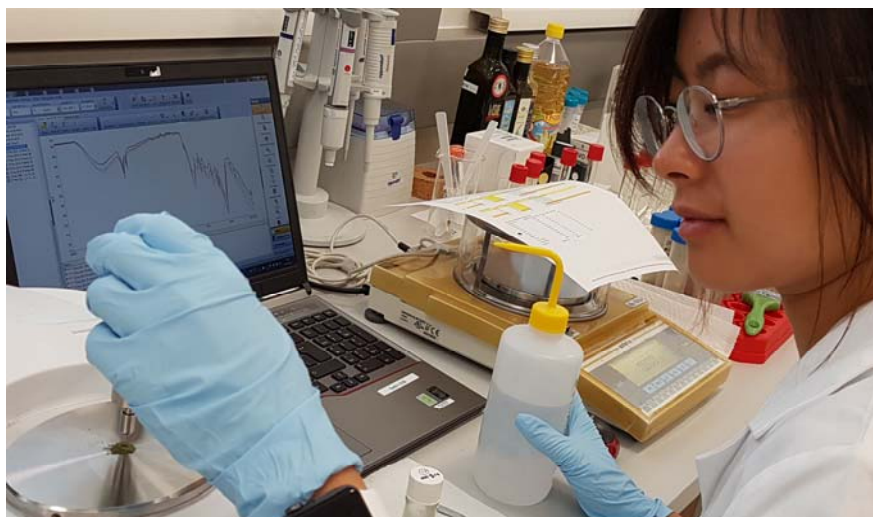


Fig. F-4. Una funcionaria del OIEA analiza una muestra de té verde (Fotografía: OIEA)

242. La resonancia magnética nuclear y la resonancia paramagnética de los electrones pueden utilizarse para estudiar mezclas complejas de alimentos con una separación previa sencilla o nula de los componentes y obtener información sobre el origen geográfico, la presencia de adulterantes, la calidad y el procesamiento tecnológico del alimento. Un ejemplo de la aplicación de este tipo de técnica es la elaboración de un perfil con ayuda de la espectroscopia por RMN de protones de alto campo para determinar el origen de la miel, los zumos de fruta y el vino y la presencia de adulterantes en estos productos. Los resultados de una muestra de material desconocido se comparan con una base de datos de muestras auténticas de procedencia conocida, obteniéndose ya sea una concordancia positiva, si el material es auténtico, o una huella anómala, si no lo es. Otro punto fuerte de estas técnicas es que la región de la anomalía espectral puede analizarse más a fondo para identificar el producto o los productos químicos utilizados en la adulteración. Además, la caracterización por resonancia paramagnética de los electrones constituye una técnica de medición sensible y exacta para la detección de radicales orgánicos, con electrones desaparejados, en un campo magnético, lo que demuestra que los agricultores que cultivan frutas y verduras, los productores de especias y otras cadenas de suministro de productos similares cumplen las normas de garantía de la calidad y de inocuidad. La resonancia paramagnética de los electrones confirma que se ha recurrido a la irradiación de los alimentos cuando se detectan antioxidantes, radicales de celulosa y radicales de azúcar cristalino en las muestras de comida. La irradiación de los alimentos es el proceso por el cual los alimentos se tratan con unos niveles aprobados de radiación ionizante para eliminar a los organismos causantes de enfermedades y ampliar el tiempo de conservación de esos alimentos. Esta técnica también se utiliza para garantizar la seguridad microbiana con el objetivo de desactivar a los parásitos y los microorganismos patógenos eliminando insectos y bacterias dañinas, como la *Escherichia coli* presente en la carne y las aves de corral, que a menudo se encuentran



en una amplia variedad de productos alimenticios. Para ello, se aplica una tecnología de procesamiento que tiene por fin mejorar la inocuidad de los alimentos.

### **Tecnología de cribado**

243. Los avances recientes en la instrumentación analítica están aumentando la transportabilidad y accesibilidad de algunas técnicas nucleares y paramagnéticas de los electrones. Diversas categorías de instrumentos que antes solo podían emplearse en laboratorios están apareciendo ahora en versiones de sobremesa, portátiles o de mano más asequibles, que permiten realizar análisis sistemáticos de los alimentos en busca de características atípicas o anomalías. Por ejemplo, desde hace poco hay instrumentos de RMN y de resonancia paramagnética de los electrones de sobremesa relativamente asequibles capaces de efectuar análisis de cribado que antes requerían el uso de costosos instrumentos de RMN de alto campo, con infraestructura y personal especializados.

244. Asimismo, los espectrómetros XRF portátiles y de mano pueden encontrar aplicaciones en las pruebas de determinación de la composición elemental de los alimentos, si se mejora su sensibilidad relativa. Otra técnica de sobremesa o portátil que encierra un gran potencial para los análisis de la autenticidad de los alimentos es la cromatografía de gases de cámara volátil acoplada a la espectroscopia de movilidad iónica (CG-IMS), que emplea una fuente de radiación de muy baja energía. La IMS ha sido utilizada ampliamente por muchos años para la detección sistemática de explosivos y drogas ilegales en los aeropuertos, y solo recientemente se ha comenzado a aplicar para determinar la autenticidad de los alimentos y confirmar su origen mediante el examen de sus componentes orgánicos volátiles. Como ejemplos cabe mencionar el análisis sistemático de la autenticidad y el origen de los productos lácteos, el arroz y los aceites vegetales, de semillas y de frutos secos de alto valor, como el aceite de argán marroquí.

### **F.2.3. Bases de datos**

245. Para utilizar la tecnología arriba mencionada en la determinación del origen de los alimentos y en la verificación independiente de los sistemas de trazabilidad, es necesario caracterizar la variación natural en el análisis de los isótopos estables y los oligoelementos y en las ‘huellas’ metabólicas de productos alimentarios con indicaciones geográficas auténticas a lo largo de varios ciclos anuales o de cosecha. Esta información puede luego incorporarse en una biblioteca de referencia o una base de datos sobre el origen de los alimentos, para la comparación en caso de sospecha de falsificación o adulteración de un producto. Mientras que la metodología y la tecnología ya existen, la falta de bases de datos y/o su limitada interoperabilidad constituyen el gran escollo al uso del análisis de los isótopos estables y los oligoelementos y de la huella de metabolitos para determinar el origen y la autenticidad de los alimentos.

#### **¿Lo sabía?**

Una base de datos sobre el origen de los alimentos es una colección organizada de datos, analizados utilizando protocolos establecidos y adquiridos a partir de un número representativo de muestras auténticas.

246. El propósito de una base de datos de este tipo es definir la variabilidad natural (y la variabilidad tecnológica admisible) de ciertas propiedades específicas de los alimentos. Esa variabilidad ‘natural’ se utiliza como punto de comparación en el análisis de muestras sospechosas o en la labor de vigilancia sistemática por muestreo de mercado para detectar el fraude alimentario, como el etiquetado erróneo y la adulteración. Habida cuenta del objetivo fundamental de estas bases de datos de apoyar los sistemas de trazabilidad de los alimentos (por ejemplo, las retiradas de productos específicas o compartimentadas), y de las repercusiones de los casos en que un alimento sometido a ensayo resulta ser no conforme, es un imperativo que el desarrollo y mantenimiento de estas bases de datos estén a



cargo de un anfitrión independiente, mundial y fiable, al que los Estados Miembros puedan recurrir de manera sistemática para comparar los alimentos posiblemente fraudulentos o falsificados.

247. Una serie de técnicas analíticas nucleares y conexas permiten determinar el origen de los alimentos para apoyar, o verificar independientemente, los sistemas de trazabilidad de los alimentos. Se espera que los próximos avances incluyan la miniaturización de los instrumentos analíticos para el cribado de primer nivel, con tecnologías novedosas y emergentes tales como las de los nanomateriales y las herramientas de manipulación de datos avanzadas, para desarrollar instrumentos portátiles, rápidos y no invasivos, lo que aumentará considerablemente el número de muestras de alimentos que se podrán analizar. Por ejemplo, ya se han desarrollado prototipos de escáner de alimentos en que el dispositivo de escaneo es un teléfono inteligente común y corriente. Debido a su relación costo-eficacia y su accesibilidad, estas técnicas podrían emplearse para el escaneo de los alimentos en múltiples puntos de la cadena de valor alimentaria, por los interesados de la industria alimentaria, los reguladores e incluso los consumidores, con un considerable aumento de la eficacia de los sistemas de control.

248. Se prevé que la integración de estos instrumentos en los sistemas de análisis de alimentos desencadenará un cambio de paradigma, en que los laboratorios que aplican técnicas isotópicas y nucleares sumamente sensibles y específicas que aportan información crucial dejarán de analizar grandes números de muestras conformes y se concentrarán en una cantidad menor de muestras más pertinentes que hayan sido clasificadas como sospechosas.

### **F.3. Técnicas nucleares de vigilancia de los gases de efecto invernadero para mitigar las repercusiones del cambio climático**

#### **F.3.1. Antecedentes**

249. Las emisiones de los principales gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), están contribuyendo al calentamiento global, lo que afecta a la sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola. Datos recientes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) indican claramente que las emisiones antropógenas de GEI se encuentran en niveles nunca antes alcanzados en tiempos históricos.<sup>22</sup> Desde 1900, la temperatura media del aire en la superficie de la tierra ha aumentado en alrededor de 0,8 °C, y la mayor parte de este aumento se ha producido desde mediados de los años setenta. Los cambios en la agricultura y en el uso de la tierra son responsables de un 25 % del total de las emisiones de GEI, principalmente debido al uso ineficiente de los fertilizantes químicos y los abonos animales, el sobrepastoreo y la deforestación. La agricultura está contribuyendo considerablemente al cambio climático a través de las emisiones de GEI, pero también es víctima de este fenómeno debido a sus repercusiones negativas en la disponibilidad de agua, la fertilidad y calidad del suelo y la productividad de los cultivos.

250. Además de las fuentes directas, también producen GEI diferentes fuentes indirectas, como la volatilización del amoníaco (NH<sub>3</sub>) en los sistemas agrícolas (figura F-5). Los valores de las emisiones de NH<sub>3</sub> notificados para los diferentes ecosistemas agrícolas varían enormemente (entre el 10 % y el 60 % del nitrógeno aplicado).<sup>23</sup> Estas grandes pérdidas de NH<sub>3</sub> de la agricultura tienen repercusiones agronómicas, ambientales y económicas. Por ejemplo, el NH<sub>3</sub> emitido causa problemas sanitarios y ambientales, como la inflamación del aparato respiratorio, la eutrofización del agua y la acidificación

---

<sup>22</sup> IPCC (2014), *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra (Suiza), 157 págs. IPCC - Equipo de Tareas sobre los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/index.html>.

<sup>23</sup> Zaman, M., Saggat, S., Stafford, A.D., Mitigation of ammonia losses from urea applied to a pastoral system: The effect of nBTPT and timing and amount of irrigation, *Proceedings of the New Zealand Grassland Association 75* (2013) 209-214.

de los suelos. Además, el amoníaco actúa como fuente secundaria de  $N_2O$ , un potente gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global. Por otra parte, la variabilidad espacial y temporal de las emisiones de GEI dificulta considerablemente la medición y gestión de estos gases en los diversos ecosistemas agrícolas y usos de la tierra, en conjunto y por separado, y de la heterogeneidad espacial inherente de esos usos. Las técnicas isotópicas permiten determinar las trayectorias de las emisiones, lo que a su vez proporciona información sobre las técnicas de mitigación eficaces.

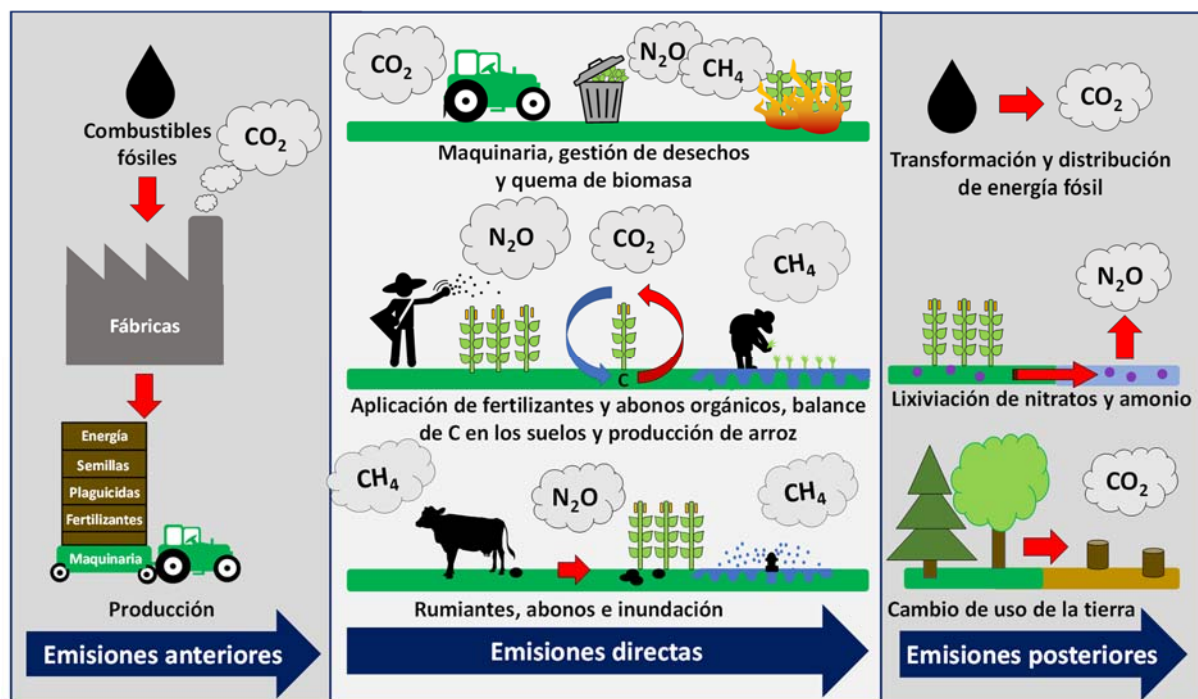


Fig. F-5: Representación esquemática de las emisiones de GEI directas (del propio sistema agropecuario) e indirectas (de las fases anteriores y posteriores a la producción agropecuaria).

### F.3.2. Aplicación de la tecnología del $^{13}C$ sobre el terreno

251. La innovación en el uso del  $^{13}C$  ha permitido ampliar los estudios del ciclo del carbono del nivel de los experimentos de laboratorio en pequeña escala al de la experimentación sobre el terreno. Para este aumento de escala, son esenciales instrumentos avanzados de análisis del  $^{13}C$  en tiempo real, como los analizadores láser de los isótopos del carbono presentes en el dióxido de carbono.<sup>24</sup> Además, marcar el material vegetal con  $^{13}C$  permite evaluar la renovación de la materia orgánica presente en el suelo y su secuestro y estabilización en agroecosistemas. El Laboratorio de Gestión de Suelos y Aguas y Nutrición de los Cultivos del Organismo ha llevado a cabo actividades de investigación y desarrollo sobre las emisiones de  $CO_2$ , y los materiales vegetales marcados con  $^{13}C$  ya están a disposición de los Estados Miembros. Estas herramientas tecnológicas que se basan en el uso del isótopo  $^{13}C$  ayudarán no solo a mejorar la resiliencia de la gestión de las tierras al cambio climático, sino también a comprender los modos en que los futuros escenarios climáticos (el cambio de la temperatura y la diferente pluviosidad) seguirán afectando al almacenamiento del carbono y las emisiones de  $CO_2$ . Estas técnicas proporcionan una estimación inequívoca de la cantidad de carbono secuestrado en el suelo o que se libera de distintas reservas de carbono en el suelo.<sup>25</sup>

<sup>24</sup> Müller, C., et al., "Quantification of  $N_2O$  emission pathways via a  $^{15}N$  tracing model", *Soil Biology and Biochemistry* 72 (2014) 44-54.

<sup>25</sup> Keidel, L., et al., "Depth-dependent response of soil aggregates and soil organic carbon content to long-term elevated  $CO_2$  in a temperate grassland soil", *Soil Biology and Biochemistry* 123 (2018) 145-154.

### F.3.3. Técnica del rastreo con nitrógeno 15 para la medición del N<sub>2</sub>O y la determinación de sus fuentes

252. Para entender las emisiones de N<sub>2</sub>O, es muy importante cuantificar la pérdida de nitrógeno a través de las emisiones de dinitrógeno (N<sub>2</sub>), un gas que no contribuye al efecto invernadero y que se emite en cantidades mucho mayores que las del N<sub>2</sub>O. A fin de medir con precisión las emisiones de GEI procedentes de los suelos, los científicos del Programa Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura y de la Universidad Justus Liebig de Giessen (Alemania) colaboraron en la realización de numerosos experimentos de laboratorio y de campo. El resultado de estos estudios fue el desarrollo de una técnica de rastreo con nitrógeno 15 (<sup>15</sup>N), distinta de la técnica de dilución isotópica y que puede medir con precisión las emisiones de GEI y determinar su origen en el suelo en estudios de campo a corto y largo plazo.<sup>26, 27</sup>

253. Trabajos recientes han puesto de relieve la importancia de las técnicas isotópicas que permiten entender mejor los movimientos y el destino del nitrógeno y el carbono en los ecosistemas agrícolas en lo que respecta a su almacenamiento en los suelos y su emisión a la atmósfera. La comprensión de la compleja naturaleza de los suelos y de los factores que interactúan y contribuyen a su fertilidad y a la producción de GEI es un requisito indispensable para el desarrollo de prácticas agropecuarias inteligentes desde el punto de vista del clima. La figura F-6 ofrece un ejemplo de los resultados de un método de rastreo de este tipo que cuantifica las trayectorias del N<sub>2</sub>O a partir de una pradera permanente. Otros métodos similares permiten determinar los procesos de producción y consumo de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> mediante la aplicación de fuentes adecuadas de <sup>13</sup>C.

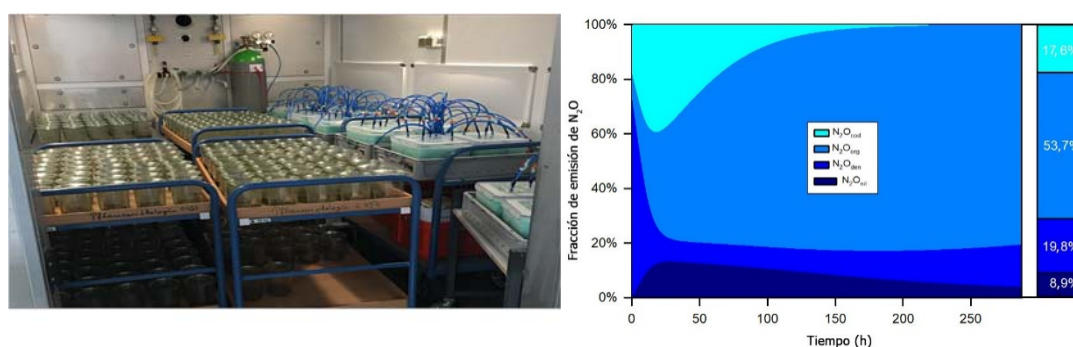


Fig. F-6: Configuración de la incubación en laboratorio en un estudio de rastreo con <sup>15</sup>N (izquierda), y resultados de un estudio de rastreo con <sup>15</sup>N en que se determinaron las trayectorias de las emisiones de N<sub>2</sub>O desde una pradera permanente; N<sub>2</sub>O<sub>mit</sub> = nitrificación, N<sub>2</sub>O<sub>den</sub> = desnitrificación, N<sub>2</sub>O<sub>org</sub> = nitrificación heterótrofa, N<sub>2</sub>O<sub>cod</sub> = codesnitrificación. (Fuente: Müller y otros (2014))<sup>28</sup>

### F.3.4. Novedades en las mediciones del NH<sub>3</sub> sobre el terreno

254. La ausencia de técnicas de medición baratas y de baja tecnología ha supuesto que el número de estudios de campo realizados en el mundo para medir las pérdidas de NH<sub>3</sub> haya sido escaso. Ahora se dispone de varios métodos sofisticados, como los túneles de viento, la espectroscopia por exploración anular total de la cavidad y las técnicas micrometeorológicas. Pero estos métodos son caros, y su aplicación requiere la

<sup>26</sup> Müller, C., et al., "Quantification of N<sub>2</sub>O emission pathways via a <sup>15</sup>N tracing model". *Soil Biology and Biochemistry* 72 (2014) 44-54.

<sup>27</sup> Moser, G., et al., "Explaining the doubling of N<sub>2</sub>O emissions under elevated CO<sub>2</sub> in the Giessen FACE via in-field <sup>15</sup>N tracing". *Global Change Biology* 24 (2014) 3897-3910.

<sup>28</sup> Müller, C. y otros, Quantification of N<sub>2</sub>O emission pathways via a <sup>15</sup>N tracing model, *Soil Biology and Biochemistry* 72 (2014) 44-54.

participación de técnicos de campo altamente cualificados. Por ello, son inaccesibles para muchos países en desarrollo e instituciones que desean medir las pérdidas de  $\text{NH}_3$  en diferentes sistemas de gestión agraria.

255. A fin de desarrollar un método robusto y de bajo costo para la medición del  $\text{NH}_3$ , el OIEA colaboró con la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (Embrapa) y el Instituto Agronómico de Paraná (IAPAR) en la creación de una cámara de  $\text{NH}_3$  sencilla, fabricada con una botella de plástico (figura F-7).

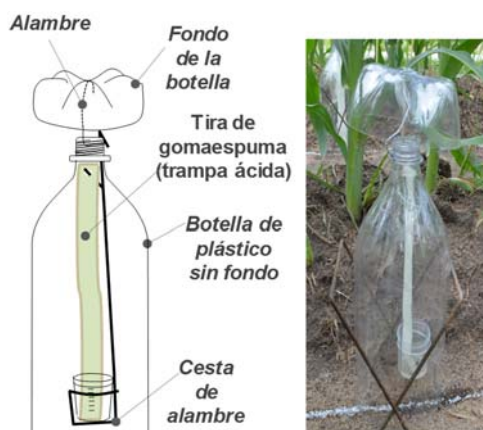


Fig. F-7: Vista de la sencilla cámara abierta utilizada para medir la volatilización del  $\text{NH}_3$ . Los detalles de esta cámara han sido descritos por Araújo y otros (2009)<sup>29</sup> y por Jantalia y otros (2012).<sup>30</sup>

256. Para poner a prueba y confirmar la exactitud de este nuevo método de medición del  $\text{NH}_3$  se empleó la técnica del  $^{15}\text{N}$ . Tras instalar lisímetros entre las filas de un campo de maíz, se aplicó la urea marcada con  $^{15}\text{N}$  en la superficie de cada aparato y en cada uno de ellos se colocó una cámara abierta fabricada con una botella de PET (figura F-7), utilizando cuatro tasas diferentes de aplicación de nitrógeno, distintas distancias entre la cámara y la superficie del suelo, y modalidades con y sin reubicación de la cámara (estáticas o dinámicas) durante el período de seguimiento.

257. Este sencillo método de la cámara abierta es una técnica adecuada y fiable para cuantificar las pérdidas de  $\text{NH}_3$  por volatilización desde los suelos agrícolas, y el costo de la fabricación de cada cámara no llega a un dólar de los Estados Unidos. Este nuevo método de medición del  $\text{NH}_3$  está siendo introducido en países tanto desarrollados como en desarrollo para ayudar a vigilar el impacto ambiental de las emisiones de  $\text{NH}_3$  de los sectores ganadero y agrícola y adoptar medidas al respecto. Su eficiencia se comparó a varias otras metodologías existentes sobre el terreno que utilizan la técnica del  $^{15}\text{N}$ , que ha producido resultados muy similares. Como consecuencia de ello, su reconocimiento como método práctico, exacto y fiable va en rápido aumento, y ya ha sido utilizado con éxito por científicos del Brasil, Chile, China, Costa Rica, España, los Estados Unidos de América, el Pakistán y la República Islámica del Irán. El dispositivo mide con precisión las pérdidas de  $\text{NH}_3$ , permitiendo así aplicar prácticas agrícolas inteligentes desde el punto de vista del clima para reducir en mayor medida los gases de efecto invernadero y su impacto en el medio ambiente.

### F.3.5. Perspectivas para el futuro

Con estos avances en las herramientas de medición y en la modelización, se vislumbran nuevas actividades de investigación y desarrollo para la experimentación sobre el terreno y la promoción de aplicaciones concretas a nivel de los ecosistemas agrarios. En 2020 comenzará un nuevo PCI sobre el tema, con miras a mejorar aún más la comprensión de los complejos procesos de emisión de GEI y desarrollar nuevas opciones de mitigación que reduzcan estos gases, junto con opciones de secuestro del carbono.

<sup>29</sup> Araújo, E.S. y otros, Calibration of a semi-opened static chamber for the quantification of volatilized ammonia from soil, *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 44(7) (2009) 769-776.

<sup>30</sup> Jantalia, C.P. y otros, Nitrogen source effects on ammonia volatilization as measured with semi-static chambers, *Agronomy Journal* 104(6) (2012) 1595-1603.





**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(64)/INF/2