

# Técnicas nucleares e isotópicas para la investigación de la contaminación marina

*Un estudio de aplicaciones seleccionadas que utilizan los científicos para identificar, localizar e investigar la contaminación de los océanos*

por L.D. Mee y  
J.W. Readman

Los océanos son un vasto recipiente donde se mezclan los elementos y los compuestos presentes en la corteza terrestre, ya sean naturales o resultantes de las actividades del hombre. El "recipiente" se remueve aproximadamente una vez cada 1600 años, sólo unas cuatro veces desde que comenzó a escribirse la historia de la humanidad, pero en la escala geológica del tiempo lo hace a la velocidad de una mezcladora. Por tanto, su contenido suele estar constituido por componentes importantes cuya concentración relativa no parece cambiar con el tiempo, y por una fracción mucho menor (menos de 0,1% de las sales disueltas) en desequilibrio como resultado de su participación en los procesos básicos de la vida, su introducción como contaminantes por el hombre, o su reactividad geoquímica.

Los científicos marinos suelen tener enormes problemas de orden práctico para medir los distintos oligoelementos que integran esta mezcla y obtener datos sobre su dinámica. Esta información es esencial para poder entender la fertilidad marina e investigar el transporte, el destino y los efectos de los contaminantes marinos. En estos momentos, las técnicas nucleares e isotópicas constituyen la fuente singular de una información que permite identificar algunos contaminantes no nucleares, seguir sus trayectorias en el medio ambiente y, posiblemente, investigar sus efectos biológicos. En este artículo se reseñan algunos logros importantes en esta esfera y se analizan las perspectivas de su desarrollo futuro.

## Trazadores oceanográficos

El agua de mar es una solución de composición mayormente uniforme cuya concentración (salinidad) varía según el lugar. Casi todo lo que sabemos acerca de la circulación oceánica se basa, por tanto, en mediciones físicas relativamente sencillas de la

salinidad y la temperatura y en la medición de las corrientes mediante correntómetros, boyas a la deriva, o cálculos basados en los gradientes de densidad y la geostrofia. Con estos métodos se han obtenido buenas estimaciones del transporte horizontal de las masas de agua, pero son imprecisas para medir la escala vertical. Es vital conocer cuantitativamente el proceso de mezcla vertical si queremos comprender la capacidad de asimilación de contaminantes (procedentes de fuentes terrestres o del vertimiento) del océano, y su capacidad para recibir "gases de efecto de invernadero" (que constituiría el mecanismo fundamental de lucha contra el calentamiento de la Tierra).

Gran parte de lo que hoy sabemos sobre los procesos de mezcla oceánica en gran escala se debe a las mediciones de los radionucleidos de serie natural —como, por ejemplo, el carbono 14 cosmogénico que se utilizó en la "datación" de las aguas profundas de los océanos—, o a las observaciones de los desequilibrios radiogeoquímicos entre los productos primordiales de la desintegración de la serie del uranio y del torio. La introducción de radionucleidos "artificiales" en el medio marino ha permitido contar con una herramienta especialmente valiosa para estudiar el transporte de la contaminación porque tuvo lugar en períodos breves (como en el caso de los ensayos de armas en la atmósfera, cuya suspensión efectiva ocurrió después de 1963), o porque proviene de una fuente fija como las centrales nucleoelectricas o las instalaciones de reelaboración. La literatura que existe sobre este tema es voluminosa y bastará citar un solo ejemplo para ilustrar la repercusión de estos trabajos.

Quizás el más noble de todos los trazadores radioquímicos antropógenos de la mezcla oceánica sea el tritio, que se produjo en grandes cantidades durante los ensayos de armas nucleares y se introdujo en la superficie de los océanos, sobre todo en las latitudes septentrionales, como agua tritiada. Hablamos en pasado porque el tritio, que tiene un período de semidesintegración de 11,3 años, ya se ha desintegrado hasta niveles que sólo pueden detectarse mediante complejas mediciones espectrométricas de masa de su hijo el helio 3. El OIEA, en parti-

El Sr. Mee es jefe de sección del Laboratorio de Estudios de Ambientes Marinos del Laboratorio del OIEA para el Medio Ambiente Marino, y el Sr. Readman es jefe de la Dependencia de Química Orgánica del Laboratorio.

cular su Sección de Hidrología Isotópica, aprovechó bien el período en que el tritio era relativamente fácil de medir. Aparte de los trabajos iniciales llevados a cabo en esta esfera, el Organismo reunió a especialistas provenientes de todas partes del mundo y editó diversas publicaciones clave. La valiosa información generada por esa labor demostró que en los 25 años siguientes a la primera introducción de grandes cantidades de tritio en el océano, la columna de agua tritiada pasó por encima del umbral del estrecho de Dinamarca y penetró en la zona abisal a una profundidad de cinco kilómetros. (Véase el gráfico de la página siguiente.) Esto sucedió a un ritmo mucho más rápido que el pronosticado por los oceanógrafos físicos, lo que demuestra que los contaminantes solubles transportados por el aire, que producen las industrias modernas (es decir, los bifenilos policlorados, el DDT y los CFC) podrían haber penetrado ya en las aguas profundas.

Ahora que el tritio ya no es útil como trazador a escala oceánica, se sigue buscando otros radionucleidos de período más largo que permitan conocer los procesos de mezcla. Entre los candidatos más adecuados figuran el criptón 81 (período de semidesintegración de  $2,1 \times 10^5$  años), un producto de fisión inerte, pero no muy soluble, que podría servir para estudiar el intercambio aire-mar; el neptunio 237, introducido fundamentalmente como desecho del combustible nuclear o de las plantas de reelaboración, pero que tiene un período de semidesintegración muy largo ( $2,1 \times 10^6$  años); y el yodo 129, producto de fisión bastante conservador que tiene un período de semidesintegración de aproximadamente  $10^7$  años.

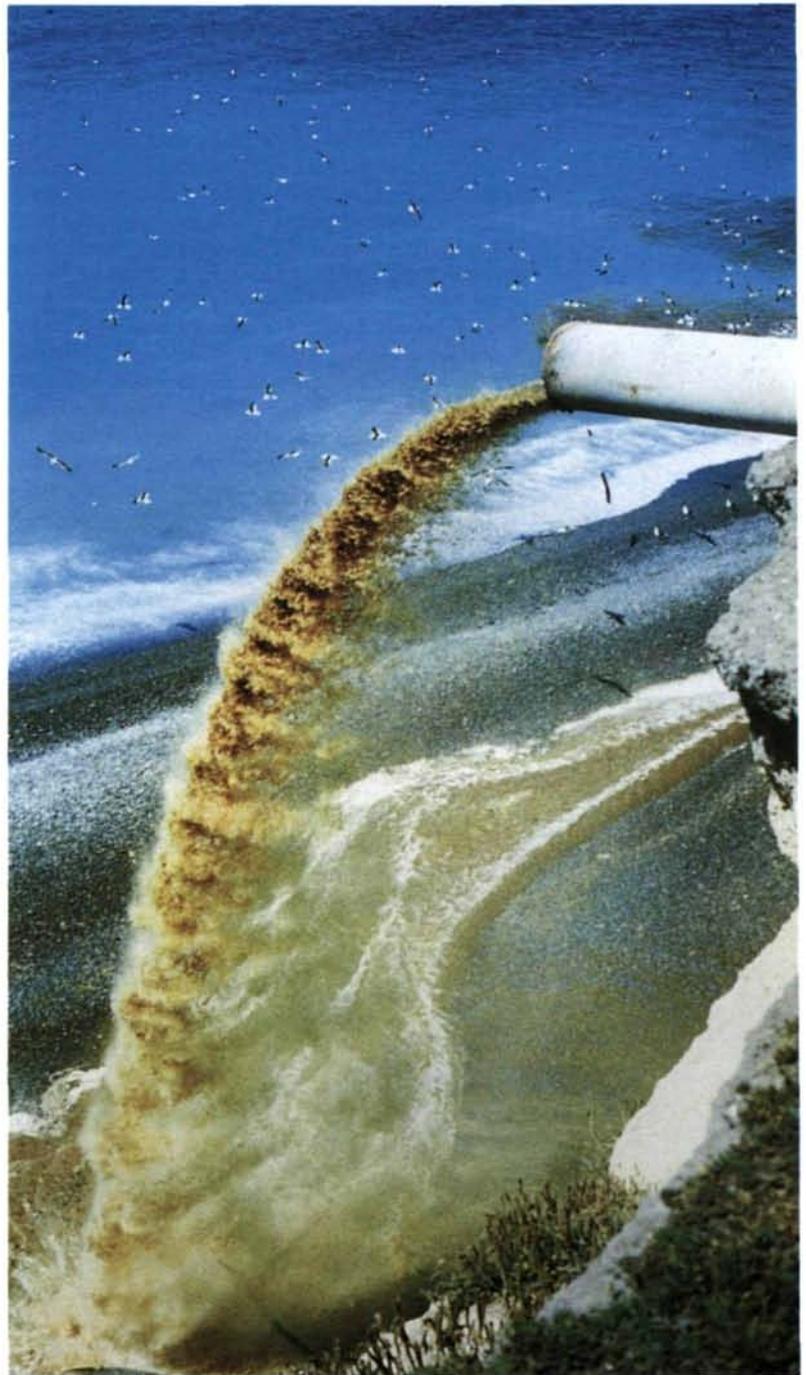
El problema de utilizar estos posibles trazadores estriba en su baja concentración y poca radiactividad, que hacen prácticamente imposible el recuento convencional. Por ejemplo, para poder medir el neptunio 237 en agua de mar contaminada, normalmente hay que tomar muestras de 10 toneladas y después de realizado el proceso de concentración y separación química las muestras se "recuentan" ¡durante dos semanas! El Laboratorio del OIEA para el Medio Ambiente Marino en Mónaco (IAEA-MEL) está ensayando nuevas técnicas "no nucleares" para medir algunos de estos trazadores empleando la espectrometría de masas del plasma acoplado por inducción (ICP-MS). Es posible que estas investigaciones finalmente proporcionen a los oceanógrafos nuevos medios que permitan trazar la trayectoria y determinar la dispersión de los contaminantes, nucleares o no nucleares, y elaborar un modelo de la capacidad de los océanos para asimilarlos.

### Investigación de los contaminantes

La introducción de un trazador radiomarcado en un sistema experimental controlado permite que el especialista en ciencias marinas investigue la interacción de los distintos contaminantes con otros componentes del medio. Estos experimentos tienen que ser preparados cuidadosamente de manera que el radisótomo que se introduzca tenga las mismas características químicas del componente estudiado y no altere el equilibrio geoquímico del sistema.

Este método se viene empleando desde los años sesenta en el IAEA-MEL y en muchas otras instituciones de todo el mundo para investigar la distribución de las trazas metálicas entre los sedimentos y el agua de mar y la incorporación biológica de los metales. Como resultado de esta labor, en 1985 se publicó una compilación de los coeficientes de distribución sedimentos/agua de mar y los factores de concentración biológica de una amplia gama de elementos, radiactivos y no radiactivos. La importancia de estudiar estas interacciones no está dada por un interés académico. La adsorción de los metales en partículas en suspensión en el agua de mar y

Los estudios sobre la contaminación marina suelen incluir el uso de técnicas nucleares e isotópicas. (Cortesía: Kurt Adams, PNUMA-SELECT)



su ulterior deposición en el fondo marino es el mecanismo que rige la autopurificación de los océanos. Este proceso mantiene la concentración de muchos de los metales tóxicos presentes en el mar por debajo de niveles que dañarían la integridad del ecosistema marino o que tendrían efectos nocivos sobre las personas que consumieran pescado o mariscos. El conocimiento cuantitativo de la capacidad del mar para asimilar contaminantes permite contar con una base científica para establecer niveles de descarga de efluentes en el medio marino desde tierra.

En las investigaciones que se realizan actualmente con compuestos marcados se aplican tres métodos generales de grandes posibilidades de desarrollo futuro:

- **Continuación de los experimentos de laboratorio con contaminantes inorgánicos usando un microcosmos controlado (sedimento-agua, agua-animales, agua-sedimento-animales).** Todavía queda mucho por hacer para poder comprender los mecanismos y la dinámica de la acumulación de los metales en las plantas y los animales marinos, en particular la capacidad de éstos para removilizar y acumular biológicamente los metales que llegan al fondo marino a causa de su adsorción en partículas descendentes, o de resultados de la evacuación de desechos (vertimiento). El IAEA-MEL fue el primero en realizar muchos de estos estudios, que dieron lugar a más de 100 publicaciones científicas. El programa de contratos de investigación del Organismo también ha apoyado la ulterior realización de trabajos sobre los fenómenos físico-químicos de las interacciones agua de mar-sedimentos en instituciones nacionales. Estos trabajos han permitido comprender mucho mejor la termodinámica y la

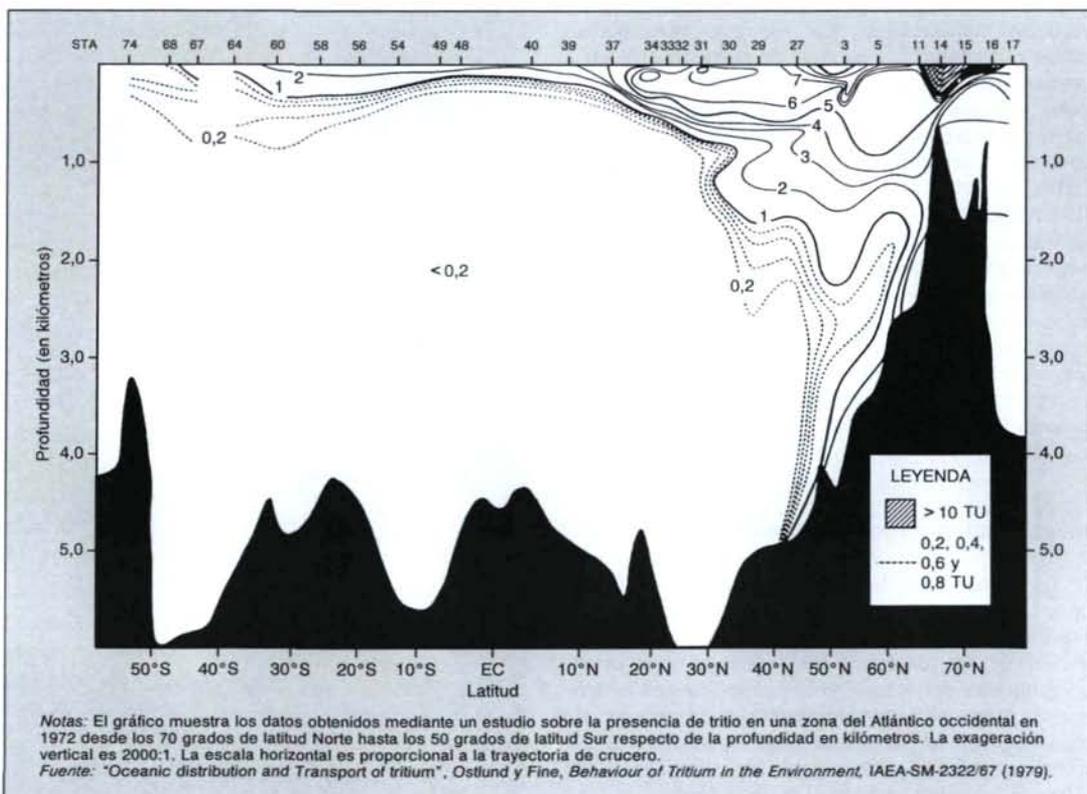
cinética de los procesos de adsorción, así como elaborar modelos más precisos para la descripción y el pronóstico de la dispersión de los metales contaminantes (incluidos los radionucleidos) en condiciones ambientales reales.

- **Desarrollo de técnicas de trazadores para los compuestos orgánicos.** Hace sólo unos años que se comenzó a investigar ampliamente el uso de compuestos orgánicos marcados en experimentos del tipo descrito supra realizados en el medio marino. Además de que permiten estudiar la interacción de estos compuestos con componentes bióticos y abióticos del medio ambiente, los experimentos bien concebidos permiten investigar la degradación de los propios compuestos. (Véase en este número el artículo relacionado con las aplicaciones de estas técnicas en los estudios de plaguicidas.) La clave para tener más éxito con este método en el futuro radicará en la preparación mediante química orgánica de análogos marcados de los muchos cientos de contaminantes orgánicos que constituyen una amenaza potencial para los medios marino y costero.

- **Experimentos de liberación de trazadores en el medio marino.** Para vigilar la dispersión de los materiales tóxicos que salen por las desembocaduras de efluentes (tuberías para el vertimiento de desechos en el océano) situadas a gran profundidad, es preciso realizar estudios *in situ* y tantas mediciones como sea posible en un tiempo corto. Lamentablemente, la medición química de la mayoría de los contaminantes es laboriosa y requiere tiempo, por lo que conviene añadir al propio efluente un trazador que pueda medirse fácilmente.

Antes se utilizaban mucho los trazadores de gran fluorescencia, como la rodamina, pero son elemen-

**Presencia de tritio en el Atlántico occidental en 1972**



tos carcinógenos que se descomponen con relativa lentitud. Otra opción es liberar radionucleidos de período corto que emitan rayos gamma y vigilar su distribución mediante espectrometría gamma submarina, desde una embarcación pequeña o incluso desde un helicóptero. Este método es muy utilizado por la Comisión de Energía Atómica de Francia (CEA) para estudiar la eficiencia de las desembocaduras de aguas residuales en el Mediterráneo. El sistema de la CEA emplea como trazador al oro 198 (período de semidesintegración de 2,7 días). El oro aniónico en solución se convierte irreversiblemente en oro metálico cuando entra en contacto con materiales sólidos y, por tanto, marca las partículas sólidas de los efluentes con independencia del tamaño. La técnica permite localizar las partículas en la columna de agua y, al cabo de una semana, en su lugar de deposición en el fondo marino. (Véase la figura.) El OIEA está ensayando sistemas similares en los que se emplean granos de arena marcados con iridio 192 (período de semidesintegración de 74 días).

**Investigaciones biogeoquímicas y estudios de la contaminación**

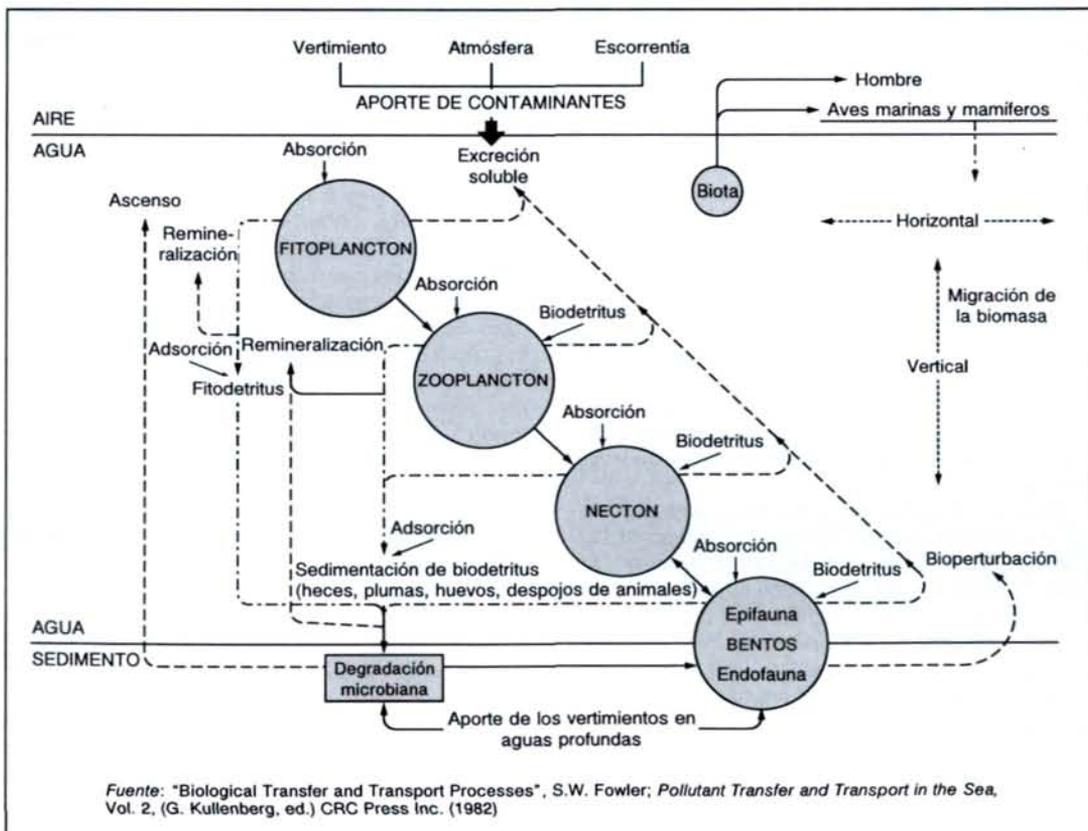
Los isótopos estables de un mismo elemento presentan pequeñas diferencias físicas intrínsecas en sus propiedades atómico-moleculares. En los procesos ambientales naturales esto suele provocar la selección preferencial de un isótopo con respecto a otro. Estas separaciones (en especial entre los isótopos de hidrógeno, carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre)

pueden ser muy útiles para investigar los procesos físicos, químicos y biológicos naturales y obtener una información biogeoquímica que es indispensable para comprender el comportamiento ambiental y el ciclo de los contaminantes.

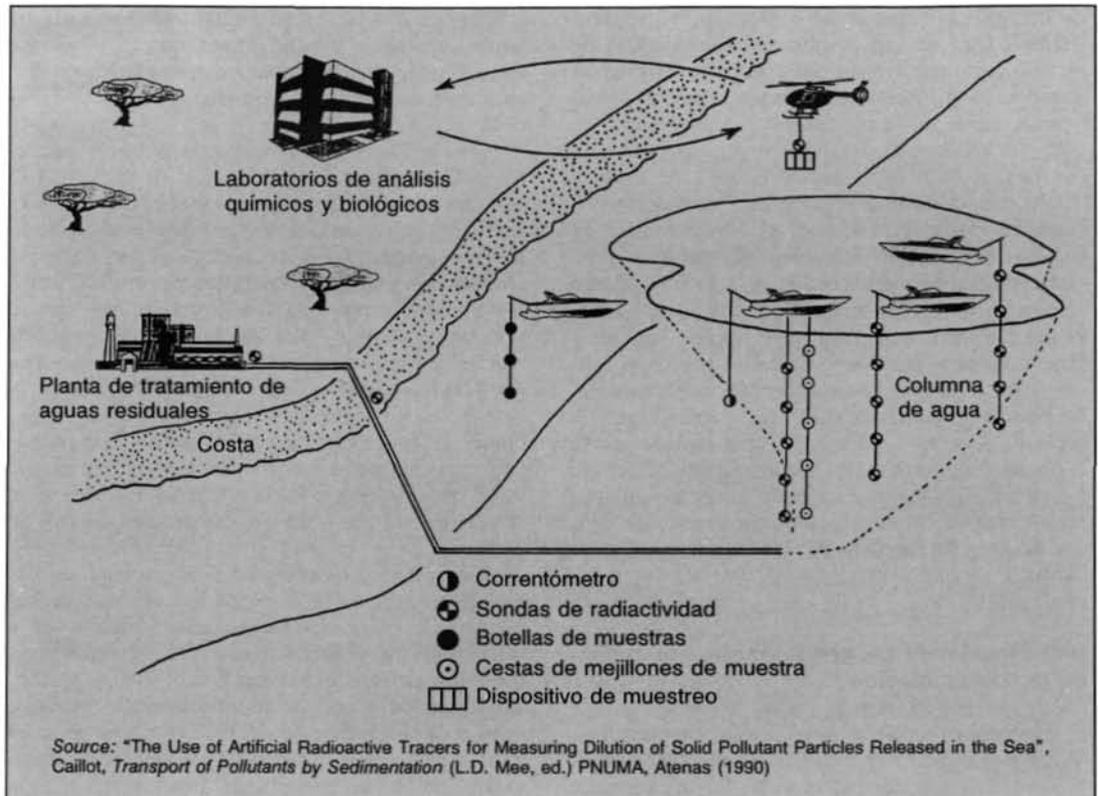
Las mediciones combinadas de muestras naturales para determinar su abundancia de carbono 13-carbono 12 y de nitrógeno 15-nitrógeno 14 han resultado útiles para identificar fuentes de materia orgánica marina, fuentes nutricionales para las redes alimentarias marinas y las relaciones tróficas entre los organismos marinos. Las investigaciones que se realizan en el IAEA-MEL han arrojado luz sobre los mecanismos de incorporación y las interrelaciones entre las comunidades de plancton que constituyen la base de la red alimentaria marina. Otras investigaciones en las que participa el Laboratorio han permitido conocer mejor los aportes autóctonos y autóctonos que ingresan a los ecosistemas marinos y las relaciones tróficas que se desarrollan dentro de éstos.

Una esfera potencialmente importante de las investigaciones sobre la contaminación que probablemente se desarrollará en los años venideros es la relacionada con el hecho de que el nitrógeno contenido en los fertilizantes se reduce en el isótopo pesado. En los estudios de la eutroficación (el aumento inusual de la fertilización del mar) esto constituye un valioso método para diferenciar las fuentes de fertilizantes. Se ha reconocido que la eutroficación es la más importante fuente de perturbación del medio marino producida por las actividades del hombre. Como es imposible diferenciar químicamente los nutrientes "naturales" de los "artificiales", la téc-

**Transferencia y transporte de los contaminantes marinos mediante procesos biológicos**



Principio aplicado en los experimentos sobre el terreno para estudiar la eficiencia de los conductos que llevan las aguas residuales al océano



nica isotópica brinda la posibilidad excepcional de poder evaluar la importancia de las fuentes de nutrientes situados en tierra y, a la larga, de controlarlas.

#### Datación de calas de sedimentos

No fue sino hasta el siglo pasado que el hombre comenzó a contaminar considerablemente su entorno. Este hecho coincide con el desarrollo de la industrialización, los progresos tecnológicos alcanzados, y el uso de los combustibles fósiles. En el caso de muchos contaminantes —como, por ejemplo, los metales pesados y los compuestos orgánicos hidrofóbicos— presentes en medios acuáticos, estos elementos o compuestos se enlazan con partículas de materia. Por consiguiente, los sedimentos que se depositan constituyen un repositorio y cuando los contaminantes se entierran allí suelen quedar atrapados y se estabilizan (particularmente en condiciones anóxicas).

En esas circunstancias se puede obtener una cala del sedimento y calcular la tasa de sedimentación mediante técnicas geocronológicas adecuadas. El plomo 210 (un derivado de la serie de desintegración natural del uranio 238 cuyo período es de 22,4 años) ha resultado ser el nucleido más utilizado en los estudios geocronológicos realizados para investigar historiales de contaminación. La actividad del plomo puede analizarse en toda la cala del sedimento por secciones que deberán representar un intervalo de 22,4 años. Después, estas capas se pueden analizar para buscar los contaminantes de interés y determinar su flujo y deposición en el tiempo.

La datación puede confirmarse mediante la vigilancia de los nucleidos artificiales asociados a los ensayos de armamentos (se suele seleccionar el cesio 137). Estos elementos-isótopos alcanzaron concentraciones máximas en 1963 aproximadamente. Aunque la bioperturbación de los sedimentos puede hacer que los materiales se mezclen dentro de las calas, el método descrito se ha usado con éxito para evaluar el historial de aportes de trazas metálicas, plaguicidas, bifenilos policlorados, hidrocarburos saturados (petróleo) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HPA).

La datación de una cala de sedimentos procedentes de un estuario del Reino Unido proporcionó un ejemplo de la evolución histórica de la contaminación con plomo e hidrocarburos aromáticos policíclicos producida por la combustión de combustibles fósiles. (Véase el gráfico de la página siguiente.) Este ejemplo demuestra el drástico aumento que se registró en la liberación de estos contaminantes durante los últimos decenios.

#### Técnicas isotópicas para la identificación de los petróleos

La génesis de los petróleos produce una amplia gama de señales isotópicas que, en general, difieren notablemente de las composiciones isotópicas del medio natural marino actual. Las relaciones de los isótopos estables del carbono han sido muy útiles para la exploración del petróleo y el conocimiento de los procesos de formación.

Aunque el azufre y el nitrógeno están presentes en los petróleos en menor cantidad que el carbono,

se ha demostrado que su abundancia isotópica también refleja la fuente y la evolución geológica de la formación. Por consiguiente, también proporcionan relaciones concretas petróleo/yacimiento. Las relaciones isotópicas características de estos elementos se pueden aprovechar para identificar los petróleos derramados en el medio ambiente y determinar su fuente o fuentes. Se ha comprobado mediante estudios que las composiciones isotópicas son comparativamente resistentes al cambio durante la exposición a la intemperie del petróleo en el entorno marino.

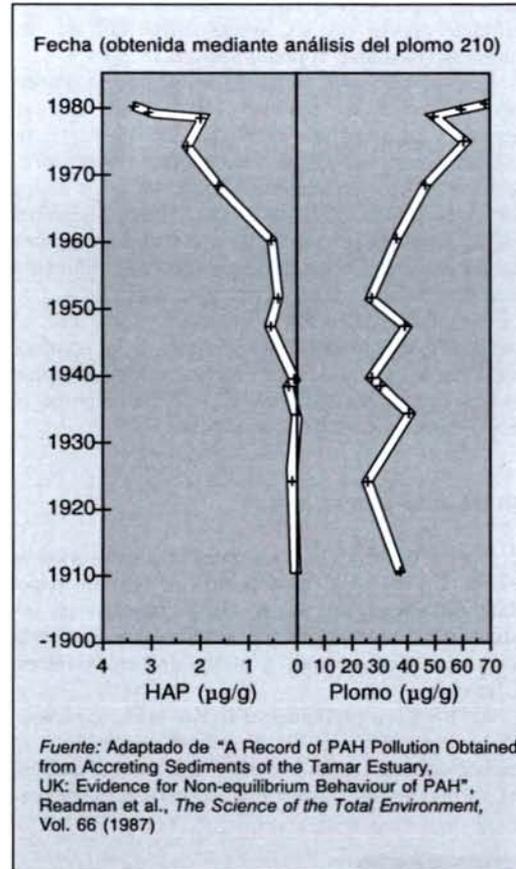
Recientemente, el IAEA-MEL utilizó relaciones de isótopos estables junto con técnicas de identificación no nucleares (incluida la espectrofotometría de fluorescencia, la cromatografía en fase gaseosa capilar-detección mediante ionización por llama y la cromatografía en fase gaseosa capilar-espectrometría de masas) para investigar el grado de contaminación del medio marino del Golfo tras el derrame de petróleo en gran escala ocurrido durante la Guerra del Golfo. (Véase en el presente número el artículo relacionado con este tema.)

Además de los isótopos estables, existe la posibilidad de que las mediciones del carbono 14 proporcionen información sobre la contaminación por petróleo. La materia orgánica derivada del petróleo no aporta señal alguna de carbono 14 a la actividad específica del carbono orgánico marino actual (que es 261 mBq/g) ni a la actividad del carbono en la materia terrestre actual (271 mBq/g), la cual todavía es, por consiguiente, mayor que la actividad específica natural de referencia en el 20% aproximadamente debido a la reciente influencia de los ensayos de armas nucleares. A causa de una combinación de factores, las reservas de materia orgánica marina de las costas están casi desprovistas de carbono 14. Sin embargo, la señal nula de carbono 14 que resulta de la contaminación por petróleo (debida a la desintegración completa ocurrida durante la formación geológica del petróleo) debería proporcionar una indicación cuantitativa útil de la contribución del carbono contenido en el petróleo a la materia orgánica marina total.

### Técnicas de marcación en "biología molecular"

Aunque la presencia de muchos contaminantes en el medio ambiente se puede cuantificar empleando técnicas de análisis químico, siempre surge la pregunta: "¿Pueden estos niveles tener efectos biológicos nocivos?"

En los últimos años muchos trabajos se han centrado en la evaluación de las relaciones entre la exposición a los contaminantes y las consecuencias biológicas observadas en los organismos marinos. Las mediciones de la exposición subaguda han incluido investigaciones sobre cambios citológicos, la inducción de enzimas y la cuantificación de aberraciones cromosómicas. En los últimos tiempos se ha dirigido la atención hacia los compuestos "genotóxicos", que son los contaminantes que dañan el ADN, y, por tanto, podrían crear las condiciones para la inducción del cáncer. Estos compuestos incluyen los hidrocarburos aromáticos poli-



Distribución del plomo y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en una cala de sedimentos obtenida en el Reino Unido

cíclicos y los bifenilos policlorados, que son dos tipos de contaminantes ambientales ubicuos.

Se considera que la fase inicial decisiva de la carcinogénesis química es la modificación química del ADN. Ello suele entrañar un enlace del contaminante orgánico (o su metabolito "activo") con el ADN. Se requieren técnicas ultrasensibles para poder detectar niveles bajos del enlace de un agente carcinógeno con el ADN. Los métodos de post-marca con fósforo 32 concebidos para los análisis de la composición básica y la secuenciación de los ácidos nucleicos han demostrado ser particularmente acertados para investigar la aducción de un elemento carcinógeno con respecto al ADN. La técnica ha sido eficaz para determinar las aducciones derivadas de la exposición ambiental de bajo nivel. Los científicos han demostrado que en algunos organismos marinos la aducción perdura algunos meses, lo que permite obtener información sobre la exposición de los organismos a los productos químicos carcinógenos.

### Análisis por activación neutrónica

Los análisis por activación neutrónica (AAN) son una de las técnicas más sensibles y precisas que existen para la medición de trazas metálicas en matrices sólidas. Por ende, pueden aplicarse fácilmente al estudio de muchas trazas metálicas en matrices marinas. El hecho de que activa los principales componentes de la propia sal marina limita su utilidad en los análisis del agua de mar; no obstante,

estos últimos se facilitan mucho con la separación química previa de las trazas metálicas de las muestras (mediante coprecipitación).

Lamentablemente, muchas instituciones no tienen fácil acceso a las costosas instalaciones que se requieren para realizar el AAN. Sin embargo, su utilidad como técnica de referencia es bien aprovechada en los ejercicios de intercomparación de los Servicios de Control de la Calidad de los Análisis del OIEA. La participación de más de 20 instituciones que aplican el AAN ayuda a asegurar una calibración exacta de los materiales de referencia del OIEA, que son utilizados por cientos de analistas en todo el mundo. De esta manera los beneficios de las técnicas nucleares se extienden a las muchas instituciones que no poseen los recursos técnicos ni financieros necesarios para aplicarlos habitualmente.

Los desafíos a que tiene que hacer frente la sociedad humana crecen cada día y es preciso continuar desarrollando nuevos y mejores métodos para evaluar, pronosticar, y minimizar las consecuencias que tiene el desarrollo humano para el medio ambiente natural.

### Un desafío permanente

Los pocos ejemplos seleccionados para esta breve reseña sirven para ilustrar el importante papel desempeñado ya por las técnicas nucleares en los estudios de la contaminación marina (así como en la oceanografía en general), y el que desempeñarán en el futuro.

El OIEA, en particular el IAEA-MEL, ha trabajado durante más de 30 años en el desarrollo y la promoción de técnicas nucleares aplicadas al estudio del medio marino, labor que no terminará nunca.

Recolección de organismos marinos frente a las costas de Mónaco.  
(Cortesía: IAEA-MEL)

