

muchas otras características medioambientales con una precisión sin precedentes. Continuará la revolución de los ordenadores. Nuevos modelos de ordenadores serán capaces de estudiar el desarrollo de los sistemas meteorológicos a mesoescala y el detalle fino de la orografía. Avanzará rápidamente el desarrollo técnico y a la OMM le quedará una grandiosa tarea a realizar dirigiendo sus esfuerzos a disminuir la distancia entre los niveles de los servicios meteorológicos e hidrológicos de los países desarrollados y en desarrollo.

Estoy seguro de que habrá muchos campos, aún no tomados en consideración, en los que la OMM y los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos nacionales del mundo se enfrentarán a nuevos retos. Para mí, sin embargo, una cosa es cierta: como atestiguan los 40 años de registros, la OMM ha demostrado por sí misma ser una institución eficaz y eficiente y ahora está preparada para hacer frente a estos retos —previstos o no— y aprovechará las oportunidades que encuentre en el camino.

MODELIZACION DEL TRANSPORTE ATMOSFERICO A GRAN DISTANCIA

RESUMEN DE LA SEPTIMA CONFERENCIA OMI QUE SERA PRONUNCIADA EN EL UNDECIMO CONGRESO (MAYO DE 1991)

Por Anton ELIASSEN*

Está hoy perfectamente comprobado que las principales zonas industrializadas del mundo emiten grandes cantidades de contaminantes atmosféricos. La combustión de combustibles fósiles da como resultado la emisión de óxidos de azufre y de nitrógeno. La evaporación de disolventes y el almacenamiento y manejo de productos líquidos hidrocarbonados produce la emisión de una variedad de componentes orgánicos volátiles (VOC). Sólo en Europa, se emiten a la atmósfera cerca de 20 millones de toneladas métricas de azufre oxidado (considerado como azufre), así como 7 millones de toneladas de nitrógeno oxidado (considerado como nitrógeno) y 22 millones de toneladas de VOC de origen antropogénico. En América del Norte, las emisiones correspondientes son de 12, 6 y 22 millones de toneladas, respectivamente.

También es en las zonas industrializadas

del mundo donde se practica una agricultura intensiva, la cual emite grandes cantidades de amoníaco. Las emisiones de amoníaco (también denominadas de *nitrógeno reducido*, por contraposición al *nitrógeno oxidado*) en Europa totalizan 9 millones de toneladas.

Tras haber sido emitidos a la atmósfera, todos los contaminantes relacionados anteriormente se ven involucrados en distintas reacciones químicas. Cuando los elementos emitidos o sus productos de reacción se depositan finalmente en la superficie o entran en contacto con la biosfera, provocan una serie de efectos perniciosos. Estos efectos son, en parte, consecuencia de los elementos en fase gaseosa, tales como el dióxido de azufre o el ozono y, en parte, del depósito total de sustancias acidificantes tales como sulfatos o nitratos. Por encima de unos pocos cientos de kilómetros de la fuente, el depósito seco será generalmente el mecanismo más importante en la forma de depósito. A mayor distancia de la

* Instituto Meteorológico de Noruega

fuelle, el depósito húmedo predominará generalmente sobre el seco. Toda clase de fenómenos asociados con la emisión, el transporte por el aire y el depósito de estos elementos se denomina normalmente *lluvia ácida*. Este término es mucho más ampliamente conocido que el de “reducciones antropogénicas regionales en el pH de la lluvia”. Sin embargo, fue la reducción regional del pH de la lluvia el primer síntoma de los fenómenos de lluvia ácida que atrajo la atención de los científicos. A finales del decenio de los 60, Svante Oden, de Suecia, fue la primera persona que sugirió una relación entre las grandes emisiones de azufre de Centroeuropa y la alta acidez de la lluvia europea, y con los perniciosos efectos sobre los ecosistemas de agua dulce de Escandinavia.

En 1972, tras dos años de trabajo preparatorio y de discusiones entre científicos y políticos, la OCDE puso en marcha un programa técnico cooperativo cuyo objetivo era “determinar la importancia relativa de las fuentes locales y distantes de componentes de azufre en relación con su contribución a la contaminación del aire en una región, prestando especial atención al tema de la acidez en las precipitaciones atmosféricas”. Al comienzo de este programa, las discusiones todavía se concentraban en el tema de si cualquier cantidad significativa del azufre emitido era transportada a más de, digamos, 100 kilómetros. Sin embargo, cuando el programa de la OCDE acabó, en 1977, se confirmó que “los componentes del azufre se desplazan en la atmósfera a gran distancia (varios cientos de kilómetros o más)” y se demostró que “la calidad del aire de cualquier país europeo se ve afectada, de forma mensurable, por las emisiones de otros países europeos”.

Estas conclusiones fueron generalmente aceptadas por la comunidad científica. Retrospectivamente, es difícil comprender cómo es posible que mantuvieran durante tantos años las discusiones sobre la distancia a que llegaba el transporte. Podía ya disponerse,

desde hacía mucho tiempo, de investigaciones científicas de gran calidad sobre el ritmo de los depósitos secos de dióxido de azufre y de partículas de sulfatos. En este contexto, quiero hacer mención particular del trabajo que dirigió, durante los años 50 y 60, el Dr. A.C. Chamberlain, del Harwell Atomic Energy Establishment. En ausencia de precipitaciones, debería ser obvio que los compuestos de azufre pudieran ser transportados mucho más lejos, reduciéndose a la mitad la masa que permanecía en la atmósfera tras, aproximadamente, 20 horas. Por otro lado, la eficacia en la remoción de los depósitos húmedos estará limitada, al menos, por la frecuencia en la ocurrencia de la precipitación. No era difícil estimar que un contaminante en humo, emitido bajo condiciones secas, podría sobrevivir —dependiendo del lugar y del momento— durante, digamos, 50-70 horas, antes de chocar con la precipitación. La eficacia en la remoción combinada de esos dos procesos reduciría a la mitad la masa emitida a la atmósfera después de unas 15 horas. Estas consideraciones sencillas son de aplicación si se acepta que los compuestos emitidos y sus productos de reacción permanecen todo el tiempo en la capa límite atmosférica. En realidad, parte de la contaminación será transportada hacia arriba llegando hasta la troposfera libre. Más tarde se demostró que con depósitos húmedos, estando presentes sólo procesos de remoción, esta contaminación puede ser transportada a cientos de kilómetros. Sin embargo, los procesos dispersivos actuantes sobre distancias tan grandes diluirán la emisión de tal manera que raramente este tipo de depósitos pueden ser sospechosos de causar daños ambientales. Una excepción a esta regla general es la situación en la zona occidental de Escocia, donde el azufre y el nitrógeno emitidos en América del Norte pueden constituir una parte importante de los depósitos ácidos.

Desde finales de los años 70 en adelante, ha aparecido en las revistas internacionales una gran cantidad de material científico sobre la lluvia ácida. En 1979 la OMM tomó una

importante iniciativa y organizó un gran simposio internacional en Sofía, Bulgaria. En América del Norte, el transporte transfronterizo de la contaminación del aire, entre Canadá y los EE.UU., se ha reconocido que es un problema grave y que está vinculado con la acidificación de los lagos y ríos que tienen una mortalidad importante de peces. En ambos países se pusieron en marcha amplios proyectos de investigación y desarrollo, con los que se hicieron intentos de cuantificar el transporte transfronterizo mediante modelos de transporte atmosférico y de clarificar las relaciones muy complejas existentes entre los daños observados y los depósitos.

A finales de los años 70 y principios de los 80, la atención europea se volvió hacia lo que parecía ser una rápida propagación de los daños forestales. Por ejemplo, en la República Federal de Alemania, se estimó que el 8 por ciento de los bosques estaban dañados en 1982, el 34 por ciento en 1983 y el 50 por ciento en 1984. Está abierto a debate el fijar hasta qué punto esta imagen representa un aumento real en los daños forestales en unos pocos años, ya que es inherente a los métodos de estimación de los daños forestales una gran cantidad de incertidumbre. No obstante, es muy claro que, en un alto grado, los daños forestales se observaron en zonas donde no se esperaba que se produjeran, ya que las concentraciones contaminantes de los compuestos nocivos emitidos primordialmente —tales como el dióxido de azufre— no eran muy altas. Este tipo de daños forestales fue rápidamente relacionado con el transporte a gran distancia y el depósito de los contaminantes del aire. Los procesos reales por los que se producen los daños resultaron ser de gran complejidad causal —implicando también a procesos naturales tales como la tensión climática— y todavía no están bien comprendidos hoy en día. Sin embargo, es importante resaltar que, tras descubrir grandes daños en sus propios territorios, muchos de los países de Europa central han decidido participar activamente en las negociaciones internacionales para limitar las

cantidades de contaminantes del aire transportadas a gran distancia, así como sus efectos adversos. En un principio, este movimiento internacional estuvo falto de impulso, ya que estuvo conducido principalmente por la preocupación de los países que habían sufrido la degradación de sus ecosistemas acuáticos. Estos eran países con poca población y bajas emisiones de contaminantes aéreos.

Como resultado de esta situación, en noviembre de 1979, se firmó el Convenio sobre Contaminación transfronteriza del aire a gran distancia por prácticamente todos los países de Europa y de América del Norte, y entró en vigor en marzo de 1983. Cualquiera convenio de este tipo contendrá, por necesidad, compromisos. Ello fue, y no pequeño, un paso importante al comprometerse las partes contratantes (en el Artículo 2) a “esforzarse para limitar y reducir gradualmente, en todo lo posible, y prevenir la contaminación del aire incluyendo la contaminación transfronteriza del aire a gran distancia”.

Con el fin de apoyar las decisiones sobre la disminución de la contaminación del aire tomadas bajo este tipo de convenio, había que suministrar muchas clases de información cuantitativa. Son necesarios datos, por ejemplo, de la cantidad de depósitos contaminantes en cualquier posición geográfica y del origen de estos depósitos. Parte de esta información puede ser suministrada mediante una combinación de modelización meteorológica de la dispersión de los contaminantes del aire y de medidas. En Europa, esta responsabilidad incumbe al programa cooperativo para la vigilancia y evaluación de la transmisión a gran distancia de los contaminantes del aire en Europa (EMEP), un programa técnico que se halla dentro del marco del convenio anteriormente mencionado. El EMEP comenzó en 1977 con un centro de coordinación química (el Instituto noruego de investigación del aire) que organizó el programa de medidas, y dos denominados centros meteorológicos de síntesis (uno operado por el Comité del Estado de la URSS

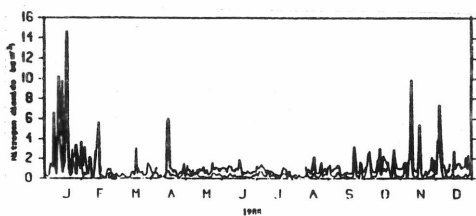


Figura 1.— Concentraciones calculadas (línea fina) u observadas (línea gruesa) de dióxido de nitrógeno ($\mu\text{g m}^{-3}$) en la estación noruega de Birkenes, en 1988.

Fuente: Centro Meteorológico de Síntesis del Oeste del EMEP (CMS-O).

para la hidrometeorología y otro por el Instituto Meteorológico noruego) que desarrollaron y pusieron en funcionamiento los modelos de dispersión de contaminantes y los cuales cooperan dentro del marco de la OMM.

Basándose en la información de las emisiones de contaminantes distribuida geográficamente y en los datos meteorológicos tomados fundamentalmente de las rutinas de predicción numérica (por ejemplo, series cronológicas de seis horas de las prognosis de seis horas de una ecuación primitiva, modelo

de área limitada), los modelos de dispersión de los contaminantes del aire realizan los procesos para producir los datos de concentraciones y depósitos con un lapso de resolución diario. Estos datos son comparados con los datos de observación de la red de estaciones del EMEP, que actualmente comprende unas 100 estaciones distribuidas a través de 24 países europeos. Cuando la concordancia entre los datos calculados y las medidas es suficientemente buena, puede asumirse que los cálculos tienen una razonable aproximación a la realidad. La información procedente de los cálculos del modelo sobre la importancia relativa de las fuentes locales y distantes puede servir de guía a las autoridades nacionales para el establecimiento de los apropiados niveles permisibles tanto locales como regionales, y puede servir de base para las estrategias de reducción regional internacionalmente aceptadas.

La concordancia entre los datos calculados y medidos conseguida hoy es realmente variable, pero es suficientemente buena como para mantener la confianza en los cálculos. La figura 1 muestra un ejemplo que es bastante

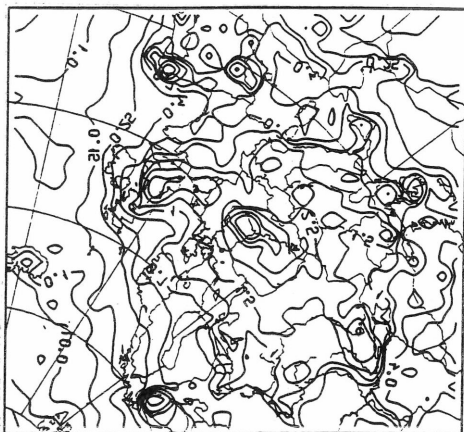


Figura 2.— Depósitos totales calculados de azufre oxidado sobre Europa durante 1988.

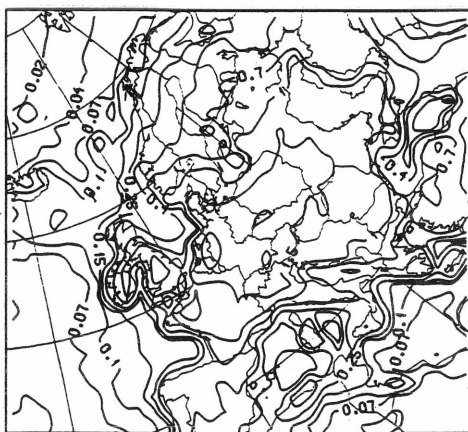


Figura 3.— Depósitos totales calculados de nitrógeno (oxidado más reducido) sobre Europa durante 1988.

Isolíneas de 0,01; 0,02; 0,04; 0,07; 0,1; 0,15; 0,25; 0,4; 0,7; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 7,0; 10,0 g m^{-2}

Fuente: Centro Meteorológico de Síntesis del Oeste del EMEP (CMS-O).

bueno para ser considerado típico, sin estar entre los muy buenos. La figura 2 muestra los depósitos totales calculados de azufre oxidado y la figura 3 los depósitos totales calculados de nitrógeno (nitrógeno oxidado y reducido).

En América del Norte, el trabajo sobre la lluvia ácida se desarrolló de un modo diferente de como se ha hecho en Europa. Los programas de medida puestos en marcha fueron generalmente intermitentes, de modo que hay pocas series con una duración muy larga. El método de modelización en América del Norte ha tomado la forma de grandes proyectos de desarrollo con el objetivo de producir modelos muy completos en los que estaban incluidas, en todo lo posible, la física y la química completas del transporte y depósito de la lluvia ácida. En particular, el modelo regional de depósitos ácidos (MRDA) fue desarrollado en los EE.UU. y el modelo de depósitos y oxidantes fue en su mayoría desarrollado con financiación canadiense. En Europa, y en apoyo de las negociaciones para la reducción de emisiones que han tenido lugar dentro del convenio de la contaminación transfronteriza del aire, la demanda de estimaciones cuantitativas de contaminación transfronteriza era tan grande que el método de modelización ha sido más pragmático, sacrificando la complejidad y la exhaustividad por los resultados. En América del Norte, la atención se centró rápidamente en problemas intrincados tales como las cuestiones de la *no linealidad* y de la *no proporcionalidad*; por ejemplo, sean o no lineales las reacciones químicas de los compuestos emitidos a la atmósfera, pueden dar como resultado una significativa relación no lineal entre una cierta emisión y sus depósitos. Las pruebas sugieren que, debido al complejo mecanismo para los depósitos húmedos, una reducción en la emisión de azufre puede producir un efecto menor que el proporcional sobre los depósitos en la zona próxima a la fuente y, en consecuencia, un efecto mayor que el proporcional en las zonas alejadas de ella. En cierto grado ello implicaría que una reducción de las emisiones decidida por un país podría

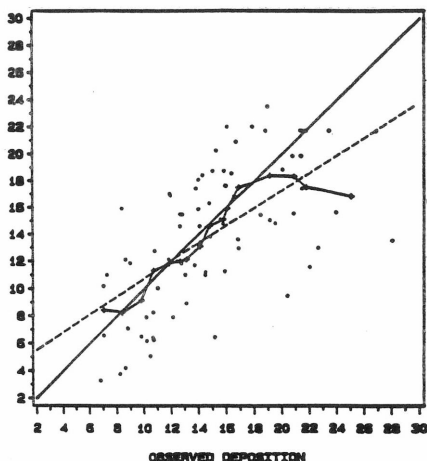


Figura 4.— Depósitos húmedos de nitrato calculados frente a los observados a largo plazo (1982-1985) en la parte oriental de América del Norte. Los cálculos se han realizado con el modelo regional de depósitos ácidos (MRDA), las medias a largo plazo se han construido a partir de los cálculos de 30 medidas durante tres días. La línea continua representa un cálculo perfecto, la línea de trazos representa la mediana móvil suavizada.

producir un menor efecto en el propio país, habiendo exportado la reducción de las emisiones. Claramente, éste no sería el mejor incentivo para emprender una acción unilateral. Afortunadamente, los trabajos recientes han demostrado que, aunque esta no proporcionalidad existe, es de poca importancia. Por otro lado, este problema fue una de las principales razones por la que se utilizaron muchos recursos para el desarrollo del modelo en América del Norte. Como resultado, aunque ahora disponemos de herramientas de modelización muy sofisticadas, estas son quizá más útiles para la investigación básica que para proporcionar a los que han de desarrollar las políticas sobre la lluvia ácida la información que ellos necesitan. En este contexto, el principal problema de los modelos exhaustivos para la lluvia ácida es que necesitan de enormes recursos de ordenador y todavía no pueden realizar el proceso para cubrir un año completo, por ejemplo. Por esto, los datos calculados para

largo plazo se construyen a partir de los datos de ocurrencia mediante un esquema de ponderación estadística. La figura 4 muestra los depósitos húmedos de nitrato *observados* respecto a los *calculados* deducidos por el MRDA mediante este método.

Las negociaciones sobre la reducción de emisiones realizadas dentro del convenio para la contaminación transfronteriza del aire han producido hasta el momento dos protocolos: uno para el azufre y otro para los óxidos de nitrógeno. El protocolo para el azufre exige a las partes contratantes (en la actualidad 20 países) la reducción de sus emisiones anuales de azufre (o de los flujos transfronterizos) en un 30 por ciento desde 1980 a 1993. El protocolo sobre los óxidos de nitrógeno exige a las partes contratantes (en la actualidad 16 países) que nivelen el aumento de sus emisiones de óxidos de nitrógeno, de modo que sus emisiones totales en 1994 no podrán exceder de las de 1987. Los datos oficiales de emisiones indican que las emisiones totales europeas de azufre se reducirán probablemente en más de un 30 por ciento. Estas reducciones se confirman cuando se combinan los datos calculados y medidos. El utilizar únicamente las medidas es insuficiente para este objetivo, ya que el efecto de los datos de reducción-emisión puede resultar fácilmente enmascarado por las condiciones meteorológicas variables. Actualmente las negociaciones están concentradas en un protocolo para los compuestos orgánicos volátiles (los cuales, junto con los óxidos de nitrógeno, generan oxidantes nocivos), en un segundo estadio para el protocolo sobre los óxidos de nitrógeno y en un nuevo protocolo

para el azufre. Se espera que estos acuerdos comprendan tanto a América del Norte como a Europa.

Hasta el momento, el problema de la lluvia ácida y el de la generación de oxidantes nocivos a escala regional ha sido motivo de preocupación principalmente para América del Norte y Europa. Sin embargo, otras partes del mundo van a tener probablemente problemas similares, particularmente donde una región altamente poblada e industrializada coincide con una geología sensible. Incluso en las dos regiones citadas anteriormente hay una creciente solicitud para que la reducción de las emisiones sea llevada a cabo de modo que sea alta la relación eficacia-coste. En otras zonas, en que la presión sobre los recursos disponibles para cubrir un sinnúmero de necesidades es mucho mayor, esta necesidad llega a ser mucho más importante. Considerando la posibilidad de daños de gran amplitud, sigo pensando que es aconsejable seguir de cerca la situación de la lluvia ácida en todas las principales zonas industrializadas del mundo, mediante medidas modestas y programas de modelización, ahora que el problema no parece ser todavía demasiado amplio. Después de todo, la situación puede evolucionar, como lo ha hecho en Europa, donde la contaminación del aire está considerada por siete países como el factor esencial en la determinación de la calidad de los bosques y en nueve países como uno de los factores que contribuyen al debilitamiento de la salud forestal y como el causante más general —particularmente en el norte de Europa— de serios daños a los ecosistemas acuáticos.