

# LA INMISIÓN DE COMPUESTOS QUÍMICOS ATMOSFÉRICOS EN EL OCÉANO

Por Robert A. Duce\*

## Resumen

Existe una aceptación cada vez mayor de que la atmósfera puede ser una vía de transporte eficaz, y en algunos casos predominante, de los contaminantes que entran en las zonas costeras y en los océanos abiertos. Pueden tener importancia los procesos tanto de deposición húmeda como seca, en los que están implicadas las partículas y la fase gaseosa. Las estimaciones en algunos mares semicerrados de Europa, así como las realizadas a lo largo de la costa oriental de América del Norte indican que, en algunas regiones, las inmisiones atmosféricas pueden ser similares e incluso mayores que las de los ríos, los desagües, los bombeos, etc., para algunos metales en trazas (p. ej. plomo, cadmio, zinc, cobre, níquel, mercurio) y para una serie de compuestos químicos orgánicos sintéticos (p. ej. HCH (hexaclorociclohexano), BPC (bifenil policlorado), HCB (hexaclorobenceno, lindano). La inmisión atmosférica de compuestos nitrogenados, utilizados como nutrientes por el océano, puede ser también importante en las regiones costeras, en particular cuando se tiene en cuenta la deposición atmosférica sobre una cuenca completa, seguida de la escorrentía hacia la zona costera.

La inmisión atmosférica en las zonas abiertas del océano también puede ser importante para algunos compuestos. Por ejemplo, la atmósfera predomina aparentemente como fuente de plomo disuelto, cadmio y zinc en el océano mundial y llega hasta casi el 90 por ciento de las inmisiones de HCH, HCB, dieldrina y DDT, y hasta el 80 por ciento de cloridano y BPC en las regiones abiertas del océano. Las inmisiones episódicas de nitrógeno antropogénico pueden ser también una fuente importante de nutrientes para algunas regiones abiertas del océano, particularmente para las que se hallan a sotavento de las principales regiones industriales y populosas, tales como el este de Asia, el este de América del Norte y Europa. Estas inmisiones antropogénicas pueden afectar en algunos casos a la productividad primaria

marina. A causa de la industrialización y del crecimiento de la población la emisión de óxidos de nitrógeno, y su posterior deposición en el océano, se espera que aumente posiblemente en un factor de 4 a 6 hacia el año 2020 en regiones tales como Asia, América Central y del Sur y África. Se esperan aumentos considerablemente menores en América del Norte, Europa, Australia y Japón, y a sotavento de estas regiones. Sin embargo, en el momento actual, los flujos atmosféricos estimados sobre el océano tienen todavía considerables incertidumbres con una estimación que probablemente sólo sea aceptable dentro de un factor de 2 a 4 para grandes áreas.

## Introducción

Durante muchos decenios, la comunidad científica marina ha estado preocupada por el desarrollo y comprensión de los balances y procesos asociados con la inmisión de sustancias naturales o derivadas de las actividades humanas en el océano. Gran parte de los primeros trabajos en este campo se centraron en la inmisión lógica de materia en el mar, la que llevan a cabo los ríos y las corrientes. Los sucesivos estudios han investigado las procedentes de los desagües, del bombeo y de otras vías de inmisión directa. Sin embargo, en los últimos dos decenios se ha puesto de relieve que la atmósfera no es sólo una vía importante, y en algunos casos predominante, de inmisión de la materia natural y contaminada que es transportada de los continentes a las zonas costeras y al océano abierto. Estas sustancias incluyen polvo mineral y residuos vegetales; metales pesados; compuestos nitrogenados procedentes de los procesos de combustión y de los fertilizantes; pesticidas y toda una amplia gama de otros componentes sintéticos orgánicos provenientes de fuentes industriales y domésticas.

Algunas de estas sustancias llevadas al océano a través de la atmósfera, tales como el plomo y ciertos hidrocarburos clorados, son potencialmente perjudiciales para los sistemas biológicos marinos y la calidad del agua. Otras sustancias son nutrientes, como los compuestos de nitrógeno, de fósforo y de hierro, y pueden intensificar la productividad marina. En lo referente a ciertas sustancias, tales como el alu-

\* Departamentos de Oceanografía y de Meteorología de la Texas A&M University, College Station, Texas 77843, EE. UU.

minio y algunos elementos terrestres raros, las inmisiones atmosféricas tienen una influencia importante en los ciclos químicos naturales en el mar. En consecuencia, las inmisiones atmosféricas pueden tener diferentes efectos sobre el medio ambiente marino y se hace necesario ampliar el conocimiento sobre la amplitud y la distribución geográfica de los flujos atmosféricos de estos materiales, tanto en las zonas costeras como en los océanos abiertos.

Desgraciadamente, existen todavía grandes incertidumbres respecto a todos los flujos reseñados aquí, ya sean procedentes de fuentes atmosféricas como de otras fuentes. A menos que se indique otra cosa, debe asumirse que las tasas de las inmisiones atmosféricas presentadas tienen incertidumbres que abarcan desde un factor 2 a un factor 4.

## Las inmisiones en los estuarios y en las zonas costeras del océano

### Metales en trazas

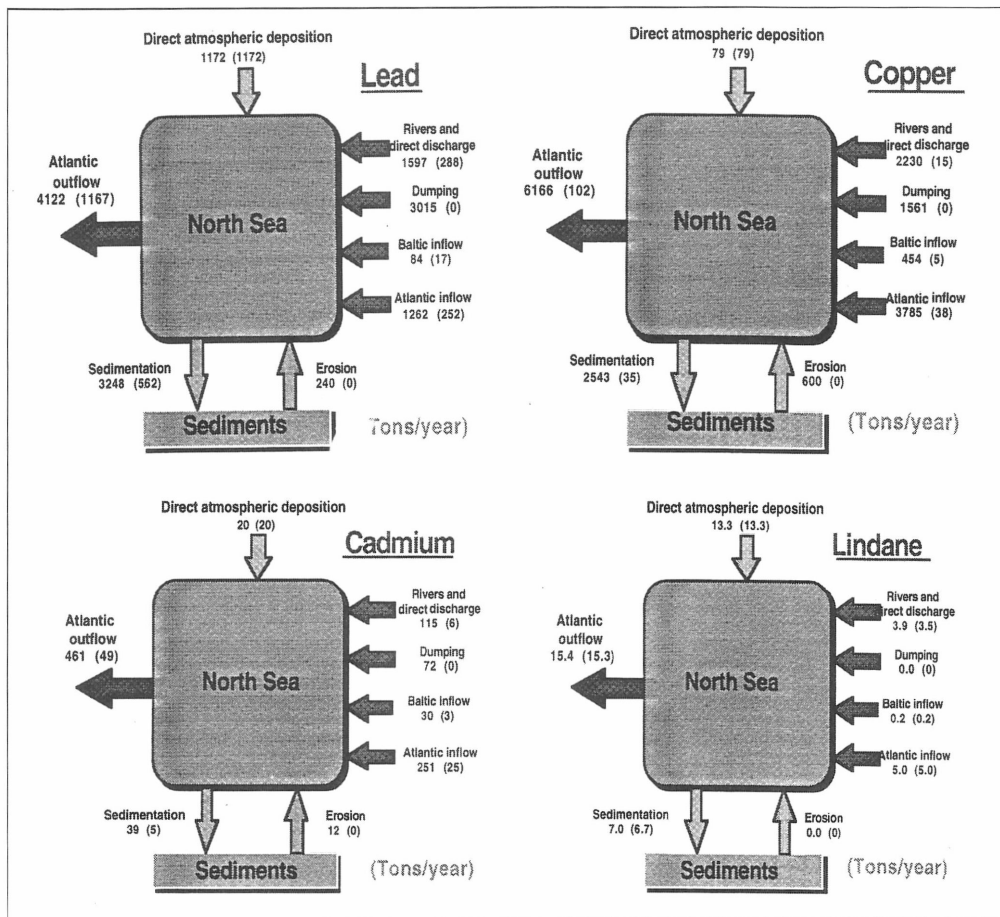
Quizás se han realizado más investigaciones sobre las inmisiones de metales en las zonas costeras y en los estuarios, a través de la atmósfera, que sobre cualesquiera otros elementos químicos. La región más ampliamente estudiada en América del Norte es la de la Bahía de Chesapeake (p. ej. Baker y col., 1997; Quinn y col., 1992; Scudlark y col., 1994; y Wu y col., 1994). Por ejemplo, en el Cuadro I, Scudlark y col. (1994) comparan las inmisiones atmosféricas y fluviales en la Bahía de Chesapeake, de una amplia gama de metales en trazas. Las cantidades atmosféricas representan una combinación de los depósitos secos y húmedos realizados directamente sobre la superficie de la Bahía. Es de resaltar que las inmisiones atmosféricas son tan pequeñas como el 1 por ciento para el manganeso y tan altas

como el 82 por ciento para el aluminio. Con la excepción del aluminio y del hierro, que proceden en gran parte de los procesos naturales de la meteorización (p. ej. en las estructuras minerales), la mayor parte de las inmisiones de los demás metales en trazas proceden de fuentes antropogénicas. Respecto a estos metales en trazas antropogénicos, la atmósfera es muy importante para el plomo (31 por ciento), si bien para la mayoría de los demás metales en trazas alcanzan tan sólo el 10 por ciento o menos.

Hay también una serie de investigaciones sobre la inmisión de metales en trazas en el Mar del Norte (p. ej. Baart y col., 1995; Kane y col., 1994; Ottley y Harrison, 1993; Struyf y Van Grieken, 1993; Van den Hout, 1994; van Jaarsveld, 1992; y Warmenhoven y col., 1989). Van den Hout (1994) emprendió un completo estudio de modelización del Mar del Norte; el estudio no sólo consideraba las inmisiones atmosféricas, fluviales, de los vertidos y de las descargas directas, sino también de las afluencias del Mar Báltico, de las afluencias y efluencias del Atlántico y del intercambio de metales con los sedimentos. También se calculaba la contribución atmosférica respecto a todas esas inmisiones. La figura de la página siguiente muestra esquemáticamente los resultados para el plomo, el cobre y el cadmio. Nótese que la inmisión atmosférica para el cobre es relativamente poco importante, dentro de este amplio contexto, es algo más importante para el cadmio y es muy importante para el plomo, siendo aproximadamente igual a la de las afluencias del Océano Atlántico, aunque algo menor que la que entra en el Mar del Norte procedente de los vertidos. Nótese también que, en el caso del plomo, aproximadamente el 20 por ciento de las afluencias del Océano Atlántico al Mar del Norte provienen de la atmósfera. Este tipo de método ofrece

CUADRO I  
Inmisiones atmosféricas y fluviales de metales en trazas en la Bahía de Chesapeake  
(adaptación del trabajo de Scudlark y col., 1994)

<i>Metal</i>	<i>Inmisión atmosférica</i>	<i>Inmisión fluvial</i> (10 <sup>6</sup> g año <sup>-1</sup> )	<i>% atmosférico</i> (10 <sup>6</sup> g año <sup>-1</sup> )
Aluminio	710	156	82
Arsénico	0,79	5,3	13
Cadmio	0,37	2,6	12
Cobre	3,5	59,0	6
Cromo	1,5	14,7	9
Hierro	400	618	39
Manganeso	13	1 280	1
Níquel	4,2	98,7	4
Plomo	6,6	14,7	31
Zinc	18,0	49,5	27



Las inmisiones de cobre, plomo, cadmio y lindano en el Mar del Norte: los valores entre paréntesis ( ) indican la contribución atmosférica, p. ej. en el caso del cobre, la contribución atmosférica en los ríos y en los caudales directos es de 15 toneladas (13 608 kg) por año (1 tonelada = 907,185 kg)

(adaptación del trabajo de Van den Hout, 1994)

quizás el análisis más exacto y más profundo de la importancia de las inmisiones atmosféricas para una cierta sustancia en particular en una masa de agua, en relación con todas las fuentes restantes. También hay una amplia bibliografía sobre las inmisiones de metales en trazas en otros mares europeos. Para el Mar Báltico, p. ej. GESAMP (1989) y HELCOM (1991). Para el Mar Mediterráneo, las referencias más representativas incluyen a Erdman y col. (1994) y a Martin y col. (1989).

Hay relativamente pocos estudios de las inmisiones de metales en trazas procedentes de la atmósfera en las zonas costeras de Asia. Gao y col. (1992), estimaron la inmisión atmosférica de 23 metales en la región del Mar Amarillo, pero no fueron capaces de comparar estas inmisiones con las de los ríos u otras fuentes de esa zona. Sin embargo, pudieron

comparar las inmisiones atmosféricas de la materia mineral procedente de ríos y de la atmósfera en el Mar de Bohai, en el Mar Amarillo y en las regiones marítimas orientales, que son directamente adyacentes al continente asiático y sujetas a la escorrentía de dos de los ríos más largos del mundo, el Río Amarillo y el Río Jiang, respectivamente, las inmisiones atmosféricas alcanzan tan sólo del 1 al 12 por ciento del total. Sin embargo, en el Mar Amarillo los depósitos atmosféricos de materia mineral procedentes de los desiertos y de las mesetas de loess de Asia alcanzan entre el 20 y el 70 por ciento de la inmisión mineral total.

### Compuestos nitrogenados

La inmisión atmosférica de compuestos nitrogenados es particularmente interesante, ya que el nitrógeno es

CUADRO II  
**Inmisión de compuestos nitrogenados en la Bahía de Chesapeake**  
 (adaptación del trabajo de Fisher y col., 1988)

<i>Fuente</i>	<i>Inmisión total (10<sup>9</sup>g año<sup>-1</sup>)</i>	<i>Tasa de inmisión aerolar (g m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>)</i>	<i>% del total</i>
<b>Precipitación:</b>			
nitratos	35	3,1	25
amonio	19	1,7	14
Desechos animales	5	0,4	3
Fertilizantes	48	4,2	34
Fuentes puntuales	33	2,9	24
<b>Total</b>	<b>140</b>	<b>12,3</b>	<b>100</b>

un nutriente necesario para la producción y el crecimiento biológicos en el océano. Quizás la publicación que catalizó de forma más eficaz el interés sobre la importancia de las inmisiones atmosféricas de nitrógeno fue la debida a Fisher y col., (1988), en la que informaba del papel de la lluvia ácida en las aguas costeras contaminadas del nordeste de los EE. UU., y en particular en la Bahía de Chesapeake. Los resultados de este estudio, mostrados en el Cuadro II, indican que casi el 40 por ciento del total del nitrógeno procedente de las actividades humanas entra en la Bahía de Chesapeake a través de la precipitación que cae directamente sobre la Bahía o sobre su cuenca de recepción. Estos resultados fueron diferentes de los de la mayoría de los primeros estudios ya que no se consideraron tan sólo las contribuciones atmosféricas que se depositaban directamente sobre la superficie del agua, sino que también incluían las que llegaban a través de la atmósfera pero cayendo sobre la cuenca de recepción de la Bahía. En

el caso de los nitratos, casi el 23 por ciento cae directamente sobre la Bahía, mientras que el 77 por ciento restante lo hace sobre la cuenca. Estos resultados sugieren que los estudios que consideran sólo los depósitos directos sobre la superficie del agua (p. ej. los resultados del Cuadro I) pueden subestimar considerablemente la verdadera contribución de la inmisión atmosférica. Fisher y col., (1988) resaltaron que el nitrógeno total de los fertilizantes utilizados en las tierras de cultivo de la región de Chesapeake era de ~5,4 g m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>, mientras que los nitratos y el nitrógeno del amonio atmosféricos que entra en la Bahía era de ~4,8 g m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>. ¡La Bahía de Chesapeake está casi tan fertilizada por el nitrógeno atmosférico, en gran parte antropogénico, como lo están mediante fertilizantes las tierras cultivadas de su cuenca!

Muchos otros estudios que han investigado la inmisión del nitrógeno en los estuarios y en las zonas costeras se hallan resumidos en el Cuadro III,

CUADRO III  
**Inmisión de nitrógeno en las zonas costeras**

<i>Región</i>	<i>Inmisión atmosférica total * (10<sup>9</sup>g año<sup>-1</sup>)</i>	<i>Inmisión total de todas las fuentes (10<sup>9</sup>g año<sup>-1</sup>)</i>	<i>% de inmisión atmosférica</i>	<i>Referencia</i>
Bahía de Chesapeake	54	140	39	(1)
Long Island Sound	11	49	22	(1, 2)
Estuario del Río Neuse, NC	1,7	7,5	23	(1, 3)
Mar del Norte	400 +	1 500	27 +	(4)
Mar Mediterráneo Occidental	400 +	577 @	692	(5)
Mar Mediterráneo	1 067 +	-	-	(6)
Mar Báltico	500	~1 200	42	(7, 8)

\* Total de la deposición atmosférica directa y de la escorrentía del material atmosférico de la cuenca  
 + Sólo la deposición atmosférica directa sobre el agua  
 @ Sólo los totales de las inmisiones atmosféricas y fluviales

Referencias: (1) Fisher y col., 1988; (2) Faro y col., 1986; (3) North Carolina Div. of Environmental Management, 1985; (4) North Sea Conference, 1987; (5) Martin y col., 1989; (6) Erdman y col., 1994; (7) HELCOM, 1991; (8) HELCOM, 1993

CUADRO IV  
**Inmisiones de compuestos orgánicos en el Mar del Norte**  
 (adaptación del trabajo de Warmenhoven y col., 1989)

<i>Compuestos orgánicos</i>	<i>Inmisión atmosférica (10<sup>6</sup>g año<sup>-1</sup>)</i>	<i>Inmisiones de otras fuentes (10<sup>6</sup>g año<sup>-1</sup>)</i>	<i>% atmosférico</i>
Tricloroetano	920	55	94
Tetracloroetano	110	8	93
Tricloroeteno	330	84	80
Tetracloruro de carbono	6	42	13
Benceno	420	488	46
Lindano	36	3	92
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	83	91	48
PCB	39	3	93

en el cuál se han comparado, cuando ha sido posible, las fuentes atmosféricas del nitrógeno con todas las demás fuentes. Las inmisiones atmosféricas abarcan desde el 10 hasta casi el 70 por ciento del total. Nótese que algunas estimaciones comparan sólo la inmisión atmosférica directa con todas las demás fuentes y algunas otras incluyen, como parte de la inmisión atmosférica, la porción de los depósitos sobre la cuenca que llegan a los estuarios o a la costa. Entre otros estudios de la inmisión atmosférica de nitrógeno en los estuarios y en las zonas costeras, se incluyen los de Kane y col., (1994), Paerl (1985), y Scudlark y Church (1993).

### **Compuestos orgánicos sintéticos**

Existe un creciente interés en las inmisiones de una amplia gama de compuestos orgánicos sintéticos en las zonas oceánicas costeras. Muchas de estas sustancias se encuentran primordialmente en la atmósfera en fase gaseosa y el tiempo de residencia atmosférica de la mayoría de estos compuestos es largo en comparación con el de los materiales en trazas o el de los compuestos nitrogenados. En consecuencia, las potenciales regiones fuente de estos compuestos

que entran en las aguas costeras pueden estar muy distantes y ampliamente dispersas. En estudios similares a los de los metales en trazas, Van den Hout (1994) evaluó la inmisión atmosférica del lindano en el Mar del Norte y la comparó con la procedente de otras fuentes. Esto se muestra en la figura de la página 57. Nótese que la inmisión atmosférica del lindano predomina sobre las de todas las demás fuentes. El Cuadro IV compara la inmisión atmosférica con la de otros medios de transporte sobre el Mar del Norte, para una serie de compuestos orgánicos sintéticos. En casi todos los casos, la inmisión atmosférica predomina sobre la de las demás fuentes combinadas. Otros estudios sobre las inmisiones de compuestos orgánicos sintéticos procedentes de la atmósfera en los estuarios y aguas costeras fueron realizados por Baart y col., (1995) y Baker y col., (1997).

### **Inmisiones en el océano global**

Hay también un número creciente de estudios sobre las inmisiones atmosféricas de los compuestos en traza en los océanos abiertos. Dado que las partículas de aerosoles, dentro de una gama de tamaños de unos cuantos micrómetros o menores, tienen tiempos

CUADRO V  
**Inmisiones globales de metales en trazas en los océanos del mundo**  
 (adaptación del trabajo de Warmenhoven y col., 1989)

	<i>Plomo (10<sup>9</sup>g año<sup>-1</sup>)</i>	<i>Cadmio (10<sup>9</sup>g año<sup>-1</sup>)</i>	<i>Cobre (10<sup>9</sup>g año<sup>-1</sup>)</i>	<i>Níquel (10<sup>9</sup>g año<sup>-1</sup>)</i>	<i>Zinc (10<sup>9</sup>g año<sup>-1</sup>)</i>	<i>Arsénico (10<sup>9</sup>g año<sup>-1</sup>)</i>	<i>Hierro (10<sup>12</sup>g año<sup>-1</sup>)</i>
<b><i>Inmisiones atmosféricas</i></b>							
Disueltas	50-100	1,9-3,3	14-45	8-11	33-170	2,3-5	1,6-4,8
En partículas	6-12	0,4-0,7	2-7	14-17	11-55	1,3-3	14-42
<b><i>Inmisiones fluviales</i></b>							
Disueltas	2	0,3	10	11	6	10	1,1
En partículas	1 600	15	1 500	1 400	3 900	80	110

de residencia atmosféricos desde uno a varios días, dependiendo de la distribución de sus tamaños y de las configuraciones locales de la precipitación, y que la mayoría de los compuestos de interés en fase gaseosa tienen tiempos de residencia atmosféricos similares e incluso mayores, existe una gran posibilidad de que estos materiales atmosféricos puedan ser transportados a miles de kilómetros antes de ser depositados en la superficie oceánica.

### **Metales en trazas**

El Cuadro V ofrece una estimación de la inmisión mundial sobre los océanos de distintos metales en trazas procedentes de la atmósfera y compara estos

1991). De nuevo, estas cantidades representan inmisiones de hace casi ocho o 10 años. Nótese que la mayoría de las inmisiones de plomo se producen en el hemisferio norte, particularmente en el Atlántico Norte. Esto concuerda con las configuraciones de las emisiones de plomo antropogénico a la atmósfera, que tienen lugar en ~90 por ciento en el hemisferio norte. Los elevados flujos hacia el Atlántico Norte son coherentes al estar a sotavento de las costas orientales de América del Norte, altamente pobladas, en las cuales se queman grandes cantidades de gasolina con plomo. Destaquemos también que el primordial proceso de la inmisión del plomo es la deposición húmeda. Esto es coherente al encontrarse

CUADRO VI  
**Flujo atmosférico de plomo hacia el océano mundial**  
(adaptación del trabajo de Duce y col., 1991)

<i>Océano</i>	<i>Depósitos húmedos (ng cm<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>)</i>	<i>Depósitos secos (ng cm<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>)</i>	<i>Total (ng cm<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>)</i>
Océano Pacífico Norte	18	3	21
Océano Pacífico Sur	2	0,3	2
Océano Atlántico Norte	88	18	106
Océano Atlántico Sur	6	2	8
Océano Índico Norte	27	6	33
Océano Índico Sur	4	1	5
<b>Total mundial</b>	<b>20</b>	<b>4</b>	<b>24</b>

flujos con los de los ríos. Las estimaciones para los metales se ofrecen tanto en forma disuelta como en partículas. Los datos indican que los ríos son, generalmente, la principal fuente de partículas de metales en trazas para el océano, si bien una importante parte de esta materia puede no ir más allá de la zona costera. En la fase disuelta, las inmisiones atmosféricas y fluviales son prácticamente iguales para algunos metales contaminantes como el cobre y el níquel, mientras que parecen predominar las inmisiones atmosféricas de zinc, cadmio y sobre todo de plomo. Nótese que estas estimaciones están basadas en los datos recopilados a mediados de los años 80. Los grandes esfuerzos realizados para controlar las emisiones de plomo, que proceden primordialmente de la combustión de gasolina con plomo, es probable que den como resultado unas concentraciones mucho más bajas de plomo atmosférico en los océanos. Asimismo, esto se ha observado en la zona de las Bermudas (Boyle y col., 1994, entre otros). El cuadro VI presenta las inmisiones atmosféricas de plomo calculadas en las principales cuencas oceánicas de los hemisferios norte y sur (Duce y col.,

el plomo sobre todo en partículas por debajo de un micrómetro, las cuales tienen una baja velocidad de deposición seca.

### **Compuestos nitrogenados**

Existe una creciente preocupación sobre la inmisión de compuestos nitrogenados antropogénicos en el océano global. Prospero y col., (1996) han ofrecido un análisis reciente de las inmisiones atmosféricas de nitrógeno en la cuenca del Atlántico Norte, y otros estudios recientes de este género incluyen al GESAMP (1991) y a Duce y col., (1991). Este tema es de particular importancia en las regiones en las que el nitrógeno es el nutriente limitante, p. ej., las aguas oligotróficas de los giros oceánicos centrales. Las estimaciones actuales sugieren que, en dichas regiones, el nitrógeno atmosférico alcanza tan sólo un tanto por ciento bajo del total de nitrógeno "nuevo" liberado en la zona fótica, procediendo la mayoría del nitrógeno nutriente "nuevo" del afloramiento de las aguas más profundas, ricas en nutrientes. Sin embargo, se reconoce que las inmisiones atmosféricas son en gran manera episódicas y que en ocasiones pue-

CUADRO VII  
**Estimación de las inmisiones actuales  
de nitrógeno fijado en el océano**  
(de Cornell y col., 1995)

<i>Fuente</i>	<i>Flujo de N (10<sup>12</sup>g año<sup>-1</sup>)</i>
Fijación de nitrógeno	14-42
Inmisión atmosférica:	
N inorgánico disuelto (NID)	28-70
N orgánico disuelto (NOD)	28-84
Inmisión fluvial (NID + NOD):	
Natural	14-35
Antropogénico	7-35

den desarrollar un papel mucho más importante como fuente de nitrógeno para las aguas superficiales (p. ej. Duce, 1986; Knap y col., 1986; Michaels y col., 1993; y Owens y col., 1992). El Cuadro VII presenta una estimación reciente de la inmisión actual de nitrógeno fijado en los océanos globales a partir de los ríos, la atmósfera y la fijación del nitrógeno. Puede verse que las tres fuentes son importantes y que, dentro de las incertidumbres de las estimaciones, son prácticamente iguales. En el caso de los ríos, casi la mitad de la inmisión de nitrógeno es antropogénica. En la inmisión atmosférica, posiblemente la información más importante del cuadro VII es que los flujos de nitrógeno orgánico parecen ser iguales o algo mayores que los flujos de nitrógeno inorgánico (es decir, amonio y nitratos). No se conocen las fuentes de nitrógeno orgánico, pero Cornell y col., (1995) creen que una amplia fracción es antro-

pogénica con anterioridad, ya que se habían hecho pocas medidas de inmisiones de nitrógeno orgánico en el océano antes del trabajo de Cornell y col., (1995).

Son particularmente preocupantes los cambios en el futuro de las inmisiones atmosféricas de nitrógeno en los océanos como consecuencia de las crecientes actividades humanas. En trabajos especialmente pertinentes, Galloway y col., (1994) evaluaron la fijación preindustrial de nitrógeno sobre los continentes (formación de nitrógeno reactivo); el nitrógeno reactivo antropogénico actual (1990) procedente de las fuentes de energía (primordialmente como NO<sub>x</sub>), de los fertilizantes y de las legumbres; el nitrógeno reactivo estimado que se producirá en el año 2020 como consecuencia de las actividades humanas; y la distribución geográfica actual y futura de los depósitos de nitrógeno reactivo en los continentes y en los océanos. El Cuadro VIII ofrece las estimaciones de Galloway y col., (1995) sobre la formación de nitrógeno fijado procedente del uso y de la producción de energía, y del uso de fertilizantes, los dos procesos que darán lugar a los más importantes flujos de nitrógeno reactivo en la atmósfera. Es de resaltar que la mayoría de las regiones altamente desarrolladas del mundo, representadas por las cuatro primeras regiones en el cuadro, se prevé que muestren tan sólo un aumento relativamente bajo en la formación de nitrógeno fijado, sin que ninguna de dichas áreas tenga un aumento previsto para el año 2020 mayor de un factor 1,3 ni una contribución al incremento total mundial de nitrógeno reactivo que supere el 10 por ciento. Sin embargo, las regiones de la parte más

CUADRO VIII  
**Producción de nitrógeno reactivo antropogénico, 1990 y 2020**  
(adaptación del trabajo de Galloway y col., 1995)

	<i>Energía (NO<sub>x</sub>)</i>					<i>Fertilizantes</i>				
	<i>1990 (1012g N año-1)</i>	<i>2020</i>	<i>Δ</i>	<i>Factor</i>	<i>% de aumento total</i>	<i>1990 (1012g N año-1)</i>	<i>2020</i>	<i>Δ</i>	<i>Factor</i>	<i>% de aumento total</i>
EE. UU./Canadá	7,6	10,1	2,5	1,3	10	13,3	14,2	0,9	1,1	1,6
Europa	4,9	5,2	0,3	1,1	1	15,4	15,4	0	1,0	0
Australia	0,3	0,4	0,1	1,3	0,4	-	-	-	-	-
Japón	0,8	0,8	0	1,0	0	-	-	-	-	-
Asia	3,5	13,2	9,7	3,8	39	36	85	49	2,4	88
América Central y del Sur	1,5	5,9	4,4	3,9	18	1,8	4,5	2,7	2,5	5
África	0,7	4,2	3,5	6,0	15	2,1	5,2	3,1	2,5	6
Antigua Unión Soviética	2,2	5,7	3,5	2,5	15	10	10	0	1,0	0
<b>Total</b>	<b>21</b>	<b>45</b>	<b>24</b>	<b>2,1</b>	<b>100</b>	<b>79</b>	<b>134</b>	<b>55</b>	<b>1,7</b>	<b>100</b>

## Flujos atmosféricos y fluviales de compuestos organoclorados hacia los océanos del mundo

Compuesto	Inmisión atmosférica (10 <sup>6</sup> g año <sup>-1</sup> )	Inmisión fluvial (10 <sup>6</sup> g año <sup>-1</sup> )	% atmosférico (10 <sup>6</sup> g año <sup>-1</sup> )
ΣPCB	240	60	80
ΣHCH	4 750	60	99
ΣDDT	165	4	98
HCB	77	4	95
Dieldrin	43	4	91
Clordano	22	4	85

baja del cuadro VIII contribuirán de forma importante a la creciente formación de nitrógeno reactivo antropogénico en el 2020. Por ejemplo, se ha previsto que la producción de nitrógeno reactivo en Asia procedente de fuentes de energía aumentará casi cuatro veces y que en Asia se llegará casi al 40 por ciento del aumento mundial, mientras que África tendrá un aumento múltiplo de seis y llegará hasta el 15 por ciento del aumento mundial de nitrógeno fijado procedente de la energía. Se prevé que en Asia la producción de nitrógeno reactivo procedente del uso de fertilizantes aumentará según un factor 2,4 y que en Asia se llegará a ~88 por ciento del incremento mundial de dicha fuente. Dado que tanto las fuentes de energía (NO<sub>x</sub> y finalmente nitratos) como los fertilizantes (NH<sub>3</sub>) producirán grandes emisiones de nitrógeno reactivo a la atmósfera, las predicciones anteriores indican que habrá aumentos muy importantes en la deposición atmosférica de compuestos de nitrógeno nutriente sobre los océanos a sotavento de regiones tales como Asia, América Central y del Sur, África y la antigua Unión Soviética.

El aumento de las inmisiones de N atmosférico en esas regiones se ha predicho también mediante un estudio de modelización numérica (Galloway y col., 1994). El transporte creciente de nitrógeno reactivo y la deposición en el océano podría producir probablemente una intensificación de la producción de ozono troposférico en dichas regiones. También proporcionará nuevas fuentes de nitrógeno nutriente en algunas zonas del océano en las que la producción biológica está actualmente limitada por el nitrógeno. Por tanto existe la posibilidad de que haya importantes impactos en la producción primaria biológica regional, al menos de forma episódica, en dichas regiones y en el océano abierto.

Galloway y col., (1995) compararon los valores de la fijación del nitrógeno preindustrial mundial con los de 1990 y con los valores mundiales antropogénicamente previstos del nitrógeno fijado para el

2020. La fijación preindustrial del nitrógeno en los continentes era de 90 a 130 x 10<sup>12</sup>g N por año. En 1990 los humanos añadieron ~140 x 10<sup>12</sup>g N por año a esta cantidad y para el 2020 aumentaría hasta ~230 x 10<sup>12</sup>g N por año.

En el año 2020, los humanos estarán duplicando o triplicando la formación de nitrógeno reactivo del procedente de fuentes naturales. De los actuales 140 x 10<sup>12</sup>g de N antropogénico por año, aproximadamente 60 x 10<sup>12</sup>g entran en el océano, permaneciendo lo restante en la zona costera. De acuerdo con Galloway y col., (1995), actualmente entran en el océano a través de la atmósfera ~18 x 10<sup>12</sup>g de N antropogénico por año, con una cantidad aproximadamente igual procedente de fuentes naturales. Sin embargo, hay que resaltar que en estas cantidades sólo se considera el nitrógeno inorgánico. Cuando se incluye el nitrógeno orgánico son posibles flujos mucho mayores (Cornell y col., 1995; véase el Cuadro VII).

### Compuestos orgánicos sintéticos

Duce y col., (1991) realizaron un estudio completo de la inmisión de componentes orgánicos sintéticos en el océano mundial hasta 1990 y puede encontrarse aquí entre las extensas referencias. Otros trabajos recientes que abordan estos temas son los de Bidleman y col., (1990), Hinckley y col., (1991) y Hornbuckle y col., (1994). Los relativamente largos tiempos de residencia atmosférica de muchos compuestos orgánicos sintéticos hacen que el transporte atmosférico pueda realizarse frecuentemente a escala hemisférica. Por tanto, el transporte atmosférico y la deposición predominan generalmente sobre las demás fuentes para las aguas marinas y las regiones abiertas del océano.

El Cuadro IX compara las inmisiones atmosféricas y fluviales en los océanos del mundo para una serie de compuestos sintéticos organoclorados. Nótese que la atmósfera, en la mayoría de los casos,

alcanza el 90 por ciento o más de las inmisiones de estos compuestos en el océano. Existen algunas diferencias para compuestos específicos en diferentes cuencas oceánicas. Por ejemplo, los compuestos de HCH y de DDT tienen una mayor tasa de inmisión en el Pacífico Norte que en el Atlántico Norte, debido en gran manera al mayor uso de estos compuestos en Asia que en América del Norte o Europa. Por otro lado, las inmisiones de PCB y de dieldrina son mayores en el Atlántico Norte que en el Pacífico Norte, debido sobre todo a su mayor uso en las regiones continentales adyacentes al Atlántico Norte.

## Conclusiones

La atmósfera transporta materia al océano que es a la vez dañina para la vida marina y esencial para la productividad biológica marina. Ahora se sabe que el transporte atmosférico y los depósitos de metales en trazas, compuestos nitrogenados y compuestos orgánicos sintéticos pueden ser importantes y en algunos casos puede ser la vía predominante en la inmisión de estas sustancias en las aguas de los estuarios y en las costeras, así como en algunas zonas del océano abierto. Debe pues tenerse en cuenta de forma clara la inmisión atmosférica en cualquier evaluación de los flujos de materia que van a esos ecosistemas marinos. Son especialmente necesarios programas de modelización atmosférica y de medidas cuidadosamente diseñados para evaluar con exactitud las inmisiones contaminantes en las aguas costeras y de los estuarios, incluyendo los mares regionales. Los resultados de estos estudios deberán formar parte integral de los datos necesarios para desarrollar las estrategias de protección de dichas masas de agua. Los científicos atmosféricos y marinos en su intento de comprender y evaluar el impacto de la inmisión atmosférica en las aguas marinas, así como los gestores y los ejecutivos que busquen proteger estas aguas, deben reconocer las muchas incertidumbres asociadas a los métodos actuales de estimación de la inmisión atmosférica de compuestos químicos en el océano. Las razones primordiales de estas incertidumbres son:

- la falta de datos atmosféricos de concentración en amplias regiones de los océanos abiertos y zonas costeras, sobre todo para grandes períodos de tiempo y bajo condiciones meteorológicas variadas;
- la naturaleza episódica de los depósitos en el océano;
- la falta de modelos exactos de intercambio, en particular para los gases; y

- nuestra impericia en la medición exacta de depósitos secos de partículas y gases.

Los modelos de inmisión de materia atmosférica en cualquier masa de agua requieren una total comprensión de la meteorología de la zona de interés. Esto incluye no solamente la climatología de la región, sino también realizar medidas meteorológicas regulares y detalladas que deben formar parte integral de cualquier trabajo completo de medidas químicas y de modelización. Aunque comúnmente existe escasez de datos meteorológicos en las regiones de los océanos abiertos, ésto ocurre también con frecuencia en muchos lugares costeros. Cuando se están recogiendo datos químicos atmosféricos y se están desarrollando y validando modelos de transporte y deposición en una región concreta, puede ser necesario con frecuencia ampliar la recopilación de información meteorológica. Estos trabajos requieren la estrecha colaboración y la cooperación entre los meteorólogos y los químicos de la atmósfera.

## Referencias

- BAART, A.C., J.J.M. BERDOWSKI and J.A. VAN JAARSVELD, 1995: *Calculation of Atmospheric Deposition of Contaminants on the North Sea*, TNO Institute of Environmental Sciences, Delft, the Netherlands, TNO Report TNO-MEP-R 95/138, 122 pp.
- BAKER, J.E., D.L. POSTER, C.A. CLARK, T.M. CHURCH, J.R. SCUDLARK, J.M. ONDOV, R.M. DICKHUT and G. CUTTER, 1997: Loadings of atmospheric trace elements and organic contaminants to the Chesapeake Bay. In: *Atmospheric Contaminants to the Great Lakes and Coastal Waters*, J.E. BAKER (Ed.), *Society of Environmental Toxicology and Chemistry Publications*. In press.
- BIDLEMAN, T.F. *et al.*, 1990: Chlorinated pesticides and polychlorinated biphenyls in the atmosphere of the Canadian arctic. In: *Long-Range Transport of Pesticides*, D.A. KURZ (Ed.), Lewis Publishers, Ind., Chelsea, MI, 347-372.
- BOYLE, E., R.A. SHERRELL and M.P. BACON, 1994: Lead variability in the western North Atlantic and central Greenland: Implications for the search for decadal trends in anthropogenic emissions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 3 227-3 238.
- CORNELL, S., A. RENDELL and T. JICKELLS, 1995: Atmospheric inputs of dissolved organic nitrogen to the oceans. *Nature*, **376**, 243- 246.
- DUCE, R.A., 1986: The impact of atmospheric nitrogen, phosphorus, and iron species on marine biological productivity. In: *The Role of Air-Sea*

- Exchange in Geochemical Cycling*, P. BUAT-MENARD (Ed.), D. Reidel, Dordrecht, 497-529.
- DUCE, R.A., P.S. LISS, J.T. MERRILL *et al.*, 1991: The atmospheric input of trace species to the world ocean. *Global Biogeochem. Cycles*, **5**, 193-259.
- ERDMAN, L., M. SOFIEV, S. SUBBOTIN, I. DEDKOVA, O. AFINOGENOVA, T. CHESHUIKINA, L. PAVLOVSKAYA and A. SOUDINE, 1994: *Assessment of Airborne Pollution of the Mediterranean Sea by Sulphur and Nitrogen Compounds and Heavy Metals in 1991*. MAP Technical Report Series No. 85. UNEP, Athens, 304 pp.
- FARRO, D.R.G. *et al.*, 1996: *The National Coastal Pollutant Discharge Inventory: Boundaries for Long Island Sound*. Rockville, MD, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- FISHER, D., T. CEROSO, T. MATHEW and M. OPPENHEIMER, 1988: *Polluted Coastal Waters: The Role of Acid Rain*, Environmental Defense Fund, New York.
- GALLOWAY, J.N., H. LEVY II and P.S. KASIBHATLA, 1994: Year 2020: Consequences of population growth and development on deposition of oxidized nitrogen, *Ambio*, **23**, 120-123.
- GALLOWAY, J.N., W.H. SCHLESINGER, H. LEVY II, A. MICHAELS and J.L. SCHNOOR, 1995: Nitrogen fixation: Anthropogenic enhancement-environmental response. *Global Biogeochem. Cycles*, **9**, 235-252.
- GAO, Y., R. ARIMOTO, R.A. DUCE, D.S. LEE and M.Y. ZHOU, 1992: Input of atmospheric trace elements and mineral matter to the Yellow Sea during the spring of a low-dust year, *J. Geophys. Res.*, **97**, 3 767-3 777.
- GESAMP, 1989: *The Atmospheric Input of Trace Species to the World Ocean*, GESAMP Reports and Studies, **38**, World Meteorological Organization, Geneva, 111 pp.
- GESAMP, 1991: *Global Changes and the Sea-Air Exchange of Chemicals*. GESAMP Reports and Studies, **48**, World Meteorological Organization, Geneva, 69 pp.
- HELCOM, 1991: Airborne Pollution Load to the Baltic Sea 1986-1990, *Baltic Sea Environmental Proceedings*, **39**, Helsinki Commission, Helsinki, 162 pp.
- HELCOM, 1993: Second Baltic Sea Pollution Load Compilation, *Baltic Sea Environmental Proceedings*, **45**, Helsinki Commission, Helsinki.
- HINCKLEY, D.A., T.F. BIDLEMAN, and C.P. RICE, 1991: Atmospheric organochlorine pollutants and air/sea exchange of hexachlorocyclohexane in the Bering and Chukchi Seas, *J. Geophys. Res.*, **96**, 7 201-7 213.
- HORNBUCKLE, K.C., J.D. JEREMIASON, C.W. SWEET and S.J. EISENREICH, 1994: Seasonal variations in air-water exchange of polychlorinated biphenyls in Lake Superior, *Environ. Sci. Technol.*, **28**, 1 491-1 501.
- KANE, M.M., A.R. RENDELL and T.D. JICKELLS, 1994: Atmospheric scavenging processes over the North Sea, *Atmos. Environ.*, **28**, 2 523-2 530.
- KNAP, A., T. JICKELLS, A. PSZENNY and J.N. GALLOWAY, 1986: Significance of atmospheric-derived fixed nitrogen on productivity of the Sargasso Sea, *Nature*, **320**, 158-160.
- MARTIN, J.-M., F. ELBAZ-POULICHET, C. GUIEU, M.-D. LOYE-PILOT and G. HAN, 1989: River vs atmospheric input of material to the Mediterranean Sea: An overview, *Marine Chem.*, **28**, 159-182.
- MICHAELS, A.F., D.A. SIEGEL, R.J. JOHNSON, A.H. Knap and J.N. GALLOWAY, 1993: Episodic inputs of atmospheric nitrogen to the Sargasso Sea: Contributions to new production and phytoplankton blooms, *Global Biogeochem. Cycles*, **7**, 339-351.
- NORTH CAROLINA DIVISION OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, 1985: *Nutrient Management in the Neuse Basin: An Update*, Raleigh, North Carolina.
- NORTH SEA CONFERENCE, 1987: *Quality Status of the North Sea. Second International Conference on the Protection of the North Sea*, London, Department of the Environment.
- OTTLEY, C.J. and R.M. HARRISON, 1993: Atmospheric dry deposition flux of metallic species to the North Sea, *Atmos. Environ.*, **27A**, 685-695.
- OWENS, N.J.P., J.N. GALLOWAY AND R.A. DUCE, 1992: Episodic atmospheric nitrogen deposition to oligotrophic oceans, *Nature*, **357**, 397-399.
- PAERL, H.W., 1985: Enhancement of marine primary production by nitrogen enriched acid rain, *Nature*, **315**, 747-749.
- PROSPERO, J.M., K. BARRETT, T. CHURCH, F. DENTENER, R.A. DUCE, J.N. GALLOWAY, H. LEVY II, J. MOODY and P. QUINN, 1996: Atmospheric deposition of nutrients to the North Atlantic Basin, *Biogeochemistry*, **35**, 27-73.
- QUINN, T.L., J.M. ONDOV and J.Z. HOLLAND, 1992:

Dependence of deposition velocity on the frequency of meteorological observations for the Chesapeake Bay, *J. Aerosol Sci.*, **23**, Suppl. 1, S973-S976.

ROJAS, C.M., J. INJUK and R.E. VAN GRIEKEN, 1993: Dry and wet deposition fluxes of Cd, Cu, Pb and Zn into the Southern Bight of the North Sea. *Atmos. Environ.*, **27A**, 251-259.

SCUDLARK, J.R. and T.M. CHURCH, 1993: Atmospheric input of inorganic nitrogen to Delaware Bay, *Estuaries*, **16**, 747-759.

SCUDLARK, J.R., K.M. CONKO and T.M. CHURCH, 1994: Atmospheric wet deposition of trace elements to Chesapeake Bay: CBAD study year 1 results, *Atmos. Environ.*, **28**, 1 487-1 498.

STRUYF, H. and R. VAN GRIEKEN, 1993: An overview of wet deposition of micropollutants to the North Sea, *Atmos. Environ.*, **27A**, 2 669-2 687.

VAN DEN HOUT, K.D. (Ed.), 1994: *The impact of Atmospheric Deposition of Non-Acidifying Pollutants on the Quality of European Forest Soils and the North Sea*, Report of the ESQUAD Project, IMW-TNO Report No. R 93/329, 121 pp.

VAN JAARSFELD, J.A., 1992: Estimating atmospheric inputs of trace constituents to the North Sea: methods and results, In: *Air Pollution Modelling and its Application IX*, van Dop and Kallos (Eds.), Plenum Press, New York, 249-258.

## La suscripción al *Boletín de la OMM* como un regalo

¿Por qué no ofrecer un año de suscripción al *Boletín de la OMM* a un amigo, colega o conocido, especialmente en un país en desarrollo, el cual esté interesado en la meteorología, hidrología o climatología?

Los precios para la suscripción por un año son:

Correo ordinario: 52 FF

Correo aéreo: 72 FF

Envíe nombre y dirección del suscriptor así como la versión del idioma (español, francés, inglés o ruso) junto con su giro a la Secretaría General de la OMM, Case postale 2300, CH-1211 Geneva 2, Suiza.

WARMENHOVEN, J.P., J.A. DUISER, L.T. DE LEU and C. VELDT, 1989: *The Contribution of the Input from the Atmosphere to the Contamination of the North Sea and the Dutch Wadden Sea*, TNO Institute of Environmental Sciences, Delft, the Netherlands, TNO Report R 89/349A, 126 pp.

WU, Z.Y., M. HAN, Z.C. LIN and J.M. ONDOV, 1994: Chesapeake Bay atmospheric deposition study, Year 1: Sources and dry deposition of selected elements in aerosol particles, *Atmos. Environ.*, **28**, 1 471-1 486.

# LOS BENEFICIOS DE LAS PREDICCIONES METEOROLÓGICAS

Por Eugene A. STALLINGS<sup>1</sup> y Danny L. FREAD<sup>2</sup>

*Este artículo es una versión resumida de un Informe Técnico, del mismo título, que se está preparando.*

El agua es un requisito esencial para mantener la vida, y sus diversos usos afectan a casi todas las fases de la existencia humana. Desde un punto de

vista nacional, en los EE. UU., el agua es abundante, pero la precipitación no se distribuye por el país uniformemente, por lo que las inundaciones y sequías son comunes. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) vigila los ríos de todo el país durante las 24 horas del día, y emite avisos para proteger vidas y propiedades cuando hay amenaza de riadas. Por desgracia, los daños que éstas causan continúan aumentando a pesar de las medidas estructurales y no estructurales para mitigarlos. Se estima que las inundaciones originan anualmente en toda la nación daños por valor de 3,6 billardos de \$ EE. UU.

<sup>1</sup> Antiguo director del Centro Nacional de Referencia del HOMS, EE. UU.

<sup>2</sup> Director de la Oficina de Hidrología del Servicio Meteorológico Nacional, Silver Spring, MD 20910, EE. UU.