

LOS DESECHOS RADIACTIVOS Y EL MAR

*Juan Luis Orellana C.
Biólogo U.CH.*

INTRODUCCION

El creciente desarrollo de la energía nuclear, similar a lo que ocurre con cualquier otro tipo de energía, trae consigo el inevitable problema de qué hacer con los desechos que produce. Como regla, para el funcionamiento de cualquier sistema se requiere de materiales, y a menos que el sistema posea una eficiencia del 100%, eliminará desechos. Los sistemas nucleares no son una excepción a esta regla.

Los desechos radiactivos, no sólo de centrales nucleoelectricas, cuyas unidades productoras de energía son los reactores de potencia, sino también de otras actividades del ciclo del combustible, deben ser evacuados bajo estrictas condiciones de seguridad, dado que estos desechos pueden seguir constituyendo una seria amenaza para el hombre, su ambiente y sus recursos vivos.

En la actualidad, Chile no cuenta con reactores de potencia y resulta difícil predecir cuándo serán construidos. Una definición clara respecto a dicha opción dependerá del equilibrio existente entre la capacidad competitiva que alcance la energía nucleoelectrica, respecto a otro tipo de energía, y una decisión política fundamentada en las necesidades reales del país y su aceptación por parte de la sociedad.

Una economía cada vez más dependiente de sus recursos energéticos, como la nuestra, no puede soslayar las oportunidades que le brinda el desarrollo tecnológico alcanzado hasta el momento, no sólo en el mundo sino también en nuestro país, en el seno de la

Comisión Chilena de Energía Nuclear y en las universidades. De esta manera, la posibilidad de que la utilización de la energía nucleoelectrica no sea iniciada es muy escasa.

Sin embargo, previo a este desarrollo deberá solucionarse el problema de la gestión de desechos, de manera que satisfaga no sólo a la comunidad científica, sino también al público en general.

La posibilidad de que se generen desechos radiactivos en una potencial industria nuclear chilena, y el hecho de no descartar el que otros países evacúen los suyos, ya sea frente a nuestra soberanía, o bien dentro de ella, sin conocimiento de la Autoridad Marítima correspondiente, nos ha motivado para la realización de esta revisión conceptual, cuyo objetivo es entregar los elementos de juicio acerca de este problema, de modo que permitan estimar sus consecuencias y fundamentar una posición al respecto.

Con esta idea en mente, veremos lo que es actualmente la gestión de desechos a nivel internacional y en Chile. Asimismo, estudiaremos la aptitud o inaptitud de los fondos marinos chilenos para este fin, considerando las recomendaciones de los organismos competentes, los estudios realizados hasta el momento en otras regiones oceánicas y el conocimiento que se tiene de nuestros fondos y del mar de Chile.

Se intentará responder preguntas tales como las siguientes:

- ¿Qué son los desechos radiactivos?
- ¿Cuáles son las características bióticas y

abióticas del mar chileno necesarias de considerar ante una eventual gestión de desechos radiactivos?

- ¿Qué principios radiológicos están involucrados en la gestión de desechos?
- ¿Cuál es la legislación internacional vigente?, y
- ¿Cuál es la legislación chilena vigente?.

Sin pretender ahondar en los detalles, este artículo intenta dar una visión general pero actualizada de la gestión de desechos radiactivos, referente a su evacuación en el mar.

FUENTE Y NATURALEZA DE LOS DESECHOS RADIACTIVOS

Clasificación y tratamiento

Bajo las actuales condiciones de la tecnología nuclear y a medida que crezca el número de centrales nucleares, principalmente las de potencia, aumentará el volumen de los desechos radiactivos. Esto hace necesario reconocer dos grandes tipos de actividades en el área: actividades en gran escala, donde se genera la mayor cantidad de desechos radiactivos, que incluye:

- Minería y molienda de uranio y torio,
- Operaciones del ciclo del combustible nuclear,
- Operación de estaciones nucleares de potencia,
- Descontaminación y clausura de plantas nucleares,

y las actividades en pequeña escala, donde las cantidades de desechos radiactivos producidos son escasas o nulas y provienen de instituciones de investigación y docencia, hospitales y clínicas y, en general, de las múltiples aplicaciones que tiene la energía nuclear en la industria, la medicina y la investigación científica y tecnológica.

Sin duda, las pruebas nucleares con fines bélicos aportan desechos, que en el caso de países poseedores de armamento nuclear debe ser importante; sin embargo, desconocemos su magnitud y características.

La Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) entrega una clasificación de desechos, de acuerdo a sus características y evacuación, en un informe de publicación reciente (1). Esta clasificación es la siguiente:

— *Desechos de Alto Nivel (HLW)*. Provenientes del primer ciclo de extracción de plantas de reprocesamiento de combustible agotado. Contiene elementos transuránicos y

productos de fisión altamente radiactivos, que generan calor y poseen vida media larga. Todo esto hace necesario su aislamiento de la biosfera.

— *Desechos Alfa-Portadores*. Denominados también transuránicos (TRU), material contaminado con plutonio o "desechos alfa". Contienen desechos alfa-emisores, de vida media larga. Estos desechos deben ser evacuados de igual forma que los HLW.

— *Desechos de Nivel Intermedio (ILW)*. Describe desechos con una importante actividad beta-gamma y baja actividad alfa, como la resina del circuito primario de enfriamiento de reactores de agua liviana (i.e., reactores navales y de investigación).

— *Desechos de Bajo Nivel (LLW)*. Estos desechos contienen cantidades pequeñas de radioisótopos de vida larga, y pueden ser enterrados con o sin barreras especiales.

En base a esta clasificación se ha desarrollado programas de manejo adecuados para cada tipo de desecho.

Lo que se hace con la gran actividad generada por radionúclidos de larga vida es concentrar la solución, almacenándola en estanques de enfriamiento dentro de bóvedas de concreto de alta densidad. Sin embargo, el problema principal es encontrar un método de evacuación que aisle estos materiales del ambiente del hombre y de la biosfera, por un tiempo extremadamente largo (cientos a miles de años).

Actualmente se está llevando a cabo programas de investigación en métodos alternativos de evacuación. En general, lo que se hace es solidificar los desechos incorporándolos a una matriz de vidrio (vitrificación) o de concreto, y ésta dentro de un cilindro de acero inoxidable, los que pueden ser almacenados en piscinas de enfriamiento hasta disponer de una alternativa segura para su evacuación.

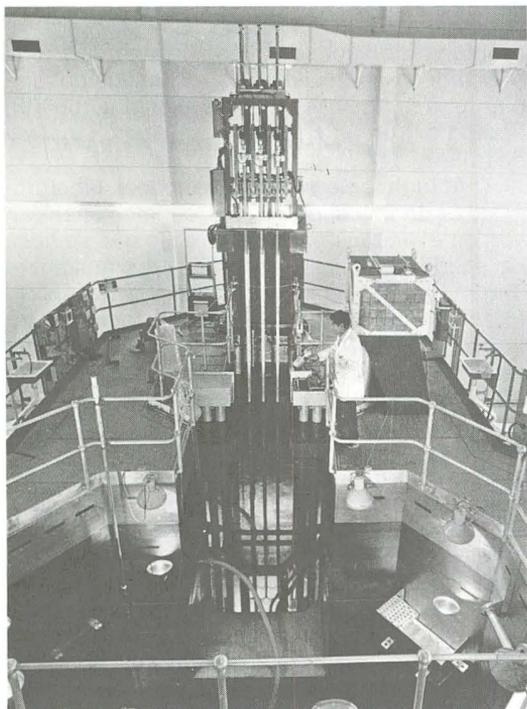
Las opciones planteadas actualmente son dos: su enterramiento en depósitos geológicos, como rocas cristalinas (granito y gneiss), formaciones salinas (domos y sales diapíricas), arcillas plásticas y no plásticas, basaltos y tobas volcánicas (ceniza y detrito volcánico fino) (2), y la evacuación en el mar, ya sea sobre el lecho marino o enterrados bajo él.

Asimismo, la IAEA publicó, en 1984, una serie de recomendaciones acerca de las metodologías a seguir cuando la opción que se planea es el vertido de los desechos radiactivos en el mar (3).

Situación de los desechos radiactivos en Chile

En Chile no existen aún actividades de gran escala que generen cantidades significativas de desechos radiactivos. Sin embargo, las actividades en pequeña escala, producto principalmente de la operación del reactor nuclear de investigación del Centro de Estudios Nucleares "La Reina", perteneciente a la Comisión Chilena de Energía Nuclear, y otras actividades relacionadas, producen cierta cantidad de desechos. Estos son categorizados, de acuerdo a su semiperíodo de desintegración, en mayores o menores de 60 días. De estos últimos se espera su decaimiento para ser eliminados posteriormente como basura común. Los otros, en cambio, son confinados en tierra en lugares especialmente acondicionados para ello, y no se considera en ningún caso la posibilidad de que sean evacuados en el mar.

En consecuencia, la gestión de desechos radiactivos en Chile es irrelevante, desde el punto de vista de la contaminación marina.



REACTOR NUCLEAR DE LA REINA

Desechos inadecuados para ser depositados en el mar

Actualmente existe una moratoria al vertido de cualquier tipo de desechos radiactivos al mar, mientras se realiza estudios que fundamenten mejor dicha opción (13). Estos estudios pertenecen al ámbito de la oceanografía física, química y biológica y a la modelación de los procesos involucrados en la transferencia de radionúclidos. Asimismo, se busca mejorar la tecnología de solidificación de los desechos, entre otras técnicas de tratamiento, antes de su evacuación o almacenamiento.

En 1972, la Convención sobre Prevención de Polución Marina por Evacuación de Desechos y otras Materias (Cfr. el apartado Acuerdos Internacionales) estableció que la IAEA, como organismo competente, debía preparar una definición concreta sobre desechos radiactivos cuyo vertimiento en el mar se prohíbe y, al mismo tiempo, una recomendación a las partes signatarias, con las bases para el otorgamiento de permisos de evacuación de otros desechos o materiales radiactivos, no definidos como inadecuados para ser depositados en el mar.

La definición que entrega la IAEA no es rígida y se mantiene en permanente revisión. La más reciente, publicada en 1986 (4), se refiere cualitativamente a materiales radiactivos, como el combustible irradiado, desechos líquidos del primer ciclo de extracción en solvente del reprocesamiento químico del combustible irradiado y sus formas sólidas. En cuanto a cantidad, dicha definición hace referencia a desechos según su actividad específica.

Recientemente, la IAEA ha utilizado los modelos de dispersión de radionúclidos en cuencas oceánicas elaborados por el Grupo de Expertos sobre los Aspectos Científicos de la Polución Marina, GESAMP, (5), como una manera de ir mejorando cada vez más la base científica de las definiciones y recomendaciones sobre la evacuación de desechos radiactivos.

Los procesos oceánicos (físicos, químicos y biológicos) que son utilizados en los modelos de cálculo y que permiten predecir la transferencia de radionúclidos desde el fondo marino, hasta llegar al hombre, ante una eventual liberación desde su confinamiento, son los siguientes:

- Movimiento y mezcla de agua (vertical y horizontal), dentro de la cuenca;

- Decaimiento radiactivo o degradación química de los contaminantes;
- Interacción de los contaminantes con material particulado (sedimentos y partículas biogénicas en el ámbito pelágico o bentónico);
- Mezcla, bioturbación y difusión dentro o fuera de los sedimentos.

Los cálculos realizados con estos modelos, en base a los parámetros oceanográficos y radiológicos particulares de la zona de evacuación, dan las bases para la caracterización de los desechos en cuanto a si es adecuado o no su vertido al mar, y bajo qué condiciones de tratamiento previo.

La naturaleza dinámica de los sistemas oceánicos, especialmente de aquellos procesos que se relacionan con la transferencia de radionúclidos, obligan a estudiar el mar y sus características, antes de considerarlo como posible depósito para desechos radiactivos. El conocimiento que actualmente se tiene del mar de Chile, aunque insuficiente, permite sacar algunas conclusiones.

Se hace necesario, entonces, entregar una síntesis de los aspectos generales conocidos y que se relacionan con este problema. Ella servirá de base para comprender los principales procesos que debieran considerarse para su estudio posterior.

NATURALEZA DEL MEDIO MARINO

Para comprender los principales procesos oceánicos que puedan inferir en la dispersión, ciclo y destino de los radionúclidos entre el ambiente marino y las vías potenciales que los llevarían al hombre, es necesario dar una síntesis de la naturaleza del medio marino, señalando, cuando sea pertinente, las peculiaridades de nuestro mar.

Zonación física

Respecto a lo que nos ocupa, el mar se subdivide en tres zonas mayores: zona costera, plataforma continental y zona oceánica.

- *Zona costera.* Incluye la porción intermareal, estuarios, fiordos, etc. Allí se concentra la mayor actividad pesquera y comercial del hombre. Chile posee, en este sentido, dos sectores. Uno centro-norte, de pocos accidentes costeros y gran actividad pesquera y comercial (puertos y playas), y un sector sur de fiordos, canales e islas, de gran riqueza en recursos marinos e importante potencial turístico.

- *Plataforma continental.* Corresponde a la porción submarina de la placa continental; en Chile no alcanza los 10 kilómetros de ancho, siendo más angosta en el norte que en el sur (promedio mundial, 70 kilómetros). Termina en un quiebre más o menos abrupto (1 a 10 grados de pendiente) denominado talud. Ecológicamente, se le conoce como provincia nerítica, junto a la masa de agua que hay sobre la plataforma.

- *Zona oceánica.* Posee tres rasgos característicos. Las grandes fosas submarinas, la planicie abisal y las dorsales. Este conjunto constituye ecológicamente la provincia oceánica.

- Las fosas submarinas que bordean los continentes son zonas de gran actividad geológica, dado que allí se unen las placas continentales con la placa oceánica, avanzando una contra la otra a velocidades de varios centímetros por año. En Chile tiene una profundidad máxima cercana a los 8 mil metros y es de gran extensión, abarcando desde el Perú hasta la Tercera Región, unas 50 millas frente al continente.

- La región más extensa de los océanos la constituye la planicie abisal, a profundidades que van de 4.000 a 6.000 metros. En estas áreas de gran estabilidad geológica se pueden encontrar yacimientos importantes de nódulos polimetálicos depositados sobre el fondo. El origen de estos nódulos es aún incierto y su distribución frente a las costas chilenas no es bien conocida.

- Otra región activa de los fondos marinos son las dorsales oceánicas, de gran extensión y actividad, constituyendo un verdadero eje central que recorre los fondos. En ellas se van generando las placas oceánicas, siendo, en consecuencia, geológicamente muy recientes.

Zonación biológica

Tradicionalmente, los organismos marinos se agrupan en dos divisiones: pélagos y bentos. Consecuentemente, nos referiremos a organismos pelágicos o bentónicos, según el caso.

Bentos, se denomina a los habitantes de los fondos que viven enterrados, sobre o están ocasionalmente asociados a sedimentos marinos. En tanto que los pelágicos son todos aquellos organismos que pueblan las aguas que están sobre los fondos.

El bentos, a su vez, puede estar constituido por una infauna que vive enterrada en

fondos blandos y una epifauna que habita sobre rocas o sedimentos. En términos de la eliminación de desechos radiactivos, la infau-na puede ser importante debido al activo re-procesamiento (bioturbación) que realizan en los primeros 30-50 centímetros de sedimento, de donde obtienen gran parte de la materia orgánica (detrito) que les sirve de alimento).

Los organismos pelágicos pueden nadar activamente (necton) o ser trasladados pasivamente por la corriente (plancton). El fito-plancton (plancton vegetal) lo compone gran cantidad de especies de algas microscópicas, como diatomeas y dinoflagelados, los cuales son responsables de la producción de la mayor parte del oxígeno atmosférico, por la fotosín-tesis que realizan en la zona eufótica (capa iluminada del mar), y son el sostén de toda la vida marina.

Procesos oceánicos

Los factores y procesos que controlan la dispersión, ciclo y destino de radionúclidos entre el ambiente marino y el hombre, son muy variados. Ellos pertenecen al ámbito de la oceanografía física, biológica y geoquímica marina, todos estrechamente relacionados cuando se trata de estudiar el comportamiento de radionúclidos en el mar.

Los procesos físicos fundamentales que influyen en la dispersión de un contaminante pasivo en el mar son la advección (corrientes) y mezcla (turbulencia). Desde un punto de vista químico son importantes la disolución, precipitación, formación de complejos, inter-cambio iónico e isotópico y óxido-reducción. Biológicamente, muchas vías marinas de transferencia están mediadas por los organis-mos. Dadas las grandes masas de retorno en los niveles tróficos inferiores, generalmente son los organismos más pequeños (fitoplanc-ton y zooplancton) los que juegan el rol más importante.

Advección, mezcla y surgencia

Los procesos de advección y mezcla tur-bulenta son más intensos en aguas costeras, en comparación a otras regiones. Las fuerzas mareales y el viento son los que provocan la intensa mezcla horizontal y vertical de estas aguas.

Los fenómenos de surgencia, por el con-trario, involucran masas de aguas más profun-das. Son capaces de provocar un ascenso de

aguas subsuperficiales, dependiendo de las características locales de topografía costera y vientos predominantes, fertilizando extensas zonas costeras. Este fenómeno es muy común en las costas del Perú y norte de Chile, ha-ciendo del Pacífico sudeste una zona altamen-te productiva.

Sedimentación

El aporte de sedimentos litogénicos al fondo del mar proviene principalmente de los ríos y el viento. Este aporte queda retenido en su mayor parte en la plataforma continental, y la fracción más pequeña (2-3 μm) es deposita-da en zonas más profundas.

La actividad biológica de la columna de agua produce sedimentos biogénicos, como pellets fecales y detritos orgánicos. Su propor-ción en los distintos tipos de fondo dependerá, en consecuencia, de la intensidad relativa de productividad biológica de las capas supraya-centes.

La distribución de los distintos tipos de sedimentos en el mar de Chile es poco cono-cida, siendo posible encontrar únicamente algunas referencias sobre tipos de sedimentos en bahías como Concepción y Valparaíso, pro-ducto de investigaciones bentónicas y sedi-mentológicas (6).

Gran parte de los sedimentos del fondo poseen una capa de material suspendido unas decenas de metros del lecho marino (capa nefeloide). Esta capa se produce principal-mente por bioturbación (7) y provee un vehícu-lo para la acumulación de partículas y un transporte horizontal y vertical que en ciertas áreas podría ser importante.

Procesos biológicos

Los organismos vivos pueden tener un marcado efecto sobre la distribución, e incluso, sobre la forma química de los elementos en el mar. Además, las rutas biológicas son el prin-cipal mecanismo por el cual el hombre puede estar expuesto a radionúclidos que han sido descargados al ambiente marino.

Los procesos más importantes señalados en la referencia (8), en relación a la gestión de desechos radiactivos evacuados al mar, son la bioturbación, movimiento de organismos ben-tónicos, migraciones, acumulación biológica y transferencia a través de la trama trófica.

Ciertos organismos demersales (peces, en su mayoría) transportan biomasa y, por lo

tanto, radioisótopos, en sentido vertical y horizontal, lo cual, asociado a migraciones alimentarias diarias de organismos pelágicos, se transforman en mecanismos importantes de unión entre el fondo y la superficie, donde habitan especies pelágicas actual o potencialmente útiles para el consumo del hombre. La referencia (8) analiza estos aspectos en profundidad.

Consecuencias ecológicas

A juzgar por la información disponible, el hombre es la principal consideración en la evaluación de los efectos ambientales, debido al vertimiento de desechos radiactivos en el mar. Sin embargo, niveles crecientes de radiactividad ambiental, inevitablemente ocasionan irradiación en otros organismos, y surge la pregunta acerca de la posibles efectos sobre el equilibrio del ecosistema.

Varios organismos internacionales se han preocupado de este problema, intentando darle una respuesta satisfactoria, a pesar de la dificultad de evaluar cuantitativamente los procesos involucrados y los efectos de las radiaciones ionizantes sobre organismos y ecosistemas.

Es así como la IAEA publicó, en 1976 y 1979, dos informes técnicos. Uno de ellos, referencia (9), trata de los efectos somáticos y genéticos sobre organismos y ecosistemas acuáticos y revisa extensamente la literatura pertinente. En otra publicación, referencia (10), se da recomendaciones detalladas sobre metodologías para llevar a cabo mediciones cuantitativas del impacto de la radiactividad sobre los ecosistemas acuáticos. Asimismo, periódicamente la IAEA realiza simposios donde se discute el problema desde distintos puntos de vista (11).

Se ha señalado a peces teleósteos, particularmente huevos y juveniles, como los organismos acuáticos más sensibles a las radiaciones, y se ha observado efectos sobre las tasas de mortalidad de especies comerciales (10). Cabe señalar, al respecto, que nuestra pesquería depende fundamentalmente de este tipo de organismos.

La IAEA ha discutido también el problema de la estabilidad de los ecosistemas marinos, señalando que con la información disponible y los niveles actuales de radiactividad en el mar, la situación no es inquietante (9). Sin embargo, es necesario mantener una vigilancia al respecto, en especial en esta región del Pacífico

sur, dado el desconocimiento que se tiene de ella, de su estado radiactivo y la gran importancia económica que ella posee para nuestro país.

PROTECCION RADIOLOGICA Y EVALUACION DE DESECHOS AL MAR

Principios y recomendaciones

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), es el organismo encargado de dar las recomendaciones sobre dosis y tasas de dosis que puede recibir un individuo.

Basada en la probabilidad de que ocurra algún daño, recomienda un método que considera los diferentes riesgos de mortalidad asociados con la radiación de distintos órganos, más una proporción de efectos hereditarios, usando el valor único de dosis equivalente efectiva (12). Tres principios son fundamentales en el contexto de la ICRP; ellos son:

- No adoptar ninguna práctica, a menos que hacerlo otorgue algún beneficio neto positivo (principio de justificación).

- Todas las exposiciones deberán mantenerse a niveles lo más razonablemente bajas posibles, considerando factores económicos y sociales (principio de optimización).

- Las dosis equivalentes para individuos no deberán exceder los límites recomendados por la comisión, apropiados para esas circunstancias (principio de cumplimiento con dosis límites).

Relación entre evaluación de desechos y dosis

Para establecer las regulaciones que permiten limitar las exposiciones del público, siempre sobre la base de las recomendaciones de la ICRP, se estudia las vías críticas que ocasionan exposiciones a grupos críticos.

Esto significa que de todas las vías posibles por las cuales los radionúclidos podrían llegar al hombre, aquellos que resultan en mayor dosis de radiación son denominadas vías críticas. Por ejemplo, una trama trófica determinada: sedimento, gusanos bentónicos, peces demersales (congrío o merluza) y el hombre. Asimismo, el grupo de personas que recibe la mayor dosis proveniente de esta vía, se conoce como grupo crítico (población costera, caleta de pescadores, etc.).

La importancia de las vías críticas de exposición es que la cantidad de radiactividad

descargada se controla limitando la dosis al o a los grupos críticos. El grupo crítico en cualquier caso particular depende del método de evacuación, los radionúclidos involucrados, la ecología local (formas predominantes de vida marina, características ambientales, etc.) y los hábitos particulares del grupo (artes de pesca, forma de consumir el pez, etc.).

Los cálculos son realizados en base a modelos matemáticos, cuyas predicciones permiten aplicar un control adecuado en los puntos de liberación. Estos modelos, señala la IAEA (12), deben explicar el transporte físico, ciclos biogeoquímicos y transferencias ecológicas de los radionúclidos, con el fin de estimar las posibles exposiciones en el hombre a través de distintas tramas tróficas.

Estas aproximaciones se basan en la probabilidad de que se produzca cierta liberación de radiactividad por corrosión del contenedor, rotura, etc. La ICRP discute en detalle los sistemas de aproximación. Uno de ellos, el análisis de sistemas (SA), se aplica a situaciones de liberación pulsada; en cambio, el enfoque del factor de concentración (CF) es aplicable a tasas de descarga uniforme. Los datos necesarios para escoger uno u otro método son la radiactividad liberada (forma física y química de los radionúclidos en el momento de la descarga), factores de concentración y, finalmente, información demográfica, como hábitos de trabajo, alimentación y recreación de los grupos críticos.

Evaluación de los depósitos oceánicos

Antes de intensificar los estudios sobre capacidad de confinamiento de radionúclidos en la cuenca, siempre y cuando cumpla ciertas características esenciales, como la estabilidad geológica, carencia de recursos o inaccesibilidad (17), entre otras, cada lugar específico es examinado desde un punto de vista radiológico y oceanográfico.

En el caso de un vertimiento en el fondo marino, las mediciones de vías críticas, necesarias para confirmar los cálculos previos para evaluar dosis, son técnicamente difíciles y el único medio de análisis y predicción de que dispone son los modelos (12).

Para desarrollar los modelos más adecuados se requiere una investigación acabada del fondo oceánico, que entregue valores reales y representativos de los principales procesos oceanográficos del área en cuestión

(como los señalados en el apartado Procesos oceánicos).

Una aproximación de tales investigaciones es la desarrollada dentro del Programa de Vigilancia de Investigación Ambiental (Agencia de Energía Nuclear de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo, OECD/NEA, el cual cubre oceanografía física, geoquímica, oceanografía biológica y el desarrollo de modelos (13).

Más recientemente, el Grupo de Trabajo del Fondo Marino de la NEA está llevando a cabo un programa de investigación coordinado para evaluar la factibilidad ingenieril del emplazamiento de desechos radiactivos bajo el lecho oceánico (subfondo marino) (14).

El Laboratorio Internacional de Radiactividad Marina de Mónaco, dependiente de la IAEA, realiza investigaciones sobre métodos de control ambiental, evaluación de las repercusiones ambientales, biocinética y transferencia a través de la trama trófica, radionúclidos en sedimentos, etc. (13).

ACUERDOS INTERNACIONALES Y LEGISLACION CHILENA

La Convención de Londres

Aunque existen varios acuerdos regionales para prevenir o controlar la polución del ambiente marino, como la Convención de París (1974), los Protocolos de Barcelona (1976-1980) y la Convención de Helsinki (1974), el único de carácter global es la Convención sobre Prevención de Polución Marina por Evacuación de Desechos y otras Materias (Londres, 1972), conocida como la Convención de Londres (LDC).

Otro acuerdo de importancia, aunque de carácter regional y que se refiere a desechos radiactivos, es el Consejo Multilateral y Mecanismos de Vigilancia para la Evacuación al Mar de Desechos Radiactivos de la OECD/NEA, la cual agrupa a países europeos, además de Estados Unidos, Japón, Australia y Canadá.

Respecto a la LDC, esta Convención surgió a raíz de la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Humano, celebrada en 1972 en Londres, que regula la evacuación al mar de una amplia gama de desechos peligrosos, incluyendo material radiactivo, entre otras sustancias. (En el segundo párrafo del apartado Desechos inadecuados... se señaló las atribuciones que le otorga la LDC a la IAEA en este contexto).

El Anexo I de la LDC contiene un listado de aquellas sustancias que son inadecuadas para ser vertidas al mar, y, en consecuencia, su evacuación se prohíbe. Constituye la llamada "lista negra" e incluye compuestos organohalogenados, mercurio, cadmio y otros.

Otros desechos radiactivos, no definidos como de alto nivel, se incluyen en el Anexo II de la LDC, "lista gris", pudiendo ser vertidos al mar a través de permisos especiales otorgados por las autoridades nacionales, las que deberían considerar en su totalidad las recomendaciones de la IAEA.

El Anexo II de la LDC contiene las cláusulas que deben considerar los países signatarios al establecer criterios para el otorgamiento de permisos para la evacuación de materias al mar, que son aplicables a todos los desechos, no sólo radiactivos. Tales permisos, señalan las cláusulas, deben ser emitidos por las autoridades nacionales sólo después de una cuidadosa consideración de las características del lugar de evacuación.

El artículo VI de la LDC indica que cada parte contratante designará una autoridad competente apropiada para emitir los permisos especiales para evacuar los desechos señalados en el Anexo II que cumplen los requerimientos del Anexo III.

Los países signatarios deben presentar a la Secretaría formal de la Convención, la Organización Marítima Internacional (OMI), la siguiente información:

- Registro de las materias cuya evacuación se permite;
- Informe sobre el monitoreo de las condiciones marinas; y
- Criterios, medidas y requerimientos que adopta el firmante para otorgar el permiso.

Otros acuerdos internacionales

En 1980 finalizó la Convención sobre Derecho del Mar, cuya parte XII, Protección y Preservación del Ambiente Marino, establece las obligaciones de los Estados. En los artículos 207, sobre polución por fuentes con base en tierra, y 210, sobre evacuación, se dan las reglas para prevenir, reducir y controlar la polución marina en general.

Sin pretender reemplazar a la LDC, esta nueva Convención otorga una mejor estructura a otros Convenios más especializados (como la LDC).

Deese (16), discute en detalle el derecho internacional en el contexto de la eliminación

de desechos radiactivos por debajo del subsuelo marino (enterramiento de los contenedores), los distintos convenios existentes y el sentido de cada uno, respecto a esta conflictiva técnica de evacuación.

Legislación chilena

En Chile, si bien es cierto la legislación no es específica para la evacuación al mar de desechos radiactivos, la Ley de Navegación (Nº 2.222) se refiere indirectamente a esta situación.

El artículo 142 de dicho cuerpo legal prohíbe arrojar materias nocivas y peligrosas a las aguas sometidas a la jurisdicción nacional, y le otorga a la Dirección General del Territorio Marítimo y Marina Mercante (DGTM y MM) la misión de cautelar el cumplimiento de dicha prohibición, fiscalizando, aplicando y haciendo cumplir las normas nacionales e internacionales, presentes o futuras, sobre preservación del ambiente marino, y sancionando su contravención.

Asimismo, la DGTM es también la autoridad encargada de hacer cumplir en el territorio de la república y en las aguas sometidas a la jurisdicción nacional, la prohibición de vertimientos y las medidas preventivas que se establecen en el Convenio de Londres y sus anexos I, II y III. Le corresponde igualmente a la Dirección, conocer los permisos que se contemplan en el artículo VI del citado convenio (artículo 143 de la Ley de Navegación).

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Hemos visto que los distintos tipos de desechos radiactivos HLW, TRU, ILW y LLW requieren un tratamiento diferente para su evacuación. En el caso de los HLW y TRU, según la definición de la IAEA, su evacuación al mar está prohibida. Para los desechos de nivel medio y bajo se requieren análisis detallados de los procesos oceánicos que determinarán su transferencia al hombre y del daño que ocasionarán al medio marino. Para realizar estos estudios se requieren modelos más o menos complejos, los que, en base a datos realistas y según las dosis límites determinadas por el organismo internacional competente (ICRP) permiten a la IAEA establecer límites a las tasas de evacuación.

Las dosis propuestas por la ICRP están basadas en los criterios de justificación, de optimización y de cumplimiento con las dosis límites. La forma de obtener estas dosis son

dos: análisis de sistemas y factores de concentración. Su elección dependerá del modo de liberación de los desechos (pulsada o uniforme).

Respecto a la legislación, el principal acuerdo internacional que actualmente se aplica al vertimiento de desechos al mar, es la Convención de Londres, la que en 1972 estableció las bases para estas prácticas, entregándole a la IAEA la responsabilidad de definir desechos radiactivos de alto nivel cuya liberación al mar se prohíbe, y recomendar la forma y el mecanismo de evacuar otros desechos radiactivos. En Chile, la DGM es la encargada de hacer cumplir la LDC, según lo establece la Ley de Navegación.

Además, hemos revisado las características y procesos oceánicos principales que ocurren en los fondos del mar de Chile. A juzgar por la información disponible, existen mecanismos en el mar chileno que acelerarían el movimiento de radionúclidos hacia la superficie, haciéndolo, en consecuencia, inadecuado para ser usado como reservorio de desechos radiactivos.

Estos mecanismos son los siguientes:

— Inestabilidad geológica: producto de la unión de la placa de Nazca con la Sudamericana en este sector del Pacífico sudeste, que se manifiesta en la gran fosa submarina peruano-chilena. En efecto, esta zona es una de las de mayor sismicidad del planeta.

— Plataforma continental angosta: lo cual significa cercanía entre fondos marinos y zonas de actividad pesquera y minera de nuestro mar.

— Zona de surgencias: lo cual aumenta la probabilidad de disponer en superficie, o cerca de ella, aguas de mayores profundidades.

— Zona de gran riqueza pesquera: la zona nerítica chilena es una de las más ricas del mundo, especialmente el norte de Chile. Esta característica le da a la región la propiedad de un constante crecimiento en esa área de la economía.

Además de las razones mencionadas, existen aún otras que debieran ser sometidas a estudio, como la bioturbación, la transferencia de radionúclidos a través de tramas tróficas bentónicas y la zona pelágica de nuestro país, y, finalmente, la existencia de nódulos polimetálicos en nuestra planicie abisal y su potencial

explotación. Junto con ello, debiera estudiarse la posibilidad del confinamiento en tierra, en busca de los sitios más adecuados para la instalación de un reservorio de desechos radiactivos. Esta última alternativa ofrece la ventaja de recuperar los desechos ante una eventual posibilidad de reciclarlos o retratarlos con nuevas técnicas. Sin embargo, persiste como una gran desventaja para la consideración de lugares aptos, la inestabilidad geológica de nuestro territorio.

La decisión adoptada deberá considerar los avances tecnológicos en este campo de la industria nuclear y que se prevé ocurrirán en las próximas décadas. Avances en las técnicas de vitrificación, compactación, empaquetamiento y confinamiento posterior de los desechos, son algunas de las áreas que permitirán, en todo caso, evitar que los desechos radiactivos sean evacuados en los fondos marinos.

Como se vio, la situación de los desechos radiactivos en Chile aún no tiene un significado importante en términos de contaminación marina, pero, sin duda, un reactor de potencia en nuestro país traería consigo el problema del aumento de los desechos y la introducción de algunos de alta actividad. Sin embargo, esto no implica necesariamente que el mar deba ser utilizado como reservorio. Las consecuencias que ello acarrearía son inestimables en estos momentos, dadas las características que hemos revisado.

El escaso conocimiento que se tiene del mar de Chile hace necesario intensificar su estudio. La experiencia adquirida es lo único que permite conocer los efectos que tienen las emisiones artificiales que están llegando a esta parte del océano Pacífico y planificar los programas de vigilancia y monitoreo indispensables para mantener un adecuado control sobre los elementos radiactivos contaminantes en nuestro mar.

Si pretendemos transformar en un presente lo que nos promete nuestro mayor legado natural, el mar, debemos afianzar los conocimientos que su complejidad nos impone. Este es el único camino para que ya no sea más necesario decir: el futuro de Chile está en el mar, sino vivir en un presente cuya economía esté basada en las riquezas marinas que esperan ser explotadas con conciencia oceánica.

REFERENCIAS

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Radiative Waste Management: A Status Report*, IAEA, Vienna, STI/PUB/712, 1986, 31 p.
2. NUCLEAR ENERGY AGENCY OF THE ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OECD/NEA): *Geological Disposal of Radioactive Waste, Research in the OECD Area*, OECD/NEA, 1982, 55 p.
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Environmental Assessment Methodology for Sea Dumping of Radioactive Wastes*, IAEA Safety Series N° 65, 1984, 42 p.
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Definition and Recommendations for the Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and other Matter (1972)*, IAEA, Safety Series N° 78, 1986, 73 p.
5. IMO/FAO/UNESCO/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP, Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution (GESAMP): *An Oceanographic Model for the Dispersion of Wastes Disposed of in the Deep Sea*, Reports and Studies N° 19 IAEA, Vienna, 1983.
6. ORELLANA, J.L.: *Fluctuaciones Temporales de la Malaco-Fauna de Fondos Sublitorales Blandos en el Area de Valparaiso*, Tesis para optar al Grado de Licenciado en Biología, Universidad de Valparaíso, Instituto de Oceanología, 1985, 133 p.
7. RHOADS, D.C. and YOUNG, D.K.: *The Influence of Deposit-Feeding Organisms on Sediment Stability and Communities Trophic Structure*, Journal of Marine Research 28(2):150-178, 1970.
8. ANGEL, M.V. FASHAM, M.J.R. and RICE, A.L.: *Marine Biology Needed to Assess the Safety of a Program of disposal of High-Level Radioactive Waste in the Ocean*. In R. Geyer(ed), Marine Environmental Pollution N. 2. Ch. 10 pp. 297-312. Elsevier Oceanography Series, Co., 1981, 574 P.
9. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Effects of Ionizing Radiation on Aquatic Organisms and Ecosystems*, IAEA, Technical Reports Series N° 172, 1976, 131 p.
10. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Methodology for Assessing Impacts of Radioactivity on Aquatic Ecosystems*, IAEA, Technical Reports N° 190, 1979, 415 p.
11. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Impacts of Radionuclide Releases into the Marine Environment*, IAEA, Proceedings of a Symposium, Vienna, 6-10 October 1980, STI/PUB/565, 1981.
12. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Control of Radioactive Waste Disposes into the Marine Environment*, IAEA, Safety Series N° 61, 1983, 132 p.
13. HAGEN, AMELIA y RUEGGER, B.: *Evacuación de Desechos en las Profundidades del Mar: Bases Científicas para el Control de la Contaminación*, IAEA, Boletín, Primavera 1986, 28(1):29-32, 1986.
14. RUEGGER, B.: *Exploring the Sub-Seabed Waste Disposed Option*, NEA, News letter 4(1):13-15, 1986.
15. FUKAI, R.: *Informe sobre la Gestión de Desechos y el Mar, desde Mónaco*, IAEA, Boletín, Primavera 1986, 28(1):33-36, 1986.
16. DEESE, D.A.: *Energía Nuclear y Desechos Radiactivos ¿Eliminación en el Sub-Fondo Marino?* EDISAR, SRL B.A., 1981, 25 p.
17. ANDERSON, D.R.: *Release pathways for Deep Sea-Bed Disposal of Radioactive Wastes*. In Impacts of Nuclear Releases into the Aquatic Environment, Proceeding of an International Symposium, Otaniemi, Finland, Junio 30 - Junio 4, 1975, STI/PUB 406.