Evaluación radiológica: Evacuación de desechos en los mares árticos

Resumen de los resultados de un estudio apoyado por el OIEA sobre las consecuencias radiológicas del vertimiento de desechos radiactivos de actividad alta en los mares árticos

Hace casi cinco años, en 1992, la atención internacional se centró en informes de prensa sobre el hecho de que durante más de tres decenios la antigua Unión Soviética había venido vertiendo desechos radiactivos en las aguas poco profundas de los mares árticos. La noticia suscitó preocupación general, especialmente en los países con costas en esos mares.

A nivel mundial, el OIEA respondió con la propuesta de realizar un estudio internacional para evaluar las repercusiones del vertimiento en la salud y el medio ambiente. La propuesta recibió el apoyo de la decimoquinta Reunión Consultiva de las Partes Contratantes en el Convenio sobre la prevención de la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias (Convenio de Londres de 1972), auspiciada por la Organización Marítima Internacional (OMI) con sede en Londres. La Reunión Consultiva pidió que el estudio incluyera el examen de posibles medidas correctoras, como la recuperación de los desechos para almacenarlos en tierra.

Poco después, en 1993, el OIEA inició el Proyecto internacional de evaluación de los mares árticos (IASAP).* Sus principales objetivos eran evaluar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente asociados a los desechos radiactivos vertidos en los mares de Kara y Barents; y examinar las posibles medidas correctoras relacionadas con los desechos vertidos y dar asesoramiento acerca de si son necesarias y se justifican. Con la participación de más de 50 expertos de 14 países y dirigido por un Grupo Asesor Internacional, el estudio concluyó a finales de 1996. Financiado parcialmente con fondos extrapresupuestarios de los Estados Unidos, el proyecto fue coordinado con la labor del Grupo de Expertos de Noruega y Rusia encargado de investigar la contaminación radiactiva en las zonas septentrionales. En el presente artículo se resumen los resultados y conclusiones del IASAP, sobre la base del Resumen Ejecutivo del informe final del estudio.

Lo que se examinó en el estudio

Por conducto de un programa coordinado de investigaciones, contratos técnicos, servicios de asesoramiento y otros mecanismos, el estudio reunió a una amplia gama de especialistas de diversas disciplinas. El enfoque adoptado se centró concretamente en:

- Examinar la situación radiológica actual de las aguas árticas a fin de evaluar las pruebas indicadoras de liberaciones procedentes de los desechos vertidos;
- Predecir las posibles liberaciones futuras procedentes de los desechos vertidos concentrándose en los objetos de desechos sólidos de actividad alta que contienen la mayor parte del inventario de radionucleidos de los desechos;
- Elaborar modelos de la diseminación ambiental de los nucleidos liberados y evaluar las repercusiones radiológicas conexas en el hombre y la biota;
- Examinar la viabilidad, los costos y los beneficios de las posibles medidas correctoras aplicadas a un determinado objeto de desecho de actividad alta.

Sobre la base de la información contenida en el "Libro Blanco del Presidente de Rusia" (Realidades y problemas en torno a la evacuación de desechos radiactivos en los mares adyacentes al territorio de la Federación de Rusia, 1993)

El presente artículo se basa en el Resumen Ejecutivo del estudio del IASAP, elaborado por el Grupo Asesor del proyecto. La Sra. K.-L. Sjöblom de la Sección de Seguridad de los Desechos de la División de Seguridad Radiológica y Desechos del OIEA, actuó como oficial de proyectos del IASAP.

* En un artículo de K.-L. Sjöblom y G.S. Linsley publicado en el Vol. 37, Nº 2 (1995) del *Boletín del OIEA* se describen los antecedentes y la situación inicial del estudio del IASAP.

se calculó que la cantidad total de desechos radiactivos vertidos en los mares árticos haya sido de unos 90 PBq (90 10^{15} Bq) en el momento del vertimiento. Los objetos vertidos incluyeron seis reactores de submarinos nucleares, con combustible gastado; un conjunto de blindaje procedente del reactor de un rompehielos, con combustible gastado; diez reactores nucleares sin combustible; y desechos sólidos y líquidos de actividad baja. Del inventario total estimado, los desechos de actividad alta, que comprendían reactores con y sin combustible gastado, contenían 89 PBq. Los desechos sólidos, incluidos los reactores antes mencionados, se vertieron en el Mar de Kara, fundamentalmente en los fiordos someros de Nueva Zembla, donde la profundidad de los lugares de vertimiento oscila entre 12 y 135 metros, y en la depresión de Nueva Zembla, a profundidades de hasta 380 metros. Se descargaron desechos líquidos de actividad baja en la zona de altamar de los mares de Barents y Kara. Por medio de contratos técnicos asignados a institutos rusos se obtuvo más información sobre las características de los desechos. No obstante, existen importantes lagunas en la información disponible. Por ejemplo, no se han ubicado o identificado de manera inequívoca todos los desechos de actividad alta vertidos que se mencionan en los documentos de la Federación de Rusia. Además, una parte de la información sobre, por ejemplo, la construcción de los reactores de los submarinos vertidos y su tipo de combustible siguió siendo confidencial. Por consiguiente, las conclusiones del estudio del IASAP sólo son válidas en el contexto de la información de conocimiento público en el momento en que concluyó el estudio.

Los resultados del estudio del IASAP se publicarán en el informe titulado *Evaluación de las repercusiones del vertimiento de desechos radiactivos en los mares árticos —Informe del Proyecto internacional de evaluación de los mares árticos (IASAP)*. Además, se publicarán por separado informes con las conclusiones de tres grupos de trabajo diferentes: i) descripción ambiental y radiológica de los mares árticos; ii) evaluación del término fuente; iii) elaboración de modelos y evaluación de dosis. Según lo acordado en la decimoquinta Reunión Consultiva, el Resumen Ejecutivo del estudio se entregó a las Partes Contratantes en el Convenio de Londres de 1972.

Situación radiológica actual

El examen de la situación radiológica actual en los mares árticos consistió en el análisis de la información obtenida durante una serie de cruceros conjuntos noruego-rusos, y otras expediciones internacionales al mar de Kara. Además, varios estudios oceanográficos y radiogeoquímicos, muchos de ellos relacionados con el estudio del IASAP, proporcionaron nueva información sobre las condiciones y procesos físicos, químicos, radioquímicos y biológicos en los mares árticos.* En comparación con algunas otras zonas marinas, la zona de altamar del Kara está relativamente libre de contaminación, y los principales contribuyentes a su contenido antropógeno de radionucleidos son la deposición atmosférica directa y la escorrentía de las cuencas colectoras de precipitaciones radiactivas globales provocadas por los ensayos de armas nucleares, las descargas provenientes de las plantas de reelaboración de Europa occidental, y la precipitación radiactiva debida al accidente de Chernobil.

Las mediciones de los materiales ambientales indican que las dosis individuales anuales de los radionucleidos antropógenos en los mares de Kara y Barents son sólo de entre 1 y 20 microsievert. En dos de los fiordos donde se vertieron desechos de actividad alta y baja se detectaron niveles elevados de radionucleidos en sedimentos situados a pocos metros de los contenedores de desechos de actividad baja, lo que indica que se han producido escapes de los contenedores. Con todo, estos escapes no han provocado un aumento mensurable de radionucleidos en las partes exteriores de los fiordos ni en la zona de altamar del Kara. Por tanto, los desechos vertidos tienen en estos momentos un efecto radiológico insignificante.

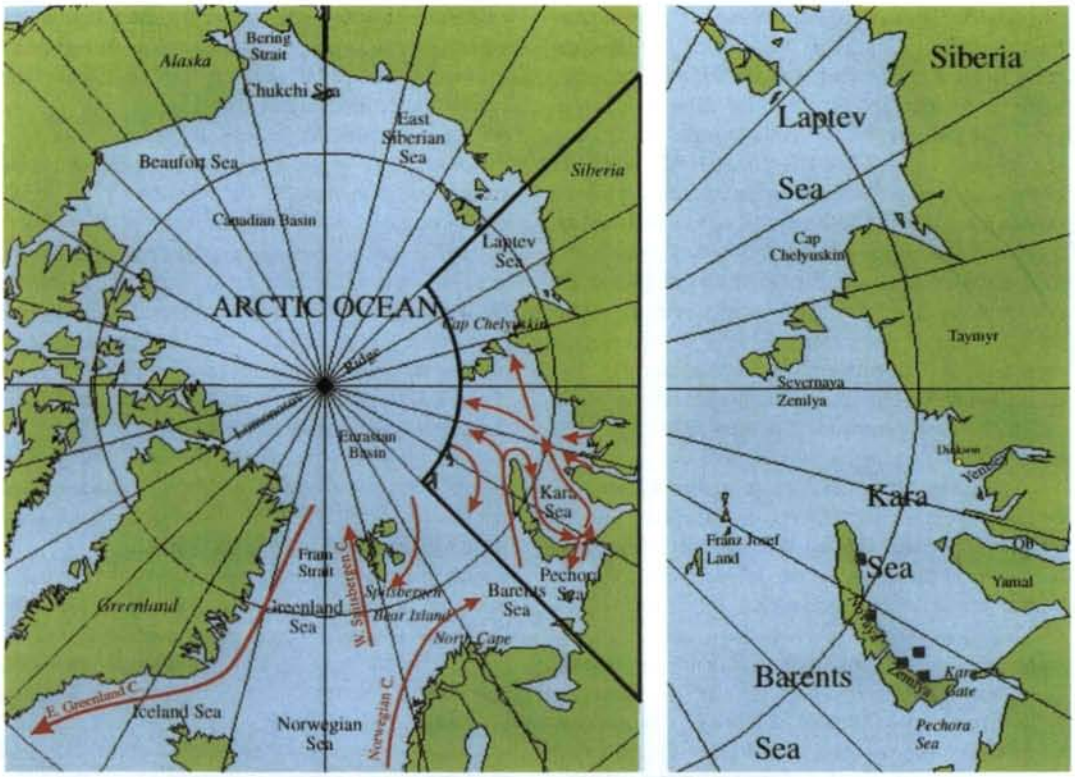
Situación radiológica futura

La evaluación de los riesgos potenciales de posibles liberaciones futuras procedentes de los desechos vertidos se centró en los objetos de desecho de actividad alta que contenían la mayor parte del inventario de desechos radiactivos. Se estimaron las tasas de liberación de estos desechos y se evaluaron las dosis de radiación correspondientes para el hombre y la biota mediante modelos matemáticos para la transferencia de radionucleidos a través del medio ambiente.

Inventarios de fuentes y tasas de liberación. Se examinaron exhaustivamente las características de los reactores vertidos y sus historiales de explotación con miras a brindar escenarios adecuados de tasas de liberación que puedan emplearse como información básica para la elaboración de modelos de vías de transporte y exposición que permitan calcular el nivel de exposición para los seres humanos y la biota. Esta información, basada en los historiales de explotación de los reactores y los espectros de neutrones calculados, proporcionó estimaciones del producto de fisión, el producto de activación y los inventarios de actínidos de los reactores y conjuntos combustibles

* Para mayor información sobre estudios ambientales del Artico, véase el artículo de P. Povinec, I. Osvath, y M. Baxter, publicado en el Vol. 37, Nº 2 (1995) del *Boletín del OIEA*.

El Océano Artico y los mares de Kara y Barents



El mapa de la derecha muestra los lugares de vertimiento de desechos de actividad alta en la costa oriental de Nueva Zembla; el mapa de la izquierda muestra las principales corrientes marinas de importancia para la evaluación radiológica de los mares árticos. ***(IAEA-MEL)***

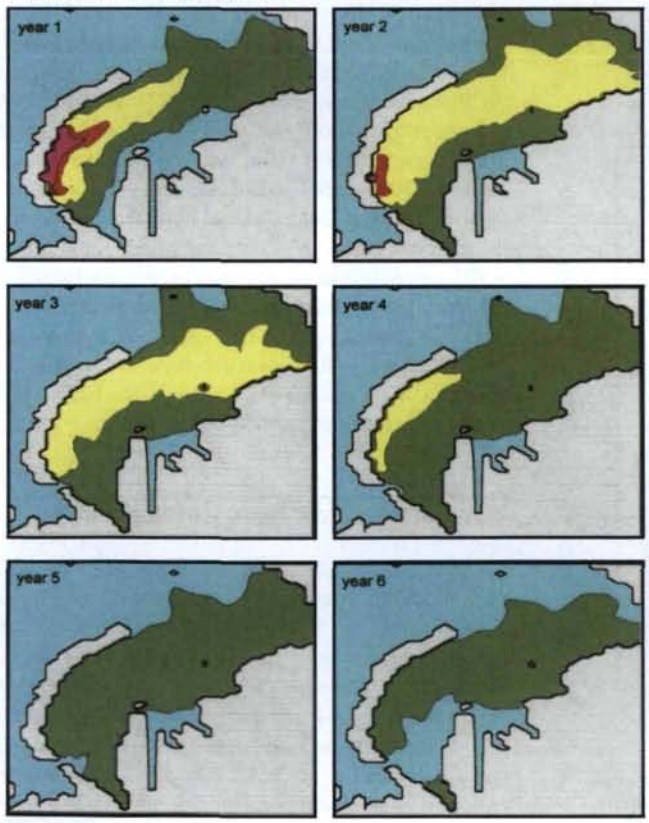


Foto: **Especialistas en ciencias del mar toman muestras de agua de los mares árticos para su análisis.** ***(IAEA-MEL) Gráficos:*** **A la izquierda se muestran los pronósticos de las concentraciones de cesio 137 en el agua de mar durante los primeros seis años después de una liberación instantánea procedente de todos los lugares de vertimiento. Estos tipos de pronósticos se utilizaron para determinar las poblaciones potencialmente expuestas.** ***(Ingo Harms/IAEA-MEL)***

vertidos. Se llegó a la conclusión de que el inventario total de radionucleidos de los objetos de desechos radiactivos de actividad alta en el momento del vertimiento era de 37 PBq. La diferencia entre este valor y la estimación preliminar de 89 PBq que se consigna en el Libro Blanco de Rusia se puede explicar a partir de la información más precisa, proporcionada al IASAP por las autoridades rusas, sobre el historial real de explotación de los reactores. Se calculó que el inventario correspondiente de desechos de actividad alta vertidos era en 1994 de 4,7 PBq, de los cuales el 86% son productos de fisión; el 12%, productos de activación, y el 2%, de actínidos. Los principales radionucleidos en esas categorías eran estroncio 90, cesio 137, níquel 63, y plutonio 241, respectivamente.

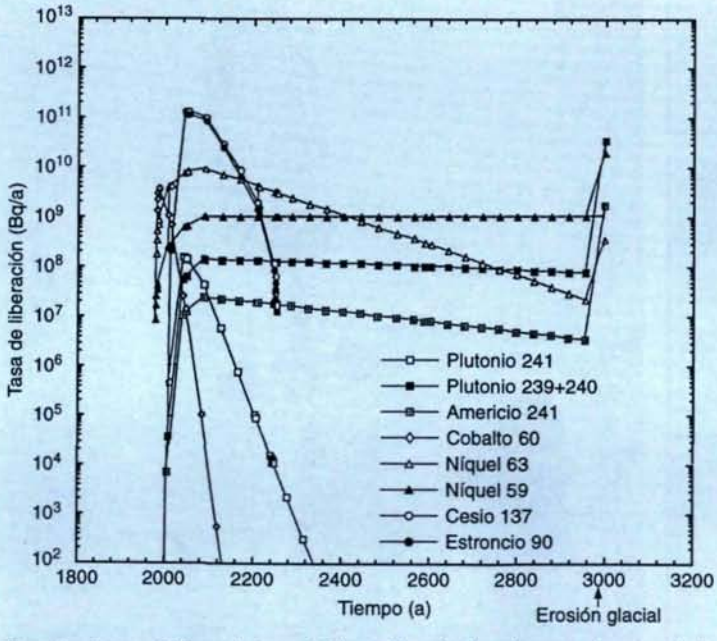
Las tasas de liberación de radionucleidos al medio ambiente dependerán de la integridad de los materiales que forman la estructura del reactor, las barreras añadidas antes del vertimiento, y el propio combustible nuclear. En el caso de cada uno de los objetos de desechos de actividad alta vertidos se investigó pormenorizadamente la construcción y composición de las barreras, se determinaron los puntos débiles y se emplearon las estimaciones óptimas de las tasas de corrosión y vida nominal de las barreras para calcular las tasas de emisión. Sucesos externos, como el choque con buques o, en términos más generales, el enfriamiento global tras la erosión glacial de los fiordos, podrían dañar la contención. Ello provocaría liberaciones más rápidas de radionucleidos al medio ambiente. Para representar correctamente la posible gama de tasas de liberación al medio ambiente, se tomaron en cuenta tres escenarios de liberación:

- un escenario de *estimación óptima* —la liberación se produce por la corrosión gradual de las barreras, los contenedores de desechos y el propio combustible;
- un escenario *pesimista plausible* —corrosión gradual normal seguida de la fractura catastrófica de dos fuentes en un mismo lugar de vertimiento (el contenedor de combustible y el compartimiento del reactor del rompehielos) en el año 2050, seguida de la liberación acelerada del resto del inventario de radionucleidos de esas fuentes; y
- un escenario de *cambio climático* —corrosión hasta el año 3000 seguida de liberación instantánea, debida a la erosión glacial, del inventario de radionucleidos restante en todas las fuentes.

Cabe destacar que no se intentó asignar probabilidades a los sucesos descritos en el escenario pesimista plausible ni en el de cambio climático, y las consecuencias se han evaluado partiendo del supuesto de que tales sucesos ocurrirán en los años señalados.

En el escenario de estimación óptima, la tasa de liberación combinada procedente de todas las fuentes alcanza su punto máximo en alrededor de 3000 GBq/a (GBq=10^9 Bq) dentro de los próximos 100 años, y tiene un segundo punto máximo de alrededor de 2100 GBq/a dentro de unos 300 años. Durante la mayor parte del tiempo restante, las tasas de liberación totales oscilan entre 2 y 20 GBq/a. En el escenario *pesimista plausible* se produce un escape abrupto de 110 000 GBq, seguido de liberaciones de entre 100 y 1000 GBq/a durante los próximos cientos de años debido a la liberación acelerada de radionucleidos del contenedor del combustible y del compartimiento del reactor del rompehielos nuclear. En el escenario de *cambio* climático, que presupone que la erosión glacial ocasiona una liberación instantánea del resto del inventario de todos los desechos en un lapso de 1000 años, se liberan alrededor de 6600 GBq.

Ejemplos de tasas de liberación pronosticadas



Ejemplos de pronósticos de tasas de liberación relacionadas con el escenario de cambio climático aplicado a un solo reactor vertido en la depresión de Nueva Zembla. Se supone que la corrosión provoque la liberación de diferentes radionucleidos hasta el año 3000 cuando, debido a la erosión glacial, se da por sentado que se destruyan por completo todas las barreras y se libere el resto del inventario. ***(Neil Lynn, Royal Naval College, UK/Akira Wada, Universidad Nihon, Japón)***

Elaboración de modelos y evaluación

Las tasas de liberación calculadas se emplearon con modelos matemáticos del comportamiento ambiental de los radionucleidos para estimar las dosis de radiación para la población y la biota. Se adoptaron diferentes enfoques para la elaboración de modelos, y en el ejercicio participaron expertos de diversos países y del OIEA. Se trabajó considerablemente en la síntesis de la información existente sobre ecología marina, oceanografía y sedimentología de la zona seleccionada como base para la elaboración de modelos. Se comprobó la existencia de procesos específicos característicos de la zona y, por consiguiente, de posible importancia para

Dosis individuales anuales totales máximas para grupos de población seleccionados
(Dosis en microsievert)

Escenario	Dosis anuales para los consomidores de alimentos marinos (Grupos 1 y 3)	Dosis anuales para el personal militar (Grupo 2)
Escenario de estimación óptima	< 0,1	700
Escenario pesimista plausible	< 1	4000
Escenario de cambio climático	0,3	3000

Notas:
1 microsievert = 10^{-6} Sv.
Perspectivamente, las dosis anuales para los grupos críticos 1 y 3 procedentes del polonio 210 natural en alimentos marinos son de 500 y 100 microsievert, respectivamente.
La dosis anual media total mundial procedente de la radiación natural de fondo es de 2400 microsievert.

su incorporación en modelos. Dada la necesidad de ofrecer predicciones sobre escalas espaciales y cronológicas muy diversas, se elaboraron diferentes modelos para la dispersión de radionucleidos en y desde el Océano Artico.

Se adoptaron dos enfoques principales de elaboración de modelos: los modelos de compartimiento o de cuadrículas y los modelos de circulación hidrodinámicos. Además, se elaboró y aplicó un modelo híbrido (empleando la estructura de compartimiento, pero a una escala espacial bien definida). Al elaborar el modelo de la dispersión advectiva y difusiva, los modelos de compartimiento proporcionan predicciones de escalas cronológicas largas, promediadas en espacio y de campo lejano, mientras que los modelos hidrodinámicos arrojan resultados de escalas cronológicas cortas, determinadas localmente.

Se prestó especial atención a una de las vías de transporte más deficientemente cuantificadas, a saber, el transporte de hielo marino. Un sencillo cálculo del modelo, o ejercicio de evaluación de la magnitud del problema, demostró que, en el caso de las fuentes de desechos radiactivos aquí analizadas el transporte de hielo marino constituiría sólo un pequeño aporte a la dosis individual en comparación con el transporte de radionucleidos en el agua.

Para estimar las dosis para los individuos se examinaron tres grupos de población. Se efectuaron los cálculos de las dosis individuales para los períodos que abarcan las tasas de dosis individuales máximas para cada uno de los tres escenarios anteriormente determinados. Se definieron tres grupos:

Grupo 1. Un grupo que vive en los estuarios de Obi y Yenisei y en las penínsulas de Taimyr y Yamal, cuya subsistencia depende en gran medida del consumo de pescado, mamíferos marinos, aves marinas y sus huevos, capturados localmente en el Mar de Kara, y que pasa 250 horas por año en la costa. Estos hábitos también son típicos de otras comunidades que dependen de la pesca de subsistencia asentadas en otros países limítrofes con el Artico.

Grupo 2. Un grupo hipotético de personal militar que patrulla las costas de los fiordos que contienen materiales radiactivos vertidos, por períodos supuestos de 100 horas al año. Las vías de exposición consideradas incluyen la radiación externa y la inhalación de rocío de mar y sedimentos en doble suspensión.

Grupo 3. Un grupo de consumidores de alimentos marinos considerado como representativo de la población de la región septentrional de Rusia en la península de Kola, que consume pescado, moluscos y crustáceos capturados en el mar de Barents. No se tomó en consideración el consumo de algas o mamíferos marinos ni la radiación externa.

Dosis individuales anuales totales máximas para grupos de población seleccionados

En los tres escenarios, las dosis individuales anuales máximas de cada grupo crítico de consumidores de alimentos marinos (Grupos 1 y 3) son pequeñas y muy inferiores a las variaciones en las dosis de radiación natural de fondo. *(Véase el cuadro.)* Las dosis para el grupo crítico hipotético del personal militar que patrulla los fiordos (Grupo 2) son más elevadas, pero aun así, son comparables con las dosis de radiación natural de fondo.

Las dosis colectivas se estimaron solamente para el escenario de *estimación óptima* de la tasa de liberación. Se calculó la dosis colectiva para la población mundial debida a la dispersión de radionucleidos en los océanos del mundo (nucleidos distintos del carbono 14 y el yodo 129) para dos períodos: i) hasta el año 2050 para proporcionar información sobre la dosis colectiva para la generación actual; y ii) en los próximos 1000 años, lapso que abarca las liberaciones máximas estimadas.

Ante la incertidumbre cada vez mayor para predecir futuros sucesos, procesos y acontecimientos, se consideró que no tenía sentido prolongar la evaluación más allá de 1000 años. Las dosis colectivas estimadas son de 0,01 Sv·hombre y 1 Sv·hombre, respectivamente, en ambos períodos. Los cálculos ilustran en cierta medida la distribución temporal de la dosis.

Se emplearon modelos de circulación general adecuados para calcular las dosis colectivas del

Principales conclusiones del Proyecto internacional de evaluación de los mares árticos

- **La labor de vigilancia ha demostrado que las liberaciones procedentes de objetos vertidos identificados son pequeñas y se circunscriben a la cercanía inmediata de los lugares de vertimiento.** En general, los niveles de radionucleidos artificiales en los mares de Kara y Barents son bajos y las dosis de radiación asociadas son insignificantes al compararlas con las de fuentes naturales. Las mediciones ambientales indican que las actuales dosis individuales anuales provenientes de todos los radionucleidos artificiales en los mares de Barents y Kara son a lo sumo de 1 a 20 microsievert. Los principales factores contribuyentes son la precipitación radiactiva mundial procedente de los ensayos de armas nucleares, las descargas de las plantas de reelaboración de combustible nuclear en Europa occidental, y la precipitación radiactiva del accidente nuclear de Chernobil.
- **Las dosis futuras proyectadas para los miembros del público en grupos de población locales típicos debidas a los desechos radiactivos vertidos en el mar de Kara son muy pequeñas, o sea, de menos de 1 microsievert.** Las dosis futuras proyectadas para un grupo hipotético de personal militar que patrulle las costas de los fiordos en los que se han vertido desechos son más elevadas, de hasta 4000 microsievert, pero así y todo, del mismo orden que la dosis media de radiación natural de fondo.
- **Las dosis para la fauna marina son insignificantes, de órdenes de magnitud por debajo de los que cabría esperar que tuvieran efectos nocivos sobre la fauna.** Además, estas dosis llegan solamente a una pequeña proporción de las poblaciones de la fauna local.
- **Las medidas correctoras no se justifican por razones radiológicas.** Sin embargo, deben mantenerse los controles sobre la ocupación de playas y el uso de recursos e instalaciones marinos costeros en los fiordos de Nueva Zembla utilizados como lugares de vertimiento. Se especifica esta condición para tener en cuenta las preocupaciones relacionadas con la posibilidad de que inadvertidamente se alteren o recuperen objetos de desechos de actividad alta y la protección radiológica del grupo hipotético de individuos que ocupan las playas adyacentes a los fiordos.

Recomandaciones del Proyecto internacional de evaluación de los mares árticos

- Debería tratarse de localizar e identificar todos los objetos de desechos de actividad alta.
- Debería mantenerse el control institucional sobre el acceso y las actividades en los medios terrestre y marino de los fiordos de Nueva Zembla y sus alrededores en que se han vertido desechos.
- Si en algún momento en el futuro se propusiera el levantamiento del control institucional sobre las zonas de los fiordos y sus alrededores, debería hacerse previamente una evaluación de las dosis para cualesquiera nuevos grupos de individuos que puedan encontrarse potencialmente en situación de riesgo.
- Para detectar cualesquiera cambios en el estado de los desechos de actividad alta vertidos, debería considerarse la posibilidad de ejecutar un programa de vigilancia ambiental limitado en los lugares de vertimiento.

carbono 14 y el yodo 129, que son de período largo y de circulación general en los medios acuático, atmosférico y terrestre. Al suponer que todo el inventario de carbono 14 de los desechos se libere alrededor del año 2000 e integrar la dosis a la población mundial a lo largo de 1000 años (es decir, hasta el año 3000), la dosis colectiva será de unos 8 Sv·hombre. El valor correspondiente para el yodo 129 es muy inferior a 0,0001 Sv·hombre. Así, en los próximos 1000 años, la dosis colectiva total para la población mundial procedente de todos los radionucleidos de los desechos radiactivos vertidos es del orden de 10 Sv.hombre. En cambio, en otros estudios se estima que la dosis colectiva anual para la población mundial procedente del polonio 210 natural marino es superior en alrededor de tres órdenes de magnitud. También resulta ilustrativo comparar la dosis colectiva asociada a los desechos vertidos en el mar de Kara con la dosis colectiva estimada para los desechos radiactivos de actividad baja vertidos en el Atlántico nororiental. La dosis colectiva para la población mundial es de 1 Sv·hombre durante 50 años y de 3000 Sv·hombre durante 1000 años a partir de esta última práctica.

Se calcularon las tasas de dosis de radiación para diversas poblaciones de organismos silvestres, desde zooplancton hasta ballenas, y se observó que resultaron muy bajas. Las tasas de dosis máximas pronosticadas en esta evaluación son de alrededor de 0,1 miligray por hora, tasa de dosis que se considera improbable que entrañe efecto nocivo alguno en la morbilidad, la mortalidad, la fecundidad, la fertilidad, y la tasa de mutación que pueda influir en el mantenimiento de poblaciones saludables. También cabe apuntar que las liberaciones pudieran afectar sólo una pequeña parte de la población de biota en los ecosistemas locales.

Opciones correctoras

Viabilidad y costos. Se efectuó un estudio preliminar de viabilidad técnica y costos en relación con cinco opciones correctoras para el contenedor

de combustible gastado del rompehielos nuclear. Se escogió esta fuente porque contiene la mayor existencia de radionucleidos entre los objetos de desechos vertidos y es la mejor documentada con respecto a la construcción y las barreras de contenedores introducidas.

Las cinco opciones específicas que se seleccionaron inicialmente para su evaluación eran las siguientes:

Opción 1. Inyección de material para reducir la corrosión y proporcionar una barrera adicional a la liberación.

Opción 2. Recubrimiento impermeable en el lugar con hormigón u otro material idóneo a fin de encapsular el objeto.

Opción 3. Recuperación hacia un entorno terrestre.

Opción 4. Evacuación en una caverna subacuática en la costa de Nueva Zembla.

Opción 5. Recuperación y transporte subacuático hacia un lugar de gran profundidad oceánica.

Tras examinar estas opciones, expertos en salvamento descartaron las opciones 1, 4 y 5. Se eliminó la opción 1 porque el bulto de combustible gastado había sido llenado previamente con un polímero especial, Furfurol (R), que podría dificultar la inyección de material adicional. La opción 4 no se siguió examinando porque la creación de una caverna subacuática sería una propuesta demasiado cara para una sola fuente recuperada y habría que justificarla en un contexto más amplio. Se descartó la opción 5 porque, por una parte, no es seguro que conforme al Convenio de Londres de 1972 se pueda obtener un permiso especial para una operación que requiera un segundo vertimiento de un objeto de desecho de actividad alta en el océano y, por la otra, el transporte subacuático en alta mar entrañaría el riesgo innecesario de perder el bulto durante su traslado hacia un nuevo lugar de evacuación.

Por tanto, la evaluación ulterior de las medidas correctoras se limitó a las dos opciones restantes, es decir, el recubrimiento impermeable en el lugar, y la recuperación para su tratamiento o evacuación en tierra. Se estimó que ambas opciones eran técnicamente viables. Se calculó que el costo de las operaciones marinas oscilaría entre 6 millones y 10 millones de dólares de los EE.UU. En la opción de recuperación, debe tenerse en cuenta que habría que incurrir en importantes gastos adicionales, además de los aquí analizados, por concepto de ransporte, tratamiento, almacenamiento y/o evacuación ulteriores en tierra. Se consideró la exposición a las radiaciones del personal participante en las medidas correctoras, así como la probabilidad de un accidente de criticidad. Se llegó a la conclusión de que, con las debidas precauciones y los estudios técnicos propuestos como base para la aplicación de medidas correctoras, los riesgos radiológicos para el personal participante en las medidas correctoras no serían significativos.

Consideraciones en torno a la protección radiológica para justificar las medidas correctoras. Los conceptos básicos de protección radiológica pertinentes a este proyecto son los recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR) e incorporados en las *Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación* (NBS) del OIEA y otras organizaciones internacionales. En estos documentos se establecen dos clases de situación en que los seres humanos pueden verse expuestos a las radiaciones: aquellas en que las medidas de protección se pueden prever con perspectiva, antes de que se introduzcan las fuentes de exposición; y otras en que las fuentes de exposición ya están presentes y hay que considerar las medidas de protección de manera retrospectiva. Se les define, respectivamente, como prácticas e intervenciones.

La situación examinada en el estudio del IASAP corresponde a la categoría de intervenciones. En este caso, la intervención podría aplicarse en principio a la fuente o, después de una liberación de radionucleidos, a las vías de exposición ambiental mediante las cuales podrían quedar expuestos los seres humanos. La intervención en la fuente podría incluir, por ejemplo, barreras protectoras adicionales para los objetos de desecho a fin de impedir la liberación de radionucleidos. La intervención aplicada a las vías de exposición ambiental pudiera consistir en la restricción del consumo de alimentos contaminados y/o el acceso limitado a zonas contaminadas. En cualquiera de los casos, se requiere que las medidas correctoras se justifiquen sobre la base de que la intervención sea más beneficiosa que nociva, es decir, que las ventajas de intervenir, incluida la reducción del detrimento radiológico, tengan más peso que las desventajas correspondientes, con inclusión de los costos y el detrimento para los que participan en las medidas correctoras. Además, debería optimizarse la forma y la escala de cualquier intervención a fin de producir los máximos beneficios netos.

Es preciso analizar algunos factores antes de adoptar una decisión sobre la necesidad de medidas correctoras. Desde la perspectiva de la protección radiológica, los aspectos más importantes son:

- Las dosis y los riesgos para los individuos más expuestos (el grupo crítico) si no se toman medidas y el grado en que su situación puede mejorar tomando medidas; y
- El efecto total para la salud de las poblaciones expuestas y hasta qué punto puede evitarse tomando medidas correctoras. El efecto total para la salud es proporcional a la dosis colectiva, es decir, la suma de dosis individuales en una población expuesta.

Los desechos radiactivos de actividad alta vertidos en el mar de Kara y en los fiordos adyacentes se encuentran en bultos independientes que se espera que tengan fugas en algún momento en el futuro. Por tanto, constituyen una situación de exposición crónica potencial en que la preocupación tiene que ver con incrementos futuros de la dosis

para los individuos expuestos como resultado de las liberaciones de radionucleidos procedentes de los desechos vertidos. Según el estado físico de esas fuentes, la intervención (aplicación de medidas correctoras) en la fuente es el proceder más viable y no la intervención en algún momento posterior en las vías de exposición ambiental. Es imprescindible que la intervención esté justificada y que se efectúe óptimamente.

En la actualidad no existen criterios internacionalmente convenidos que permitan invocar un requisito para la adopción de medidas correctoras en situaciones de exposición crónica, salvo en el caso de exposición del público al radón, gas radiactivo natural, en que las orientaciones internacionales recomiendan un nivel de acción a una dosis anual marginal que oscile entre 3 y 10 milisievert (3000 a 10 000 microsievert). La CIPR y el OIEA están elaborando orientaciones relacionadas con las aplicaciones a otros tipos de situación de intervención.

Según las predicciones, las fuentes de desechos radiactivos en los mares de Barents y Kara provocarán dosis anuales futuras de menos de 1 microsievert para los individuos de los grupos poblacionales que limitan con los mares de Kara y Barents. Se calcula que el riesgo de inducción de cáncer letal por una dosis de 1 microsievert sea de unos 5 10^{-8}, o sea, un riesgo insignificante. Por tanto, los miembros de las poblaciones locales no estarán expuestos a riesgos significativos debidos a los desechos vertidos. Las dosis futuras pronosticadas para los miembros del grupo hipotético del personal militar que patrulla las costas de los fiordos de Nueva Zembla son mayores que las pronosticadas para otros miembros del público y son comparables con las dosis procedentes de la radiación natural de fondo. (La dosis de radiación media anual debida a la radiación natural de fondo, incluida la exposición al radón es de 2400 microsievert.) Teniendo en cuenta que de ser necesario podría controlarse las dosis para este grupo hipotético, ninguna de las dosis individuales calculadas indica necesidad alguna de aplicar medidas correctoras.

Aunque los riesgos para cada individuo pueden ser insignificantes, cuando se suman a nivel de una población se puede predecir que surgirán algunos efectos para la salud como resultado de la exposición adicional. Se considera que esos efectos para la salud son proporcionales a la dosis colectiva debida a los desechos radiactivos vertidos. La dosis colectiva para la población mundial durante los próximos 1000 años procedente de los desechos vertidos en los mares de Barents y Kara es del orden de 10 Sv·hombre. Si bien esta dosis colectiva calculada es pequeña, puede considerarse más a fondo antes de adoptar una decisión acerca de la necesidad de aplicar medidas correctoras. Un enfoque simplificado para evaluar la magnitud del problema de la dosis colectiva en un marco decisorio es asignar un valor monetario al detrimento de la salud que se evitaría si se aplicasen medidas correctoras. Si este enfoque indica que se podrían justificar las medidas correctoras, entonces también se justificaría un análisis más detallado en el que se examinen de manera más detenida los componentes de la dosis colectiva. Con la utilización de este enfoque se puede demostrar que las medidas correctoras aplicadas a la mayor de las fuentes (el bulto de combustible gastado del rompehielos nuclear) a un costo superior a los 200 000 dólares de los EE.UU. no parecerían reportar suficientes beneficios como para justificarlas. Puesto que costaría varios millones de dólares aplicar cualquiera de las medidas correctoras propuestas, es evidente que, sobre la base del estudio de la dosis colectiva, la medida correctora no está justificada.

En términos generales, desde el punto de vista de la protección radiológica, incluido el análisis de las dosis para la biota, no se justifica la medida correctora con respecto al material de desecho radiactivo vertido. Sin embargo, para la posible alteración o recuperación accidental de los objetos vertidos, y debido a que no son insignificantes las dosis potenciales para el grupo hipotético del personal militar que patrulla los fiordos de Nueva Zembla utilizados como lugares de vertimiento, esta conclusión depende de que se mantenga alguna forma de control institucional sobre el acceso y las actividades en las cercanías de dichos fiordos.

Por último, se señala que el análisis del estudio del IASAP se limitó a los aspectos radiológicos de la adopción de decisiones respecto de la necesidad de aplicar medidas correctoras. No se toman en cuenta las consideraciones políticas, económicas y sociales que deben formar parte importante del proceso de adopción de decisiones y que en gran medida son cuestiones que incumben a los gobiernos nacionales que tienen jurisdicción y responsabilidad en relación con los desechos radiactivos vertidos.