

ESTUDIOS MARINOS CONJUNTOS DEL OIEA Y LA UNION EUROPEA ASOCIACION EN EL MEDITERRANEO

POR SCOTT FOWLER, JUAN-CARLOS MIQUEL Y FLORENCE BOISSON

El Mar Mediterráneo es una masa de agua sui generis, desde perspectivas culturales y socioeconómicas. Como parte integrante de la cuna de la civilización occidental, ha servido, durante mucho tiempo, como sistema sustentador de la vida de la población humana, desde el punto de vista de la nutrición y como medio utilizado para el comercio y el intercambio. Actualmente, es el hogar de millones de personas que habitan, de forma permanente, sus zonas costeras y es lugar de los millones de personas que afluyen a sus costas en diferentes épocas del año con fines recreativos.

Inevitablemente, estas actividades humanas han provocado tensión ambiental y contaminación, que posiblemente repercutan en el funcionamiento de este vital ecosistema marino.

Diversas características oceanográficas y geográficas del Mar Mediterráneo contribuyen a que éste sea, en particular, vulnerable a los efectos potenciales de los contaminantes antropógenos. Este Mar es una masa de agua relativamente poco profunda y semicerrada, cuyo único intercambio de agua limitado se produce en el Estrecho de Gibraltar y a través del Bósforo. Las aguas superficiales menos salinas del Atlántico entran por Gibraltar y circulan con lentitud alrededor de la cuenca del Mediterráneo en sentido contrario al de las manecillas del reloj. Allí, se calientan gradualmente y aumentan su salinidad debido a

la insolación y a la intensa evaporación. Los débiles sistemas de corrientes costeras y la ausencia general de mareas contribuyen a reducir la dispersión de contaminantes que entran a las aguas de su litoral. Por otra parte, la reciente construcción de presas en algunos de los ríos principales ha reducido considerablemente la escorrentía de primavera, que sirve para eliminar los contaminantes depositados en la plataforma.

Además de estas excepcionales características físicas del Mar Mediterráneo, gran parte de sus aguas contiene muy pocos nutrientes y una vida marina, por lo general, empobrecida. (Véase el mapa.) Es por ello que un trastorno significativo de su limitada productividad potencial pudiera dañar a largo plazo el ecosistema.

Dada la especial ubicación geográfica del Mar y su sensibilidad potencial a la actividad humana, no resulta sorprendente que durante los últimos diez años se hayan dedicado numerosos esfuerzos al estudio de su estructura y funcionamiento biogeoquímico. Además, la limitada extensión del Mar ofrece a los especialistas en ciencias del mar la oportunidad de estudiar, a escala reducida, procesos típicos de los océanos del mundo. Las últimas tendencias observadas en la oceanografía han demostrado que nuestra comprensión sobre estos procesos aumenta significativamente cuando los interrogantes se abordan de forma multidisciplinaria.

Conscientes de este hecho, la Unión Europea (UE) ha elaborado diversos programas marinos multidisciplinarios a gran escala, algunos de los cuales se han concentrado en el Mar Mediterráneo. Debido a su larga historia de trabajo conjunto en el Mediterráneo, diversos institutos asociados de la Unión Europea han invitado al Laboratorio del OIEA para el Medio Ambiente Marino (MEL), en Mónaco, a participar en estos programas, generalmente en lo que respecta al empleo de técnicas nucleares para estudiar los principales procesos oceánicos. Estos programas, respaldados por la Unión Europea, han contribuido a que el MEL amplíe su base de fondos extrapresupuestarios, que a menudo se necesitan para ejecutar programas ordinarios, aprobados por el OIEA, referidos a cuestiones del medio ambiente marino.

A este respecto, en el decenio de 1990 el MEL ha participado muy activamente en el estudio de los procesos oceánicos en el Mar Mediterráneo, que resultan cruciales para comprender el transporte y destino final de los radionucleidos y otros contaminantes. En el presente artículo se destacan las principales actividades emprendidas por el MEL.

El Sr. Fowler es jefe del Laboratorio de Radioecología, y el Sr. Miquel y la Sra. Boisson son funcionarios del laboratorio, dependencia del Laboratorio del OIEA para el Medio Ambiente Marino en Mónaco.

ESTUDIO SOBRE LA HISTORIA DE LA CONTAMINACION

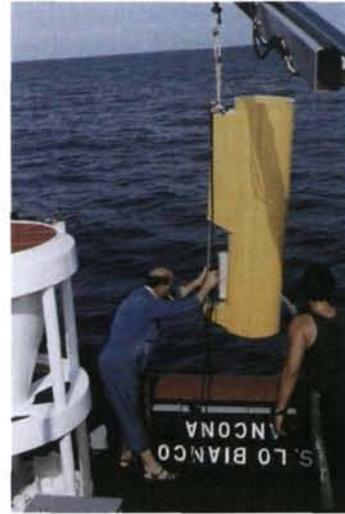
En una de las esferas de estudio, el MEL utilizó su capacidad técnica en el programa ELNA (Límites eutróficos en el norte del Adriático), patrocinado por la Unión Europea. Una de las tareas del MEL fue determinar el historial de los diversos contaminantes que afectan a la región septentrional del Adriático.

El método seleccionado fue establecer la edad de las calas de sedimentos utilizando técnicas nucleares, y comparar después las tasas de sedimentación obtenidas con los niveles de contaminantes medidos en las diferentes capas de sedimentos acumuladas con el paso del tiempo. La técnica nuclear más frecuentemente utilizada en estos estudios geocronológicos es seguir la desintegración del plomo 210 proveniente de la atmósfera, una vez depositado en los sedimentos. La hipótesis inicial que se obtiene con esta técnica es que la desintegra-

ción radiactiva del plomo 210 depositado (período de semidesintegración física de 25 años) es la única responsable de que su concentración disminuya con la profundidad. De hecho, el plomo 210 en los sedimentos se computa midiendo directamente su descendiente radiactiva de segunda generación, el polonio 210. A partir del índice de acumulación de la masa seca, puede entonces calcularse la tasa de sedimentación en centímetros por año si se conoce la porosidad y densidad del sedimento.

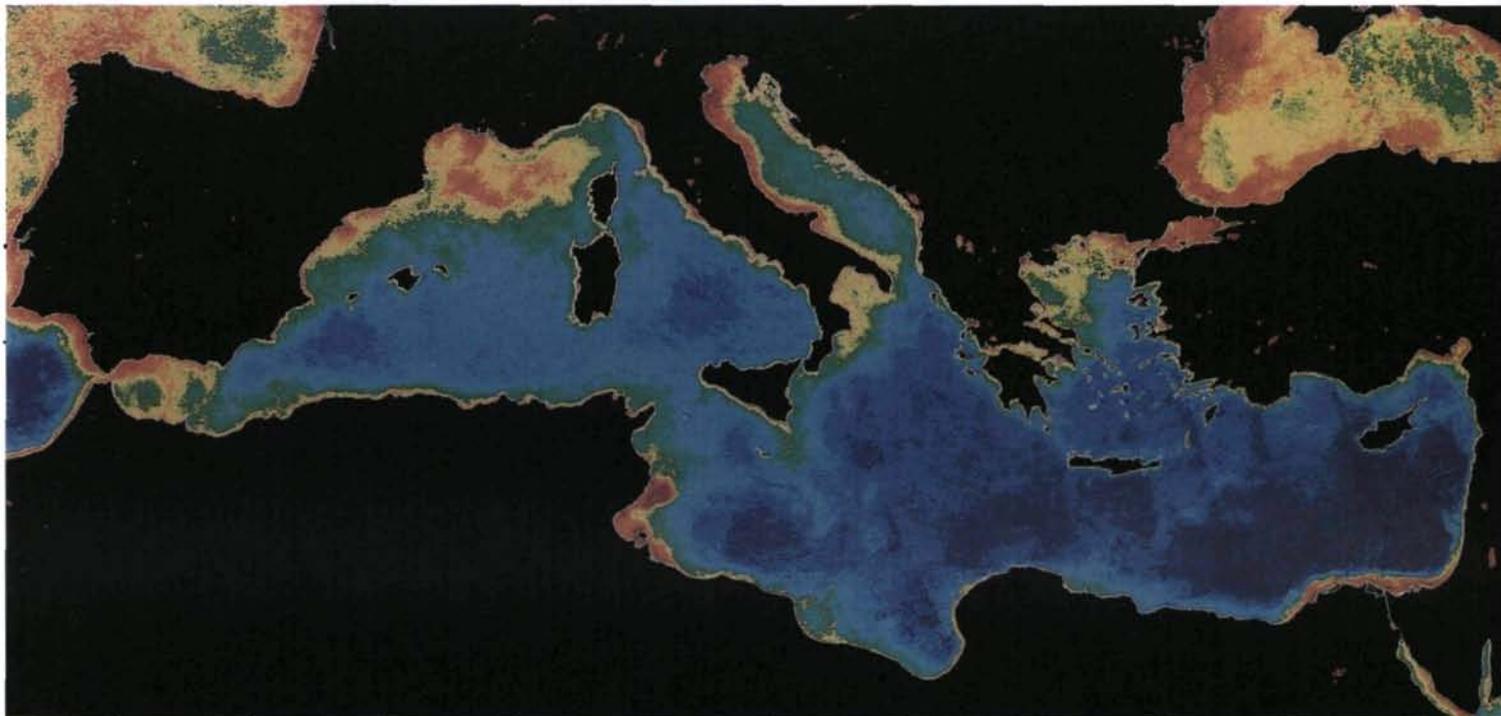
Mercurio y contaminantes de bifenilos policlorados

Cerca de la desembocadura del río Po en Italia, se encontraron tasas de sedimentación relativamente altas características de esta zona costera. Como se conoce que la descarga del río Po es una fuente principal de



contaminantes terrestres en el norte del Adriático, se analizó la cala del sedimento tomada cerca del río Po para detectar dos contaminantes clave en el Mediterráneo: el mercurio y los bifenilos policlorados.

Fotos: Arriba, los especialistas despliegan un colector de sedimentos automatizado en el Mar Adriático. Abajo, las imágenes a color de barrido en el Mar Mediterráneo indican las zonas de elevada productividad (en naranja y amarillo) y las de baja productividad (azul) durante la primavera. (Cortesía: Miquel/MEL; NASA Goddard Space Flight Center.)



Los perfiles de las mezclas de bifenilos policlorados comunes muestran que los valores máximos se depositaron hace ya entre 20 y 27 años aproximadamente. Este marco cronológico se corresponde exactamente con el período de mayores ventas de bifenilos policlorados, en 1969 y 1970. Por otra parte, no fue hasta 1929 que los bifenilos policlorados comenzaron a producirse con fines comerciales. Los perfiles también indican una disminución rápida en los bifenilos policlorados en los horizontes de 18 a 20 centímetros. Esto coincide justamente con la fecha en que cabría esperar que estos compuestos entraron por primera vez en el medio ambiente.

En el caso del mercurio, la concentración absoluta suele relacionarse con el contenido orgánico del sedimento. Se obtuvo un perfil para la misma cala de sedimentos, tomada en la desembocadura del Po, de concentración de metilmercurio normalizado al contenido de carbono orgánico particulado. La interpretación de estos perfiles resulta compleja y difícil. Sin embargo, existen dos niveles máximos evidentes de concentración a profundidades de entre 8 y 10 centímetros y de entre 20 y 22 centímetros.

En general se carece de información sobre el metilmercurio en el Adriático. Entre las mediciones realizadas por el MEL destaca el hecho de que tanto las concentraciones de metilmercurio como las totales llegan a un máximo en horizontes de profundidad de 20 a 22 centímetros, lo que aproximadamente se corresponde con un período de 77 a 85 años antes de que se recogiera la cala. Esta relación sugiere que estos niveles máximos coinciden precisamente con el año de más alta producción de mercurio (1913). En esa fecha, la mina de Idria ubicada en las cercanías del río Isonzo produjo el doble de la cantidad media de mercurio que

la obtenida en cualquier otro año.

Esos estudios multidisciplinarios —que utilizan lo que se supone sean sedimentos— mayormente inalterados demuestran que el empleo del reloj de tiempo físico de un radionucleido natural depositado en el lecho marino puede convertirse en un eficaz instrumento para describir el registro histórico de los contaminantes marinos vinculados a las actividades humanas.

COMPRESION DE LOS PROCESOS MARINOS

Desde 1996, el MEL ha venido colaborando con el proyecto UEMAST (Ciencia y Tecnología Marinas) denominado "Flujos hidrotermales y producción biológica en el Mar Egeo", en la cuenca oriental del Mediterráneo.

El Mar Egeo es una zona de elevada actividad sísmica y geotérmica. La Isla de Milos se caracteriza por tener unos 35 km² de lecho marino con actividad geotérmica en las aguas someras circundantes por donde se liberan grandes volúmenes de gas libre, fosfato y manganeso.

Aún queda mucho por conocer sobre el ciclo geoquímico y la producción biológica basada en la quimiosíntesis en estas chimeneas poco profundas, sobre todo la importancia de éstas en la producción y exportación de material orgánico particulado.

Uno de los objetivos principales del MEL en el programa fue caracterizar y cuantificar la exportación de carbono orgánico particulado de la zona eufótica en las cercanías de las chimeneas hidrotermales. Esto se logró mediante estudios a largo plazo de las partículas de material en sedimentación, mediciones de la columna de agua y análisis del sedimento del fondo.

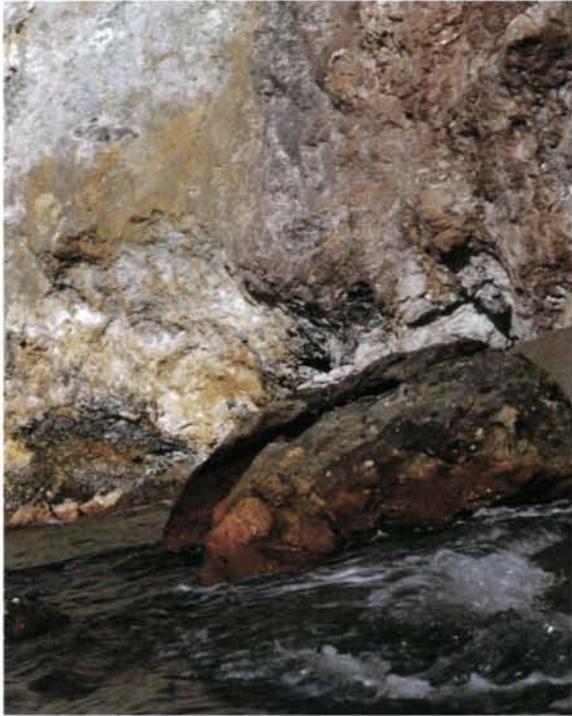
Viajes de estudio a la Isla de Milos. Durante el período de 1996 y 1997, se organizaron tres viajes de estudio a la costa sur de la Isla de Milos para tomar mues-

tras de partículas de sedimentación y sedimentos, así como desplegar y recoger series de colectores de sedimentos y correntómetros anclados. Los colectores de sedimentos de "serie cronológica" recogieron partículas que circulaban a una profundidad de 60 metros durante el verano en tres sitios ubicados a lo largo de una línea transversal desde una zona de chimenea hasta una zona libre de cualquier influencia importante de este tipo.

En estos tres sitios, en ocho cubetas de muestras se recogieron partículas en secuencia, cada una en un período de 12 días. Los flujos de partículas a determinada distancia del emplazamiento de chimenea resultaron evidentemente diferentes a los flujos de la zona de chimenea donde se producen las emisiones. Durante la mayor parte del tiempo, en la zona de chimenea, se produjeron y exportaron más partículas, en uno o dos órdenes de magnitud, que en los sitios intermedio y de control. En todas las estaciones, los flujos resultaron comparables sólo durante un breve período a mediados del verano. En períodos de máxima sedimentación, el material orgánico fue entre 30 y 100 veces más significativo en la zona de chimenea.

Los colectores de sedimentos se desplegaron a lo largo de sólo 3,5 millas náuticas durante el verano de 1996. Sin embargo, las partículas de sedimentación fueron diferentes en cada sitio no sólo en cuanto a cantidad sino también a su composición.

La mayoría de las muestras estaban compuestas fundamentalmente por restos de zooplancton (partes de esqueletos de animales, exoesqueletos y una amplia variedad de pelotillas fecales). No obstante, las muestras del mes de septiembre tomadas en el emplazamiento de chimenea fueron completamente diferentes a todas las demás muestras, y estaban mayormente compuestas por diminutas pelotillas fecales alar-



gadas y de color marrón oscuro, muy homogéneas en tamaño y forma. La última muestra recogida estaba compuesta casi exclusivamente por este tipo de material fecal. Asimismo, hubo presencia de bacterias marinas en todas las muestras, aunque fueron más abundantes en las partículas provenientes del emplazamiento de chimenea. Su contribución al flujo del carbono no fue significativa (<1%), salvo a mediados del verano, cuando los flujos de masa fueron muy bajos.

Las bacterias termofílicas asociadas a la chimenea hidrotermal se identificaron mediante análisis del ADN sólo en las muestras tomadas en los emplazamientos de chimeneas. Por tanto, la producción de carbono y su exportación posterior hacia los sedimentos en la zona de chimeneas fue considerablemente más importante que en los alrededores de la zona muestreada. Las partículas eran mayormente de origen pelágico y portaban un evidente marcador bacteriano de origen hidrotermal.

Procesos de transporte de partículas. Durante estos experimentos de campo en el Mar Egeo, se emplearon las diferentes químicas del par de radionucleidos naturales, polonio 210 y plomo 210, con el objetivo de estudiar los procesos del transporte de partículas en una zona de chimeneas hidrotermal de aguas someras. El polonio está presente en el medio ambiente marino, debido principalmente a la desintegración del plomo 210 después de la deposición atmosférica y del desprendimiento de gases de radón desde formaciones de chimeneas submarinas y los sedimentos. Si las chimeneas actúan como una fuente de aguas hidrotérmicas ricas en polonio 210 y su progenitor, el plomo 210, entonces cabría esperar que las partículas en la zona de chimeneas también estén enriquecidas con estos radionucleidos. Por tanto, en el verano de 1996 se recogieron partículas en profundidades someras (60 metros) en cuatro ocasiones diferentes.

A partir de los datos obtenidos mediante los colectores no hubo indicios de que el medio rico en azufre observado en las cercanías de las chimeneas estuviera afectando las concentraciones de polonio 210 en las partículas de sedimentación. Las concentraciones de polonio 210 fueron del mismo orden que las concentraciones en el Po previamente informadas respecto del material recogido en los colectores de sedimentos durante el verano en la costa noroccidental del Mediterráneo, lejos de cualquier influencia de las chimeneas.

Asimismo, el plomo 210 no mostró ningún aumento en las

Foto: A lo largo de las costas de la Isla de Milos, pueden apreciarse depósitos de hierro (marrón) y azufre (amarillo) en una zona de actividad geotérmica. En los yacimientos hidrotermales someros del Mar Egeo, una cámara subacuática capta anillos de precipitados químicos y capas bacterianas en una zona, y en otra, muestra a los científicos que el gas (principalmente CO₂) emana del sedimento del fondo. (Cortesía: MiquelMEL)

partículas originadas en la zona de chimeneas. De hecho, las partículas procedentes del "sitio de control" contenían más plomo 210 que las de la zona del respiradero.

El comportamiento del polonio 210 en el océano es diferente al del plomo 210, especialmente debido a que el primero tiene una mayor afinidad con la materia orgánica. Por tanto, la naturaleza y las fluctuaciones de la proporción relativa de las fracciones orgánicas e inorgánicas de las partículas descendentes pueden tener mayor influencia sobre los niveles de polonio 210 y plomo 210 que las propias dinámicas de la chimenea.

También se compararon los flujos verticales del polonio 210 y el plomo 210 en los dos emplazamientos. Resulta evidente que las series de flujos verticales de partículas de estos dos radionucleidos son, como promedio, superiores en la zona de chimeneas. Esto no se debe a las elevadas concentraciones de radionucleidos en las partículas de sedimentación cerca de las chimeneas, sino más bien a un mayor flujo de partículas en la zona de las emisiones. Evidentemente, la productividad y la precipitación resultantes de partículas biogénicas aumentan cerca de las chimeneas, lo que, a su vez, incrementa el flujo descendente de los radionucleidos. Por ende, las chimeneas pueden regular indirectamente el flujo de radionucleidos al influir sobre el tipo y las cantidades de partículas producidas localmente, por ejemplo, en las zonas de chimeneas hidrotermales.

En el singular ecosistema de Milos, los elevados regímenes de reducción y oxidación del azufre se asocian a las chimeneas. Dadas las características químicas similares del azufre y el polonio, cabría esperar que estas chimeneas ricas en azufre tengan un contenido muy alto en polonio. Sería lógico esperar que ello quizás ele-

ve los niveles de polonio en la alimentación de la biota en las zonas adyacentes.

En realidad, había abundancia de flóculos bacterianos alrededor de las chimeneas, y se observó que los caracoles de mar solían alimentarse de las capas bacterianas blanquecinas presentes en las aguas poco profundas. En las partes blandas de estos organismos se midieron el polonio 210 y el plomo 210, a fin de determinar un posible aumento de sus niveles respectivos, y para evaluar la resultante transferencia de estos importantes radionucleidos naturales en la cadena alimentaria marina.

Resultó interesante constatar que el contenido de polonio 210 y plomo 210 fue similar a los valores medios calculados a partir de varios cientos de datos extraídos de la literatura sobre organismos no ubicados en las chimeneas y, más específicamente, fueron inferiores a la concentración medida en gusanos de las chimeneas hidrotermales de aguas profundas que habían ingerido partículas minerales de sulfuro, ricas en polonio 210. Por tanto, la ingestión de bacterias asociadas a las capas minerales en Milos no parece tener una influencia significativa en las concentraciones de polonio 210 y plomo 210 en estos gasterópodos.

Los estudios del MEL, descritos en el presente artículo, son los primeros esfuerzos realizados en el Mar Mediterráneo para cuantificar los flujos verticales y el ciclo de los materiales, así como los radionucleidos naturales asociados a las zonas de chimeneas hidrotermales en aguas poco profundas.

EVALUACION DE LOS EFECTOS DE LA CONTAMINACION

El MEL también participó activamente en el programa denominado Sistema Fluvial y Oceánico de Europa (EROS 2000) patrocinado

por el MAST de la Unión Europea. El programa se propuso evaluar los efectos de las fuentes de contaminación fluviales y terrestres en los ecosistemas de la plataforma europea.

Se emprendió un crucero de muestreo a bordo del buque francés Marion Dufresne entre la parte central de la cuenca noroccidental del Mediterráneo y la región cercana al río Ebro en España. Uno de los objetivos era medir las tasas de sedimentación de materiales biogénicos (carbono, nitrógeno, pelotillas fecales, organismos intactos) y no biogénicos (radionucleidos, tierra rara y otros elementos) utilizando colectores de sedimentos anclados y flotantes. También se efectuaron diversas mediciones de la columna de agua, incluidos los restos de fitoplancton y zooplancton en suspensión, con el objetivo de establecer un vínculo entre las muestras de los colectores de sedimentos y los procesos en el mar abierto, que regulan el flujo vertical y la composición de la materia particulada.

Utilizando cuatro colectores automatizados de sedimentos anclados en la cuenca noroccidental abierta del Mediterráneo a profundidades de 200 a 2000 metros, y tomando muestras a intervalos de dos semanas, se detectó la sedimentación de una proliferación de fitoplancton en el lecho de mar profundo durante el mes de mayo. Las muestras recogidas en los colectores durante este período estaban compuestas, mayormente, por dos especies de fitoplancton. Con toda probabilidad, la proliferación, que utilizó nutrientes mezclados ascendentemente por los fuertes vientos de mediados de abril, se sedimentó una vez agotados los nutrientes en las aguas superficiales. Los resultados de los colectores demostraron un rápido hundimiento (>140 metros/día) de partículas de material rico en carbono en toda la columna de agua hasta el

fondo marino. Durante esta sedimentación "por impulsos" detectada en el mes de mayo, el flujo de partículas a 200 metros fue de tres a cuatro veces mayor que en los períodos anteriores o posteriores. Estos impulsos fueron incluso más significativos en las profundidades, con flujos de partículas de seis a diez veces superiores durante el período de sedimentación máximo y de diez a treinta veces superiores en el caso del flujo del carbono.

En las mismas muestras se analizaron las pelotillas fecales del zooplancton, otro vehículo importante de transporte, mediante un sistema computarizado de análisis de imágenes. El número total de pelotillas en sedimentación comenzó a aumentar durante el período de abundancia máxima del fitoplancton en la columna de agua, pero fue muy superior dos semanas después cuando la biomasa del zooplancton alcanzó un nivel máximo. En ese período, se observó que las heces del zooplancton aportaban hasta entre el 25% y el 40% de todo el carbono en sedimentación. El retraso entre la abundancia máxima del fitoplancton y la sedimentación de la materia fecal está relacionado con el ciclo biológico de los productores de zooplancton (por ejemplo, crustáceos microscópicos, gusanos y peces) y su interacción en la cadena alimentaria de mar abierto.

Se analizó la composición de los elementos de tierras raras (REE) —algunos de los cuales son elementos estables o análogos de radionucleidos artificiales principales— en las partículas descendentes de cuatro horizontes de profundidad medidos con colectores de sedimentos de serie cronológica.

Durante los impulsos de sedimentación, las partículas tomadas en los colectores más profundos se caracterizaron por presentar perfiles de los REE similares a los encontrados en los 200 metros de

la capa superior. Esto indicó que ocurrió poca depuración adicional, si la hubo, de REE por parte de las partículas durante la sedimentación. En contraste, después de los impulsos de sedimentación, las partículas de las aguas profundas mostraron un mayor contenido de REE ligero (LREE) en relación con el REE pesado (HREE) y una anomalía positiva del cerio.

Se compararon las diferencias entre los perfiles de los REE en las partículas de la columna de agua superior (200 metros) y los de la profundidad (1000 y 2000 metros) durante los impulsos de sedimentación y después de éstos. La comparación indicó que el tiempo es un factor clave para determinar la depuración de los REE por parte de las partículas descendentes. Ello resulta especialmente evidente en la depuración preferencial del cerio, que es más pronunciada en las partículas más finas, de lento descenso y supuestamente más antiguas. Estos resultados se corresponden con los perfiles de los REE en el agua de mar de la zona noroccidental del Mediterráneo, que muestran una fuerte anomalía negativa del cerio y un gradual enriquecimiento de los REE con un número atómico mayor. El enriquecimiento de los LREE en relación con los HREE en partículas procedentes de las aguas profundas trae como resultado una depuración preferencial de los LREE en las partículas, análoga al enriquecimiento del cerio, o la disolución selectiva de los HREE en relación con los procesos de remineralización de partículas, o ambos.

El conocimiento adquirido respecto del comportamiento en el mar del cerio, el europio y otros REE que reaccionan a nivel de partícula ha resultado ser muy valioso para comprender el ciclado y el transporte de radionucleidos análogos, como el radiocerio y el americio 241 en los sistemas oceánicos.

BENEFICIOS DE LA COOPERACION

Durante el decenio de 1990, el aumento de la cooperación entre el OIEA y la Unión Europea en la esfera de las investigaciones marinas aplicadas en el Mar Mediterráneo ha sido mutuamente provechosa.

Los investigadores del MEL se han beneficiado al poder trabajar muy unidos a científicos de otros Estados Miembros en proyectos multidisciplinarios a gran escala. Estos trabajos se han centrado en problemas marinos de interés mundial y en ellos se han empleado instrumentación y metodologías oceanográficas más modernas, que normalmente no están a disposición del personal del MEL. Ello reviste especial importancia respecto del acceso sistemático a buques oceanográficos cuyo alquiler y mantenimiento resultan muy costosos. El libre acceso a los buques de investigación nacionales y a su instrumentación de a bordo ha resultado ser vital en la ejecución rentable de programas marinos ordinarios del OIEA.

Por su parte, el MEL ha puesto sus diversas y modernas técnicas nucleares e isotópicas a disposición de otros científicos del programa a fin de que se comprendan mejor los procesos que controlan la biogeoquímica de los elementos clave en el Mar Mediterráneo.

El reciente traslado del MEL a sus nuevas instalaciones ampliadas en el puerto de Mónaco permitirá que el Laboratorio incremente su asistencia a científicos que colaboran en las esferas de capacitación en materia de análisis y evaluación de muestras. Por tanto, se espera que estos esfuerzos de cooperación entre el OIEA y la Unión Europea sigan intensificándose hasta bien entrado el siglo XXI, de suerte que ambas organizaciones puedan alcanzar más fácilmente sus objetivos específicos en la lucha por mantener la salud de los océanos. □