

ESTUDIOS SOBRE LA RADIOACTIVIDAD MARINA A ESCALA MUNDIAL EVALUACION DE LA SITUACION

POR PAVEL P. POVINEC Y ORIHIKO TOGAWA

En el medio ambiente marino existe una cantidad cada vez mayor de fuentes de radiactividad como resultado de las actividades humanas. Se sabe que entre ellas están la precipitación nuclear global debida a los ensayos de armas en la atmósfera, el accidente de Chernobil, las descargas de radionucleidos de instalaciones nucleares, el vertimiento de desechos radiactivos en el pasado, los accidentes de submarinos nucleares, la contribución de los polígonos de ensayos nucleares, la pérdida de fuentes radiactivas y el quemado de satélites que utilizan radisótopos como fuente energética.

En general, el medio ambiente marino mundial contiene radionucleidos que difieren de una región a otra. Las diferencias se deben a los dinámicos procesos del medio ambiente marino y a la fuente específica de radionucleidos de una región. Por tanto, en las evaluaciones científicas de la radiactividad marina es preciso conocer el término fuente y los procesos oceánicos.

Actualmente, la radiactividad se deposita de forma irregular sobre los océanos del mundo. Se conoce que la precipitación global se debe fundamentalmente a los ensayos de armas nucleares realizados en el decenio de 1960. Por otra parte, las descargas de las plantas de procesamiento del combustible nuclear o el pasado vertimiento de desechos radiactivos

líquidos y sólidos se limitan, generalmente, a zonas más localizadas. No obstante, las corrientes oceánicas dominantes han transportado los radionucleidos solubles a grandes distancias.

Para calcular la aportación de radionucleidos procedentes de fuentes locales, los científicos deben comprender mejor la distribución de los radionucleidos en todos los océanos y mares del mundo. Esta comprensión es esencial para analizar los resultados obtenidos en las investigaciones científicas realizadas en las zonas localizadas, como los antiguos lugares de vertimiento, que pueden, por tanto, examinarse de manera más minuciosa.

Con el objetivo de coadyuvar a lograr una comprensión más amplia del medio marino, el Laboratorio del OIEA para el Medio Ambiente Marino (MEL) inició, en 1996, un proyecto de cinco años titulado "Investigación sobre la radiactividad marina a escala mundial (MARS)", el cual recibe el apoyo del Organismo de Ciencia y Tecnología (STA) del Japón. En el presente artículo se examina brevemente este proyecto y se relacionan las actividades de investigaciones conexas y las investigaciones científicas del MEL y sus asociados internacionales.

INICIATIVAS DE INVESTIGACION

El MARS se propone ofrecer nuevos datos sobre la radiactividad

que actualmente existe en el mar abierto y lograr una mejor comprensión de la actual distribución de radionucleidos. De esta forma, los conjuntos de datos obtenidos mediante los estudios de la radiactividad nacional e internacional pueden examinarse en términos comparativos. El proyecto aporta conocimientos científicos sobre los procesos que influyen en la distribución de radionucleidos y las fuentes que han introducido radiactividad en el mar abierto.

La reunión de expertos celebrada en 1996, en Mónaco, ha servido de guía al proyecto. En dicha reunión, los expertos recomendaron realizar estudios en el norte del Océano Pacífico y en el Océano Atlántico, así como tomar muestras complementarias en el Océano Indico. Además, propusieron que debería asignarse máxima prioridad al trabajo en el norte del Océano Pacífico ya que no se contaba con nuevos datos, y recomendaron que deberían hacerse esfuerzos para localizar las estaciones de muestreo en los lugares donde existieran datos históricos integrales y de buena calidad. Entre ellos se incluyen, por ejemplo, los lugares utilizados en el programa GEOSECS (Estudio geológico de secciones oceánicas

El Sr. Povinec es jefe del Laboratorio de Radiometría y el Sr. Togawa es especialista del Laboratorio, dependencia del Laboratorio del OIEA para el Medio Ambiente Marino

cas) de mediados de los años setenta, o lugares donde una serie de mediciones pudiera ofrecer vínculos que sirvan para extrapolar los resultados a los estudios oceánicos contemporáneos.

Los objetivos específicos del proyecto son:

- examinar la distribución actual de los principales radionucleidos (tritio, carbono 14, estroncio 90, cesio 137, e isótopos de plutonio) en las aguas, los sedimentos y la biota de los océanos del mundo;

- extrapolar los resultados de los estudios oceánicos contemporáneos, como el componente trazador del WOCE (Programa hidrográfico para el experimento mundial sobre la circulación oceánica), en los cuales se dispone de amplios conjuntos de datos sobre el tritio, que pudieran utilizarse en los pronósticos de las concentraciones de estroncio 90 y cesio 137 en las mismas regiones;

- estudiar la evolución de las concentraciones acumulativas de radionucleidos en el agua, utilizando datos históricos de buena calidad y los nuevos conjuntos de datos recientemente recopilados;

- identificar las principales fuentes de radionucleidos antropógenos en los océanos del mundo;

- incluir en la Base de datos mundial de radiactividad marina toda la información disponible sobre la distribución de radionucleidos en las aguas, los sedimentos y la biota, de modo que puedan investigarse las variaciones temporales y espaciales de los principales radionucleidos.

Programa coordinado de investigaciones (PCI). En 1998, se inició un PCI relacionado con los "Estudios sobre la radiactividad marina a escala mundial", con el objetivo de apoyar las actividades de investigación del proyecto. Entre

los participantes figuran expertos de Alemania, Dinamarca, los Estados Unidos, la India, Italia, el Japón y la República de Corea. Su trabajo contribuirá a comprender la actual distribución de radionucleidos en la columna de agua y los sedimentos en el mar abierto, y a pronosticar su repercusión radiológica. El PCI, que cuenta con el apoyo extrapresupuestario de Japón, fomentará y apoyará los estudios sobre radiactividad marina en los Estados Miembros mediante la asistencia metodológica y el control de la calidad analítica. Todos los datos obtenidos por conducto del PCI sobre las concentraciones de radionucleidos en las aguas, los sedimentos y la biota se pondrán a disposición de los Estados Miembros del OIEA en formato electrónico, en CD-ROM y en Internet.

EXPEDICIONES CIENTÍFICAS

Además, el proyecto MARS está respaldado por diversas expediciones científicas a mar abierto.

IAEA'97 Pacific Ocean Expedition. Esta expedición fue llevada a cabo por el MEL en cooperación con nueve organizaciones de cinco Estados Miembros del OIEA.* (Véase el recuadro.) Esta fue la primera vez que el Organismo organizó y efectuó totalmente una expedición oceanográfica a mar abierto.

Del 21 de octubre al 20 de noviembre de 1997, se llevó a cabo la expedición al noroeste del Océano Pacífico. Su objetivo principal fue tomar muestras de agua, a diferentes profundidades, de los núcleos de sedimentos y de la biota, así como realizar mediciones oceanográficas (salinidad, temperatura, etc.). Los análisis de las muestras tomadas y las mediciones oceanográficas realizadas durante el crucero permitirán investigar la distribución de radio-

nucleidos antropógenos y naturales en el medio ambiente marino. Además, este trabajo ayudará a estudiar las señales isotópicas que pueden haber sido introducidas por el efecto de la corriente de "El Niño". Por otra parte, en las investigaciones se examinarán los posibles efectos latitudinales en la distribución de radionucleidos naturales en el agua de mar, el plancton y los peces.

La expedición se realizó en el buque de investigación *Bosei Maru*, de la Universidad de Tokai. El crucero siguió una ruta triangular, desde Shimizu (Japón) con rumbo este hasta Milwaukee Sea-Mountain, después en dirección hacia el sur hasta las Islas Marshall, deteniéndose en Ponape (los Estados Federados de Micronesia,) desde donde zarpó de regreso hacia Shimizu. Las muestras se tomaron en 20 estaciones, incluidas cuatro del GEOSECS y en siete estaciones cercanas a los atolones de Bikini y Enewetak.

Las muestras de agua de mar se tomaron a diversas profundidades y en diferentes estaciones utilizando muestreadores para grandes volúmenes de agua, bombas sumergibles y un sistema de CTD (conductividad, temperatura y profundidad) con muestreadores de multibotellas de roseta (CTD/RMS). Las muestras del sedimento y de la biota se tomaron con un muestreador de caja, varas y redes de pesca, respectivamente. Asimismo, durante la expedición se efectuaron mediciones de CTD y de química general. En total, se tomaron cinco grupos de muestras de agua de gran volumen, doce grupos de muestras de pequeño volumen de agua, quince testigos de muestras de sedimentos, cuarenta y cinco muestras de peces de tres especies diferentes y muestras de plancton.



A la derecha, las muestras de agua de mar son tomadas desde el buque japonés Bosei Maru durante la IAEA'97 Pacific Ocean Expedition. En esa actividad participaron especialistas de cinco países y nueve organizaciones: el Organismo Federal Marítimo e Hidrográfico de Alemania; el Instituto de Investigación y Desarrollo Oceánico y República de Corea; el Laboratorio de Investigación Física, India; la Universidad de Linköping, Suecia y cinco organizaciones japonesas: el Instituto Japonés de Investigaciones sobre la Energía Atómica del Japón -Centro Mutsu; el Centro de Análisis Químico del Japón; la Fundación de Ciencias Marinas del Japón- el Laboratorio Marino Mutsu; el Instituto de Investigaciones Meteorológicas y la Universidad de Tokai. En la expedición participaron un total de 22 personas, incluidos seis funcionarios del OIEA procedentes del MEL. Algunos de los participantes aparecen en la foto superior junto con los miembros de la tripulación. (Cortesía: MEL)



A bordo se efectuaron las pre-concentraciones químicas en cuanto a diversos radionucleidos seleccionados (estroncio 90, cesio 137, plutonio 239, 240 y americio 241), a fin de reducir el volumen de las muestras de gran volumen de agua en un fac-

tor de casi veinte. Esto permitió el traslado por flete de superficie desde Shimizu hasta Mónaco y hacia los laboratorios de los Estados Miembros participantes para su posterior análisis.

Las concentraciones de tritio, carbono 14, tecnecio 99, y

yodo 129 y plutonio (ICP-MS) se determinarán en las muestras de agua de mar tomadas con el sistema CTD/RMS. Por otra parte, en el caso de las muestras del sedimento y la biota, no sólo se harán las mediciones de los radionucleidos

antropógenos, sino también la de los radionucleidos naturales (polonio 210, radio 226, torio 230, uranio 234 y uranio 238).

Los resultados preliminares obtenidos mediante CTD y las mediciones de química general fueron presentados en un informe del crucero, que el MEL publicó poco después de concluida la expedición. El análisis completo de las muestras tomadas, está a cargo de especialistas del MEL, las organizaciones participantes y otros laboratorios de los Estados Miembros del OIEA (Alemania, Canadá, Estados Unidos, India, Japón y Nueva Zelanda). Está previsto que los resultados finales de todo el trabajo analítico se publiquen en 1999.

Expediciones conjuntas del Japón, Corea y Rusia. En el marco de un acuerdo concertado entre los gobiernos del Japón, la República de Corea y la Federación de Rusia, el MEL fue invitado a participar en las expediciones conjuntas a antiguos lugares de vertimiento de desechos radiactivos en el noroeste del Océano Pacífico y en sus mares adyacentes. El objetivo era investigar la contaminación radiológica del medio ambiente marino debida a los desechos radiactivos vertidos en el pasado por la antigua URSS, la Federación de Rusia, la República de Corea y el Japón.

La expedición se realizó a bordo del buque de investigaciones ruso *Okean* en dos etapas: en la primera, del 22 de marzo al 11 de abril de 1994, se visitaron los lugares de vertimiento en el Mar del Japón/Mar del Oriente, y en la segunda, del 15 de agosto al 15 de septiembre de 1995, los lugares de vertimiento ubicados en el Mar de Okhotsk, en el noroeste del Océano Pacífico y el Mar del Japón/Mar del Oriente.

Se tomaron muestras de agua de mar superficial y del fondo, así como del sedimento del lecho marino en catorce estaciones ubicadas en las zonas donde se habían vertido desechos radiactivos de más de 700 TBq, y en otras seis estaciones fuera de estos lugares. A diferentes profundidades, también se tomaron muestras del agua intermedia en dos lugares donde se habían vertido cantidades mayores de desechos radiactivos. Además, se tomaron muestras en dos estaciones en un lugar cercano a la Isla Sajalín, en el Mar de Okhotsk, donde accidentalmente se perdió una fuente de estroncio 90 de 13 PBq.

Los especialistas del MEL realizaron mediciones de tritio, carbono 14, estroncio 90, yodo 129, cesio 137, plutonio 238, plutonio 239, 240 y americio 241 en las muestras tomadas. Los resultados indicaron que las concentraciones de tritio, estroncio 90, cesio 137, plutonio 238 y plutonio 239, 240 contenidas en el agua de mar y el sedimento de los lugares de vertimiento fueron bajas y no difirieron significativamente de las encontradas en los lugares de origen correspondientes. Asimismo, los niveles eran bastante similares a los que suelen hallarse en el noroeste del Océano Pacífico y sus mares adyacentes.

Las existencias de estroncio 90, cesio 127 y plutonio 239, 240, que se estimaron a partir de perfiles verticales en el agua de mar y el sedimento, mostraron un excedente en comparación con las densidades de deposición acumulativa de la precipitación global. Sin embargo, las existencias estimadas se correspondieron con las observaciones anteriores realizadas en estas regiones. Los resultados de las existencias de radionucleidos y las razones de la actividad isotópi-

ca sustentaron la conclusión de que en las zonas de muestreo predomina la precipitación global.

Expediciones al Océano Indico.

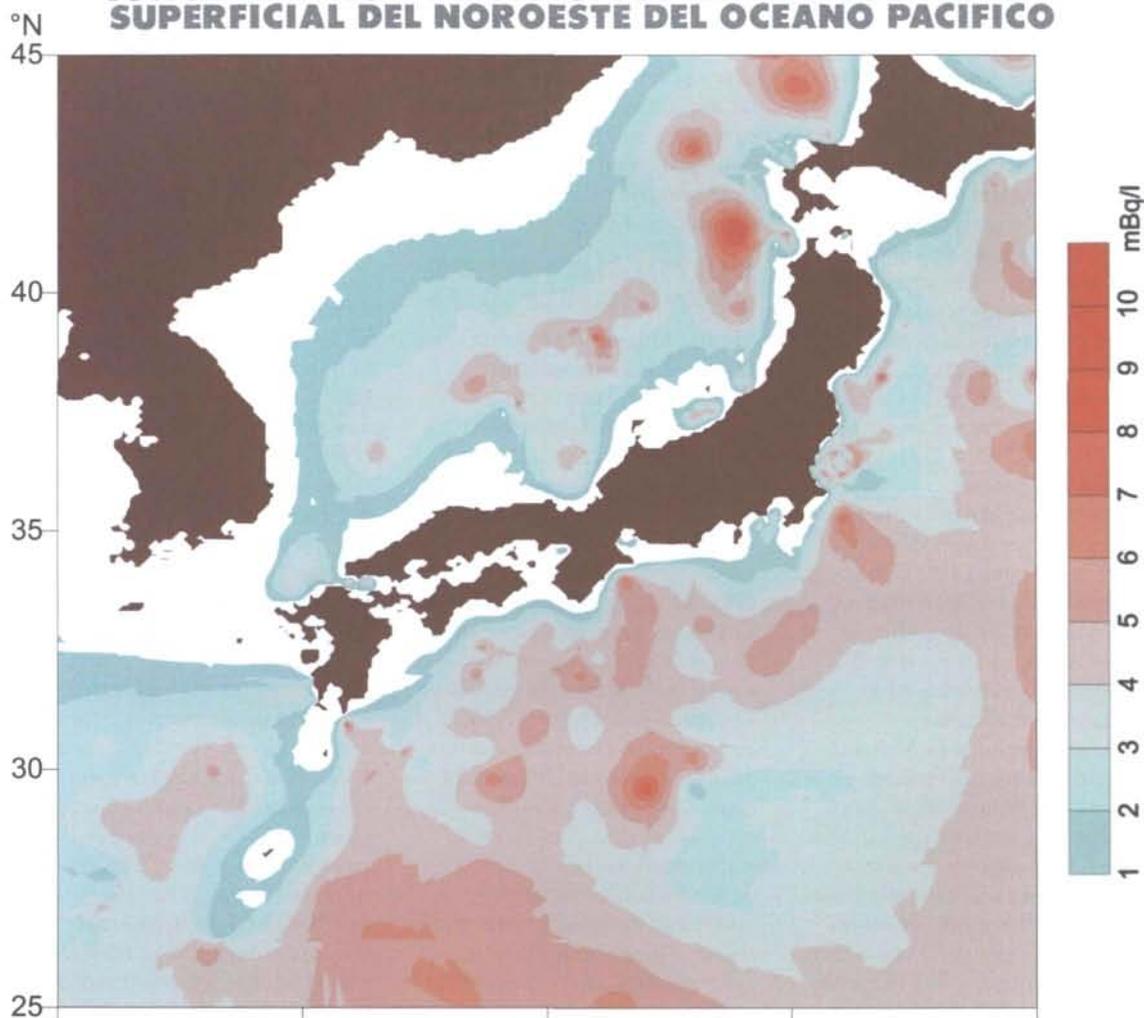
Los especialistas del MEL participaron en dos expediciones científicas al Océano Indico.

La primera expedición se llevó a cabo en coordinación con el Organismo Nacional de Nueva Tecnología, Energía y Medio Ambiente (ENEA), Centro de Investigaciones del Medio Ambiente Marino, La Spezia, Italia. El objetivo era estudiar la distribución de los radionucleidos antropógenos en el agua de mar superficial del Océano Indico. La expedición se efectuó del 8 de marzo al 9 de abril de 1998, a bordo del buque de investigación italiano *Italica* durante su viaje de regreso a Italia desde la Antártida.

Se tomó agua de mar en 41 estaciones de muestreo, cada cinco grados de longitud aproximadamente. El corte se extendió desde Lyttelton en la zona sudoriental de Nueva Zelanda hasta Ravenna en Italia, cruzando el Estrecho de Cook, el Mar de Tasman, el estrecho de Bass, la Gran Bahía Australiana, el Océano Indico, el Golfo de Adén, el Mar Rojo, el Canal de Suez y el Mar Mediterráneo. La muestra de agua de mar se tomó a una profundidad media de cuatro metros utilizando el sistema de bombeo instalado en el buque. En las preconcentraciones químicas realizadas a bordo en relación con los diversos radionucleidos seleccionados (estroncio 90, cesio 137, plutonio 239, 240 y americio 241), se empleó el mismo método que en la IAEA'97 Pacific Ocean Expedition.

Otras muestras de pequeño volumen de agua de mar que se procesarían posteriormente en el MEL fueron examinadas para detectar tritio y yodo 129 y con fines de registro. El MEL y la ENEA realizarán

CONCENTRACION DE CESIO 137 EN EL AGUA DE MAR SUPERFICIAL DEL NOROESTE DEL OCEANO PACIFICO



análisis de estas muestras, y en 1999, los resultados estarán disponibles.

Por invitación del Departamento de Océano y Desarrollo (DOD) de la India se efectuó la segunda expedición al Océano Indico. El Laboratorio de Investigaciones Físicas (PRL) radicado en Ahmedabad, organizó la expedición que tuvo lugar del 19 de marzo al 20 de abril de 1998, a bordo del buque de investigación del DOD *Sagar Sampada*. El objetivo principal era determinar las concentraciones y la distribución (horizontal y vertical) de los radionucleidos antropógenos en el agua y los sedimentos.

La toma de muestras se efectuó en seis estaciones, incluidas

cinco del GEOSECS. En cada estación, se tomaron muestras de agua de mar en seis capas diferentes utilizando el sistema de CTD/RMS. A bordo del buque, se concentraron previamente varios radionucleidos seleccionados (estroncio 90, cesio 137, plutonio 239, 240 y americio 241). Se tomaron otras muestras de agua de mar con el objetivo de determinar, en el MEL, el tritio, el tecnecio 99, el yodo 129 y el plutonio (ICP-MS), así como con fines de registro. También se recogieron testigos de sedimento y muestras de plancton en varias estaciones.

En el MEL y el PRL se realizará el análisis de todas las

muestras tomadas y en 1999, se podrá tener acceso a los resultados. Para 1998 y 1999 se han programado otras expediciones de toma de muestras al Océano Atlántico y al sur del Océano Indico.

BASE DE DATOS DE RADIATIVIDAD MARINA

En el marco del proyecto de investigaciones, el MEL ha creado

Mapa: Los especialistas en ciencias del mar del OIEA del MEL en Mónaco han participado en expediciones científicas que proporcionaron valiosa información sobre los niveles de radiactividad en los océanos del mundo. (Cortesía: MEL)

la GLOMARD (Base de datos mundial de radiactividad marina) a fin de proporcionar a los Estados Miembros datos sobre las concentraciones de radionucleidos en el medio ambiente marino. Esta información los ayudará en las evaluaciones radiológicas relacionadas con el vertimiento de desechos radiactivos y los ensayos nucleares, así como en la respuesta de emergencia a los accidentes radiológicos en el mar. Está previsto que en el futuro cercano se pueda tener acceso a la GLOMARD en el espacio del OIEA en Internet.

La base de datos contiene unos 40 megabytes de datos, que representan 100 000 mediciones de la radiactividad en las muestras de agua de mar, sedimento, biota y materia suspendida tomadas en los océanos del mundo.

Asimismo, contiene información sobre las fuentes de los datos; los laboratorios que realizan el análisis de radionucleidos; el tipo de muestra (agua de mar, sedimento, biota) y detalles conexos (como volumen y peso); el tratamiento de la muestra, los métodos analíticos y los instrumentos de medición; y los resultados analizados (como las concentraciones de radionucleidos, las incertidumbres, la temperatura, la salinidad, etc.)

La versión actual de la GLOMARD permite la aportación, el mantenimiento y la extracción de datos para elaborar diversos tipos de mapas utilizando programas de computadora externos. Los datos extraídos se procesan con estos programas para trazar mapas con curvas de nivel que representan la distribución de radionucleidos en las zonas estudiadas.

La nueva versión de la GLOMARD estará conectada al Sistema de Información Geográfica. Esto permitirá

elaborar mapas bidimensionales y tridimensionales más precisos, en los que se establecerá una correlación entre los datos de radiactividad y los de batimetría, temperatura o salinidad. También será posible elaborar mapas de contaminación de serie cronológica.

DISTRIBUCION DE RADIONUCLEIDOS

Mediante la aplicación de estas capacidades cartográficas, se investigaron las distribuciones de los radionucleidos en el agua de mar superficial y en sedimento de la capa superior en el noroeste del Océano Pacífico, utilizando los grupos de datos contenidos en la GLOMARD. (Véase el mapa.) Los datos proceden de instituciones japonesas, principalmente del Centro de Análisis Químico del Japón (JCAC). Se realizó la evaluación de los perfiles verticales de las concentraciones de radionucleidos, las existencias de radionucleidos y su razón isotópica de actividad, tanto en las columnas de agua de mar como en los testigos de sedimento.

En general, las concentraciones de estroncio 90, cesio 137 y plutonio 239, 240 en las muestras marinas que se tomaron cerca del Japón son muy bajas y muestran una tendencia a disminuir cada año. Los perfiles de estroncio 90 y cesio 137 en las columnas de agua de mar indican una disminución gradual en la concentración con el aumento de la profundidad, lo que contrasta con las del plutonio 239, 240. Los perfiles de plutonio presentan un nivel máximo en la subsuperficie a una profundidad de unos 700 metros, lo que refleja procesos específicos de depuración natural de contaminantes en la columna de agua.

Las concentraciones de radionucleidos en los testigos de sedimento tienden a dismi-

nuir con el aumento de la profundidad. Se calcularon las existencias de estroncio 90, cesio 137 y plutonio 239, 240 en el agua de mar y el sedimento en relación con diversos períodos desde comienzos de los años ochenta hasta el presente. La razón isotópica de actividad en los testigos de sedimento resulta bastante diferente de la observada en las columnas de agua de mar, lo que refleja la diferencia en la eliminación de radionucleidos desde el agua de mar hasta el sedimento del fondo.

Las existencias de estroncio 90, cesio 137 y plutonio 239, 240 en la columna de agua en el lugar de vertimiento del Mar del Japón/Mar del Oriente son de 3,0, 5,8 y 0,10 kBq/m², respectivamente. En comparación, estos inventarios en la columna de agua en el noroeste del Océano Pacífico son de 1,0, 2,0 y 0,11 kBq/m², respectivamente. Como puede observarse, los inventarios de estroncio 90 y cesio 137 en el agua del lugar de vertimiento del Mar del Japón/Mar del Oriente son significativamente más altos que los observados en el noroeste del Océano Pacífico.

Las existencias totales de estroncio 90 y cesio 137 en el agua y los sedimentos concuerdan perfectamente con las densidades previstas de la deposición de la precipitación global. Por otra parte, las existencias del plutonio 239, 240 y el americio 241 en el noroeste del Océano Pacífico muestran un excedente, que posiblemente sea una aportación adicional de la precipitación cercana transportada desde el Pacífico central.

Como resultado de los estudios realizados en el Mar del Japón/Mar del Oriente y el noroeste del Océano Pacífico, no existe una prueba concluyente del efecto del vertimiento

de desechos radiactivos. Sin embargo, se han observado características oceanográficas singulares en el comportamiento de los radionucleidos.

Se estimó la dosis equivalente colectiva efectiva (CEDE) para la población japonesa mediante la cadena alimentaria marina a partir de los desechos radiactivos líquidos vertidos en el Mar del Japón/Mar del Oriente. Cerca de las costas de Vladivostok se vertió un total de 443 TBq de desechos líquidos.

Respecto de la composición de radionucleidos de los desechos, se supuso que la razón del cobalto 60, del estroncio 90 y del cesio 134 a cesio 137 fue de 0,01, 0,3 y 0,01, respectivamente. Las dosis debidas a radionucleidos de período largo tuvieron valores máximos a los cuatro y cinco años después de efectuadas las evacuaciones.

La CEDE total de todos los radionucleidos tuvo en 1990 un máximo de 0,8 Sv·hombre. Casi el 90% de la dosis proviene del cesio 137, debido principalmente al consumo de pescado. Se estima que el compromiso de dosis equivalente colectiva efectiva sea de 11 Sv·hombre.

A fin de establecer una comparación con las dosis de los desechos radiactivos líquidos también se realizaron los estimados de dosis debido a la precipitación global (estroncio 90, cesio 137 y plutonio 239, 240) y el radionucleido natural (polonio 210). La CEDE se estimó a partir de la incorporación anual de productos del mar capturados en 1990.

La dosis colectiva de 17 000 Sv·hombre de polonio 210 predomina en comparación con la de 16 Sv·hombre de estroncio 90, cesio 137 y plutonio 239, 240. La CEDE total de los desechos



radiactivos líquidos representa un 5% de la correspondiente a la precipitación global.

PERSPECTIVAS

Es menester realizar otras investigaciones con miras a evaluar de forma más amplia la radiactividad en el medio ambiente marino. La investigación y el análisis en el MEL se concentrarán en las fuentes que han introducido radionucleidos en los océanos y mares del mundo; la distribución de radionucleidos antropógenos y naturales en el medio ambiente marino; y la contribución de los radionucleidos antropógenos y naturales a las dosis que la población mundial recibe, procedentes de la radiactividad marina, mediante la ingestión de productos del mar. Los estudios contribuirán a esclarecer la contribución de las diferentes fuentes de

radiactividad y sus resultados complementarán el proceso de adopción de decisiones en diversas esferas.

Un foro importante será el Simposio internacional sobre contaminación marina que se celebrará en Mónaco, en octubre de 1998. El OIEA y diversos organismos patrocinarán conjuntamente el Simposio. *(Para una visión general de los objetivos y temas del Simposio, véase el recuadro de las páginas 4 y 5).* Destacados especialistas nacionales e internacionales de esta esfera examinarán una amplia diversidad de cuestiones y contribuirán a establecer prioridades para los próximos años. □

Foto: Especialistas en ciencias del mar colocan un sacatestigos de caja para tomar muestras del sedimento del fondo marino. (Cortesía: MEL)