

«ESSA Technical Memorandum ERLTM-NHRL», 82. Environmental Science Services Administration, 36 págs.

ROSENTHAL, S. L. y KOSS, W. J. (1968): *Linear analysis of a tropical cyclone model with increased vertical resolution*. Pendiente de publicación en «Mon. Wea Rev.».

SHEETS, R. C. (1969): *Some mean hurricane soundings*. «J. Appl. Meteor.», 8, 134-146.

SIMPSON, J., BRIER, G. W., y SIMPSON, R. H. (1967): *STORMFURY cumulus seeding experiment 1965: Statistical analysis and main results*. «J. Atmos. Sci.», 24, 508-521.

SIMPSON, R. H. y MALKUS, J. S. (1964): *Experiments in hurricane modification*. «Sci. Am.», 211, 27-37.

SIMPSON, R. H.; NEIL Frank, SHIDLER, David, y JOHNSON, H. M. (1968): *Atlantic tropical disturbances, 1967*. «Mon. Wea Rev.», 96, 251-9.

SIMPSON, R. H.; NEIL, Frank, SHIDLER, David y JOHNSON, H. M. (1969): *Atlantic tropical disturbances, 1968*. «Mon Wea Rev.», 97, 240-255.

YAMASAKI, M. (1968): *A tropical cyclone model with parameterized vertical partition of released latent heat*. «J. Meteor. Soc. Japan», 46, 202-214.

LA METEOROLOGIA Y LA CONTAMINACION ATMOSFERICA DE LAS CIUDADES

Por Robert A. McCORMICK*

Consideraciones sanitarias

Las consecuencias de exceso de suciedad del aire son muy amplias y complicadas, pudiendo influir en la economía de las civilizaciones hasta interferir en los fenómenos físicos de la atmósfera y el clima. Sin embargo, es su efecto sobre la salud de los seres humanos el motor de la mayor parte de los intentos actuales para reducir los problemas de la contaminación. Los deletéreos efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud de los seres humanos dependen de su constitución química y de la concentración alcanzada en el aire. Al analizar los diversos tipos de agentes contaminadores se pueden agrupar en varias categorías importantes: cuerpos granulados, como partículas carbonosas, alquitranes, vapores ácidos, aceites, polvos metálicos y minerales, restos orgánicos, etc.; cuerpos de efecto irritante, como algunos gases y vapores y también algunos sólidos muy finamente divididos; oxidantes; y los venenos orgánicos, como la nicotina, el monóxido de carbono, los insecticidas agrícolas, cianuros y el ácido sulfhídrico. Naturalmente, esta clasificación ni es exclusiva ni pretende abarcar todos los agentes contaminantes del aire; tampoco permite adscribir determinados efectos patógenos a un solo agente aislado. De hecho no existen pruebas de que un solo contaminante sea responsable de alguna enfermedad humana producida por la suciedad de la atmósfera; por el contrario, es casi cierto que los efectos perjudiciales de la contaminación atmosférica son debidos a mezclas de impurezas de diversos tipos.

(*) NOTA: El Sr. McCormick ha sido cedido por la Administración del Servicio de Ciencias Naturales (ESSA) a la Sección de Meteorología de la Administración Nacional para el estudio de la contaminación del aire.

Algunos contaminantes parecen afectar a la salud más gravemente que otros; sin embargo, estas diferencias pueden ser debidas a la falta de pruebas escritas sobre los efectos de agentes menos conocidos, o al efecto multiplicativo de la asociación de varios agentes, ya mencionada. Los agentes contaminantes de mayor importancia son el anhídrido sulfuroso, los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono, ciertos cuerpos pulverulentos y algunos hidrocarburos; estos componentes extraños del aire están presentes en la atmósfera de las ciudades y adquieren concentraciones importantes a causa de la industrialización creciente, el aumento de población y de densidad de tráfico y debido a la proximidad de las zonas industriales a los distritos residenciales.

Los ciudadanos contribuyen por su parte a la contaminación del aire de muchos modos; el más importante es, quizás, la combustión de gasolina en el transporte automóvil. Al quemarse la gasolina se producen óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos y otros compuestos orgánicos de gran peso molecular que pueden ser carcinógenos, como los hidrocarburos polinucleares. Algunos de estos productos desempeñan un papel en la producción de nieblas o brumas tóxicas, que producen conjuntivitis, ataques de asma y cardíacos en personas que sufren de perturbaciones cardíacas y respiratorias, disminuyen la visibilidad y originan un cierto número de venenos para la vegetación. La combustión de gasolina etilada es la fuente principal de aerosol de plomo en el aire y al respirarlo, es la causa de que el organismo humano se cargue de plomo; en cuanto al efecto a largo plazo de este plomo sobre la salud humana, está aún por determinar. El monóxido de carbono ejerce su acción biológica al inactivar la hemoglobina, reduciendo así la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre.

El empleo de combustibles conteniendo azufre da lugar a la aparición de los anhídridos sulfuroso y sulfúrico en la atmósfera. Los focos de éstos van desde el hogar familiar, encendido por un individuo para calentar la vivienda, hasta los hornos industriales, en donde se queman cantidades colosales de combustibles para producir energía eléctrica, para fundir metales, tratar la pulpa de papel con sulfitos, refinado de petróleos y otras operaciones. Concentraciones elevadas de los anhídridos de azufre, sobre todo si hay también contaminantes pulverulentos, parecen aumentar la probabilidad del cáncer de pulmón y agravan el malestar debido a las enfermedades respiratorias crónicas, lo que, a su vez, hace aumentar el tanto por ciento de muertes y el coeficiente de morbilidad de estas enfermedades. Los niños en edad escolar, los ancianos y los enfermos parecen ser las personas más sensibles a los efectos perjudiciales de los óxidos de azufre; los daños mayores parecen producirse en la mitad inferior del aparato respiratorio.

Diversos tipos de aerosoles, en especial los compuestos por partículas de tamaño inferior a la micra, que pueden penetrar profundamente en las vías respiratorias, pueden servir de medio de transporte de contaminantes gaseosos tanto por absorción como por adsorción. En el interior de los pulmones esta combinación de impurezas puede ocasionar daños muchas veces mayores a los debidos a cada agente aislado. Estos crecientes efectos combinados son los que mencionamos más arriba como «multiplicativos» o «sinergismos» de los contaminantes y son los responsables de muchos ataques de asma bronquial, enfisema y otras enfermedades.

Los contaminantes de origen industrial, como el arsénico, el berilio y el asbesto, parecen tener efectos destructores sobre la salud humana; los gases que contienen sílice, emitidos por las fábricas que producen aleaciones ferro-

silíceas, son responsables de una mayor frecuencia en las infecciones respiratorias y otorrinológicas de los niños pequeños

Se han descubierto muchos otros agentes contaminadores del aire en el ambiente de las ciudades y de las comarcas industrializadas, pero se dispone de pocas pruebas sobre sus efectos patógenos. Además, los problemas sanitarios que plantea la contaminación del aire en los distritos urbanos o industrializados son confusos por carecerse de informaciones precisas sobre la



Niebla sobre Denver, Colorado, EE. UU., en octubre de 1963 (Fotografía de la Administración Nacional para control de la contaminación del aire)

acción de las impurezas de la atmósfera y los efectos de las tensiones ambientales como el fumar o el estar aglomerados permanentemente.

El papel de la meteorología

La importancia de los factores meteorológicos en la fase de transporte y difusión del ciclo de la contaminación atmosférica está bien reconocida y hay bastantes trabajos sobre este tema: véanse Pasquill, 1962 *; Slade, 1968, y Scorer, 1968. No es tan evidente, pero no es menos importante el papel que desempeñan los parámetros meteorológicos en las fases de emisión y sedimentación de impurezas en la atmósfera. La emisión que se produce al quemar combustibles fósiles, debida al calentamiento del aire, está relacionada con la temperatura de éste; ciertos agentes aeroalérgenos, como el polen de algunos vegetales silvestre, se desprenden solamente entre ciertos valores de temperatura y de humedad; el arrastre del polvo por el viento y su elevación en la atmósfera dependen de la velocidad del viento; la altura efectiva de la columna de humos calientes salidos de las chimeneas depende de la temperatura del ambiente, del grado de estabilidad y de la velocidad del viento.

La formación de contaminantes secundarios por reacción fotoquímica sobre las comarcas urbanas, está gobernada no sólo por el ritmo de producción de los reactivos en el aire, principalmente debidos a los automóviles, sino también por la velocidad del viento, el espesor de la capa turbulenta, la temperatura del aire y la radiación solar; otras reacciones secundarias pueden depen-

(*) Véase la bibliografía al final del artículo.

der también de la humedad del aire, como en la transformación del gas anhídrido sulfuroso en gotillas de ácido sulfúrico. El barrido de las suciedades atmosféricas por las lluvias es un mecanismo limpiador de importancia, pero puede producir la contaminación del suelo.

El efecto de los agentes contaminantes sobre muchos receptores puede depender del estado atmosférico: los fenómenos de corrosión dependen de la humedad del aire tanto como de la concentración de los agentes corrosivos y la sensibilidad de algunas especies vegetales a la contaminación atmosférica depende de la intensidad de la luz incidente, de la humedad relativa y de la temperatura del aire (Heck *et al.*, 1965).

La eliminación de las impurezas atmosféricas presenta problemas técnicos y exige esfuerzos económicos, en general, y depende muy poco de la ciencia meteorológica; pero la meteorología puede y debe contribuir de muchos modos importantes a los trabajos de vigilancia de la contaminación del aire, incluyendo los estudios, las inspecciones topográficas y los programas de trabajo; esta colaboración puede distribuirse en las siguientes categorías de actividades, que no son incompatibles entre sí:

(1) Valoración de la efectividad de las medidas tomadas para reducir o eliminar un foco o un grupo complejo de focos de contaminación. En principio esto podría conseguirse efectuando un número suficiente de medidas de la pureza del aire en los sitios adecuados durante los períodos necesarios de tiempo y en las épocas convenientes; sin embargo, el meteorólogo, empleando *todas* las herramientas científicas de análisis y de predicción de que dispone, puede reducir con frecuencia notablemente el tiempo necesario y el costo de tales valoraciones.

(2) Presentar el marco analítico fundamental para el desarrollo de los proyectos y métodos de ataque que produzcan la mayor relación entre beneficio y coste, en la parte en que están relacionados con los fenómenos atmosféricos. La actuación de una organización responsable de la eliminación exige el considerar los métodos necesarios para dominar la contaminación atmosférica con el mínimo coste posible o perturbación económica; cualquier plan provisional de eliminación de impurezas no será válido si no tiene en cuenta el poder difusor y de transporte de la atmósfera y su variabilidad.

(3) Predecir la distribución de concentraciones de los agentes contaminantes, en tiempos y a distancias adecuadas, bajo la hipótesis de la emisión *normal* de impurezas por los manantiales de contaminación y con niveles prefijados de reducción de aquellas. El corazón de cualquier sistema efectivo de avisos de contaminación del aire debe ser una predicción meteorológica, a partir de la cual se decidirá la aplicación de un plan de eliminación de contaminantes o se dejará en suspenso. Cualquier sistema de actuación fundado *solamente* en la pureza actual del aire resultará finalmente inútil, porque ignora el fenómeno atmosférico variable de la difusión de las impurezas. La realización de planes de protección contra emisiones accidentales masivas de contaminantes debe hacerse tan sólo después de un estudio cuidadoso de *todos* los factores en juego, pues fácilmente pueden ocasionarse perturbaciones económicas y de actividad de la ciudad, de mayor importancia que la debida al accidente. Además, las disposiciones que se tomen en un caso dado deberán ser función de los parámetros meteorológicos del momento —siendo el más aparente el de la dirección del viento— y deben ser predecibles los efectos *cuantitativos* de aquellas medidas sobre la pureza del aire, para poder obtener la mayor relación costo/beneficio.

(4) Analizar las relaciones que pueda haber entre los focos de contaminación actuales o futuros y la pureza normal de aire. La eliminación de las suciedades atmosféricas debe conseguirse reduciendo o eliminando la contaminación emitida por cada foco, uno tras otro; excepto si se trata de un manantial aislado, los valores normales del máximo de *emisión* por sí mismos valen muy poco, a menos que el *efecto aditivo* de varios focos de un mismo contaminante quede por debajo de los requisitos establecidos por los patrones de calidad del *aire ambiente*. Tales estudios deben tener en cuenta, cuantitativamente, la influencia de los fenómenos meteorológicos.

lógicos que producen una mayor o menor difusión de las impurezas entre los manantiales de ellas y los espacios receptores. En la actualidad pocas autoridades aceptarían el punto de vista de que, para reducir a la mitad la concentración de un agente contaminante determinado en la atmósfera de una ciudad, al coste mínimo en un momento determinado, se deba, simplemente, reducir a la mitad la emisión de dicho contaminante en *todos* los focos.

(5) Introducir los resultados de la climatología de la contaminación atmosférica en la organización de programas de protección del aire a largo plazo. Esta práctica ha sido seguida desde hace mucho tiempo en los ilustrados e inteligentes sistemas de desarrollo industrial y ciudadano y las ventajas de hacerlo así están siendo cada vez más apreciadas por las partes más ocultas del mundo comercial e industrial, así como por las Oficinas de organización comunitaria.

En los apartados siguientes de este breve resumen se pretende analizar los elementos más importantes de este asunto de un modo que ofrezca una amplia perspectiva del estado actual de nuestros conocimientos y revele las deficiencias más molestas; se subrayan en particular aquellos aspectos en los cuales los servicios meteorológicos nacionales pueden realizar un trabajo importante dentro del campo de sus actividades normales.

La capa atmosférica de la ciudad

En términos climatológicos la sucesión de los ciclos diario y anual de situaciones atmosféricas, así como la evolución diaria, semanal y anual de los ritmos de emisión de agentes contaminantes, da lugar a una distribución de la contaminación del aire de las ciudades, en sucesión ordenada y predecible. Por el contrario la situación sinóptica diaria puede presentar desviaciones muy grandes de la *normalidad* climatológica, de hasta tres órdenes de magnitud o más, en la concentración de impurezas. Salvo en el caso de emisiones accidentales de grandes cantidades de contaminantes, la variabilidad observada es debida casi totalmente a la variabilidad de los elementos meteorológicos que rigen el transporte y la difusión en la atmósfera de las ciudades y este hecho no es posible sobrevalorarlo.

Las características de la contaminación atmosférica de una ciudad están determinadas por las fuentes de contaminantes de más importancia y por el clima de la comarca. Los dos tipos más importantes se muestran resumidos en la adjunta tabla 1, correspondiente a Los Angeles y a Londres.

Aunque los tipos de contaminación atmosférica indicados en la tabla anterior son ejemplos de los que la mayor parte de los seres humanos deberán experimentar un día u otro, sería un error, sin embargo, creer que son las únicas contaminaciones importantes; de hecho no hay situación atmosférica a la cual no pueda asociarse alguna clase de problemas de contaminación atmosférica grave si existen focos de contaminación apropiados y están situados de un modo favorable para ello; por ejemplo, si reinan vientos intensos, con la llamada buena ventilación puede producirse un descenso aerodinámico de contaminantes hasta el nivel de la calle, de impurezas procedentes de complejos industriales o aún residuales defectuosamente proyectados. Los fenómenos de lavado de la atmósfera debidos a la lluvia y otras precipitaciones pueden purificar el aire pero contaminan las tierras y los recursos hidráulicos, cambiando de lugar el problema pero sin eliminarlo.

Para cualquier distribución de los focos de contaminación, la difusión de las impurezas está ampliamente gobernada por los campos de viento y de temperatura existentes en la capa de aire yacente sobre la comarca urbana,

que llamaremos *capa ambiental*. La estructura de la capa ambiental de una ciudad es muy distinta, en general, de la observada en las comarcas rurales vecinas, en donde se encuentran las estaciones de radiosondeos; no es sorprendente por ello, que los modelos de difusión en una ciudad, fundados en observaciones de la difusión existente en condiciones permanentes sobre terrenos homogéneos y lisos, no sean aplicables, al menos directamente; en las ciudades, los agentes contaminadores se difunden *por dentro* y entre los elementos rugosos gracias a movimientos turbulentos cuya escala de dimensiones no es comparable con la de las «rugosidades» (p. ej., los edificios).

T A B L A I

Comparación entre las brumas tóxicas de Los Angeles y Londres

<i>Características</i>	<i>Los Angeles</i>	<i>Londres</i>
Temperatura del aire	24 a 32° C	— 1 a 4° C
Humedad relativa	Menor del 70 %	85 % (más niebla)
Tipo de inversión térmica	Subsistencia	Radiación, junto al suelo
Velocidad del viento	Menor de 3 m/sg	Calma
Visibilidad	De 0,8 Km. a 1,6 Km	Menor de 50 m
Meses de mayor frecuencia	Agosto y septiembre	Diciembre y enero
Combustible más empleado	Petróleo	Hulla y derivados del petróleo
Contaminantes principales	O ₃ , NO, NO ₂ , CO y cuerpos orgánicos	CO, compuestos de azufre, partículas sólidas
Tipo de reacciones químicas	Oxidantes	Reductoras
Hora de aparición más frecuente	A mediodía	De madrugada
Efectos sobre la salud	Conjuntivitis	Tos y bronquitis

Los estudios efectuados con sondas colgadas de alambres y con instrumentos transportados por un helicóptero han demostrado que las modificaciones que una ciudad produce en la capa ambiental correspondiente son especialmente importantes por la noche, según muestran los perfiles térmicos verticales. La capa ambiental de las ciudades es mucho menos estable que el aire de las capas inferiores situado sobre los campos circundantes a barlovento de la ciudad; existen múltiples inversiones en altura y el aire sobre la ciudad es frecuentemente más frío que sobre el campo, al mismo nivel. La figura 1 esquematiza las principales diferencias en la variación diurna de la estabilidad de estratificación (con cielos despejados) sobre terrenos edificados y sobre campos próximos, y los efectos consiguientes sobre la difusión de los contaminantes procedentes de focos altos y bajos. En las ciudades, la

contaminación procedente de millares de focos situados al nivel del suelo se distribuye en una delgada capa de mezcla, extendiéndose hacia arriba solamente durante la noche

Resulta evidente que el conocimiento de la estructura media y turbulenta del campo de vientos a través de y sobre una ciudad es fundamental para el estudio del transporte y dilución de la contaminación urbana. Por ello es decepcionante comprobar que pocos datos se tienen de esta estructura. En principio, la medición del viento es engañosamente sencilla, pero en la práctica la medida tan sólo de la componente horizontal se vuelve enormemente difícil, ya que varía constantemente en el espacio y en el tiempo y se ve gravemente afectada por la colocación y las características del elemento de medida. En las zonas urbanas gran parte de los datos necesarios deben obtenerse en las anfractuosidades creadas por los edificios, mientras que la corriente *no perturbada* aparece a varios cientos de metros de altura y así está fuera del alcance de los métodos convencionales de medida del viento.

No falta del todo, afortunadamente, la información y Munn (1968) ha publicado un excelente estudio sobre las corrientes de aire en las zonas urbanizadas. La velocidad del viento en una ciudad es del orden de los dos tercios de los valores medios en un aeropuerto próximo y las direcciones difieren en 30 grados a uno y otro lado. Estas relaciones son de carácter fundamentalmente climático y tienen utilidad para obtener diagramas de corrientes medias. Pooler (1963) demostró que la estructura de una ciudad crea sus propias modificaciones de las corrientes aéreas e indicó el modo de descubrirlas; su trabajo tiene una importancia fundamental en el problema de la contaminación atmosférica, en especial porque demuestra que cuando la ventilación a gran escala disminuye, predomina la influencia de la ciudad. En líneas generales una ciudad produce ligeras brisas centrípetas de 1 a 2 metros por segundo.

Las corrientes verticales sobre las ciudades son más intensas que sobre la campiña, independientemente de la hora del día y todavía más importante es el hecho de que la radiación de calor y la mayor rugosidad superficial en la ciudad produce una mezcla vertical aún en momentos en que ésta es nula sobre los campos vecinos; el efecto se refuerza aún más cuando, como sucede en tantas de las grandes ciudades de la tierra situadas a la orilla del mar, el viento sopla desde éste hacia la ciudad; durante este movimiento, las velocidades verticales pueden crecer hasta hacerse tres o cuatro veces mayores.

Como las fuentes de contaminación en las zonas urbanas se encuentran a alturas muy variadas, desde el suelo —automóviles— hasta varias decenas de metros —chimeneas de centrales termoeléctricas—, es esencial un buen conocimiento de la estructura tridimensional de las corrientes aéreas sobre las ciudades para poder predecir la distribución de concentraciones de un contaminante, como han demostrado elocuentemente los estudios de Georgii y colaboradores (1967) sobre la distribución del CO de Francfort del Mein. La obtención de más y mejores datos en relación con los campos de viento y de temperatura sobre las ciudades es de gran urgencia y estos conocimientos serán de notable valor para otros campos diferentes del de la contaminación atmosférica; la necesidad de conocer estos campos de valores para diversas aplicaciones y técnicas pudo apreciarse claramente en el Simposio OMM/OMS sobre climas urbanos y climatología de la edificación, celebrado en Bruselas el mes de octubre de 1968 (crónica del Simposio: Boletín de la OMM, Vol. XVIII, núm. 1, págs. 36 y sig.) (Chandler, 1969).

Los métodos de sondeo a distancia, o indirectos, que se están perfeccionando rápidamente, parecen prometedores en sus aplicaciones urbanísticas y debieran ser empleados exhaustivamente. En tales procedimientos, la respuesta a la magnitud de los diversos parámetros meteorológicos, o a la concentración de impurezas, depende de otros fenómenos físicos: dispersión o

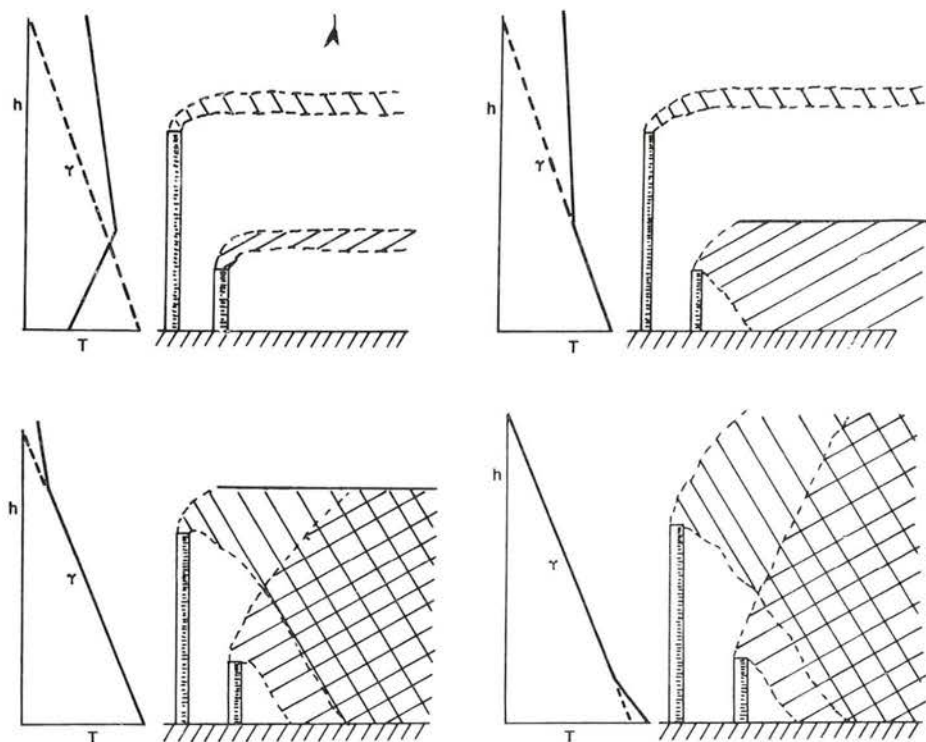


Figura 1.—Representación esquemática de la variación a lo largo de veinticuatro horas, con cielo despejado, de la difusión de las impurezas emitidas por focos altos y bajos en ambientes rural y urbano (sólo difieren durante la noche), en función del gradiente térmico vertical del aire: γ representa el gradiente adiabático seco y la línea continua muestra el gradiente real del aire (curva t' ; h). (1.—Area rural, de noche; 2.—Area urbana, de noche; 3.—Areas rural y urbana, por la mañana (fumigación); 4.—Areas rural y urbana, a medio día)

absorción de la radiación electromagnética, cambios en la velocidad o índice de refracción de las ondas acústicas, etc. En la mayoría de estos sistemas el medio —la atmósfera— no es perturbado sensiblemente por el método de medición de su estado físico.

Modelos matemáticos de la contaminación atmosférica urbana

En 1956 efectuó Frenkiel el primer intento de reproducir matemáticamente la distribución de la concentración de las contaminaciones atmosféricas en el valle de Los Angeles, empleando las posibilidades de las calculadoras

electrónicas de gran velocidad. Desde entonces se han creado una multitud de modelos matemáticos de la contaminación en la atmósfera de las ciudades y no hay signos de cualquier debilitación de este impulso. Wanta (1968) y Neiburger (1968) han publicado recientemente dos excelentes trabajos analizando estos esfuerzos de creación de modelos.

Los muchos libros publicados recientemente —Pasquill (ibíd); Scorer (ibíd.); Smith, M. E. (1968); Slade (ibíd). —y artículos de revista— especialmente en *Atmospheric Environment* publicado por la Pergamon Press —sobre los métodos empleados para predecir la difusión atmosférica, demuestran todos el vigoroso avance de la investigación y el interés público despertado. Aunque en la pasada década no se ha logrado ningún perfeccionamiento notable en el estudio básico de la difusión atmosférica, se han creado varias ecuaciones empíricas muy útiles; cuando estas fórmulas se emplean con cuidado y teniendo en cuenta las frecuentes complejidades de las situaciones reales, pueden proporcionar estimaciones muy valiosas y aproximadas de la difusión atmosférica. A causa de los varios tipos muy diferentes de problemas relacionados con la contaminación —por ejemplo la predicción, estudios del medio aéreo, valoración de los planes de lucha contra la contaminación, etcétera— a los cuales deben aplicarse con rapidez los modelos, debiera recibir una máxima prioridad un análisis crítico de determinación de la validez cuantitativa de los modelos, en relación con las diversas clases de problemas a que deberán aplicarse.

Sin una adecuada experimentación para averiguar los límites de aplicabilidad, los modelos de difusión son meros ejercicios académicos; por ello, desde hace ya varios años se está trabajando experimentalmente empleando indicadores radiactivos meteorológicos. Con pocas excepciones, estas investigaciones se han efectuado sobre terrenos relativamente lisos y poco accidentados, de modo que los resultados no dependían críticamente de los detalles topográficos de la estación de observación y recogida de muestras. Como es muy discutible el empleo de estos resultados para estimar la estructura de la difusión en las ciudades, se han iniciado nuevos experimentos para describir detalladamente la estructura turbulenta y consiguientes características difusivas de la atmósfera de las ciudades; hasta la fecha se han publicado estudios de difusión de indicadores radiactivos por lo menos en ocho ciudades distintas. Al comparar los resultados de estos trabajos con los experimentos análogos hechos sobre terrenos poco ondulados al aire libre, se ha deducido que, en una primera aproximación, para fuentes puntuales de impurezas a poca altura sobre el suelo, la zona urbana afecta a la difusión transversal principalmente porque aumenta el tamaño inicial —es decir, cerca del foco— del penacho de gases.

La idea de estudiar la difusión en las ciudades ensayando los modelos en túneles de viento es atrayente ya que permite distribuir a voluntad los focos de contaminación y modificar arbitrariamente las condiciones de la capa ambiental a la vez que proporciona mucho tiempo para hacer mediciones relativamente económicas; sin embargo, estas posibilidades serían inútiles si el principal mecanismo responsable de los fenómenos de difusión de las contaminaciones, la velocidad media del viento y la estructura turbulenta de la atmósfera, no fuese reproducido con precisión; ahora bien, la posibilidad de que los túneles de viento actuales puedan reproducir con precisión la gran variedad de circunstancias que existen en la capa ambiental de las ciudades, es discutida seriamente.

Los estudios experimentales, aunque ya considerables, representan tan sólo el principio del esfuerzo necesario. Por ejemplo, la investigación aún no ha valorado cuantitativamente la magnitud de los parámetros de difusión urbana en función de los fenómenos y parámetros meteorológicos directores; tampoco ha catalogado las dimensiones iniciales del penacho de humo en función de ciertos factores importantes, como la altura de los edificios, su anchura y densidad. Las dimensiones verticales del penacho y los parámetros reales de difusión son casi totalmente desconocidos; la difusión relativa de los focos altos y bajos en función de los complicados regímenes térmicos horizontales y verticales está por determinar. Solamente se han empezado algunos estudios, sólo a nivel del suelo, sobre los efectos de pequeños recorridos de mezcla y difusión con focos de impurezas elevados, a más de varios kiló-

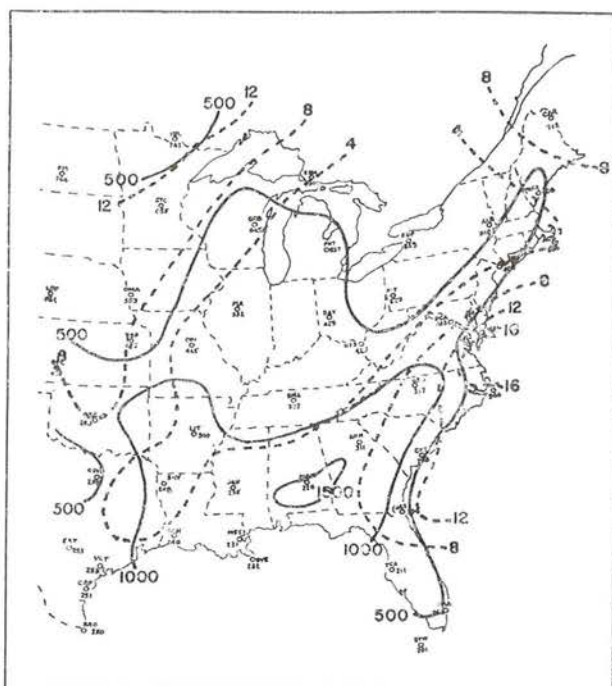


Figura 2. — Día 1 de diciembre de 1962: isopletas de la altura de mezcla sobre el suelo (en metros) —línea continua—; en líneas de trazos la velocidad del viento en (m/seg.) promediada según la vertical dentro de la capa de mezcla. Diagrama trazado a base de los radiosondeos efectuados en las estaciones aerológicas indicadas, las temperaturas máximas en superficie y la hipótesis de un gradiente adiabático seco a través de la capa de mezcla (Holzworth, 1969)

metros de distancia; a tan grandes distancias a sotavento de la fuente los efectos de la cizalladura del viento, en especial sobre el ensanchamiento transversal del penacho, pueden volverse excesivamente predominantes. Y finalmente, los fenómenos de transporte y de difusión en zonas costeras y terrenos muy quebrados deberán ser, casi con toda certeza, independientemente determinados.

Servicios de predicción

A la par de los progresos en los métodos de vigilancia de la contaminación atmosférica y en la organización de sistemas de eliminación de las

impurezas (por ejemplo, se pide a ciertas industrias seleccionadas que pasen de consumir combustibles con bastante contenido de azufre a emplear otros con muy poca riqueza de azufre), la eliminación exige el desarrollo y funcionamiento cotidiano de un servicio de predicciones o «avisos» para poner en marcha el dispositivo de vigilancia y eliminación. En la mayoría de los casos tales servicios de avisos deben ser de la responsabilidad del servicio meteorológico nacional a causa de la necesidad de datos fundamentales y de los problemas de la predicción. En los pocos casos que hasta la fecha se han hecho públicos, en los Estados Unidos se ha desarrollado el esfuerzo principal en la predicción de «la contaminación potencial del aire», en tanto que en el Reino Unido se emiten «avisos de contaminación atmosférica». El primero se define como: un conjunto de condiciones meteorológicas sobre regiones muy extensas, que pueden dar lugar a concentraciones elevadas de los contaminantes emitidos por millares de focos familiares en las concentraciones urbanas. Esta definición se funda solamente en la situación atmosférica, con abstracción de que una ciudad o comarca industrial esté o no dentro de la región afectada. En Gran Bretaña el aviso se emite cuando se prevé la aparición de un conjunto de factores meteorológicos que están asociados a una concentración excesiva de las impurezas tóxicas en la atmósfera.

Desde que se inició la difusión del programa de Predicción de la contaminación potencial del aire, en 1960, se ha dirigido la investigación en los Estados Unidos a mejorar la calidad de las predicciones; en particular se pretende fundar las predicciones en criterios más objetivos, haciendo cuantitativas las predicciones y aumentando el lapso de tiempo de preaviso de la predicción; en la actualidad los parámetros principales sobre los que se basan las predicciones son la plenitud de mezcla y la velocidad media del viento a esta capa. El máximo de mezcla matutino corresponde aproximadamente a las horas de máximo consumo y de mayor concentración de contaminantes en las ciudades; el máximo de mezcla vespertino coincide, aproximadamente, con el mínimo usual de concentración de contaminantes primarios. La figura 2 presenta un ejemplo de distribución espacial excepcionalmente reducida de máximos de mezcla vespertinos y de velocidades medias del viento durante un prolongado episodio de contaminación atmosférica importante. En general, las horas siguientes al mediodía corresponden al momento diario de máximos, plenitud de mezcla y de velocidad del viento.

El progreso en la predicción de las *concentraciones* reales de contaminantes ha sido lento debido a las muchas dificultades encontradas en: (a) desarrollo y *verificación* de los modelos de difusión en ciudades con la adecuada multiplicidad de focos de contaminación; (b) la obtención de informaciones adecuadas sobre los manantiales de contaminación, sus distribuciones espacial y temporal y su variabilidad, y (c) el desarrollo de la información y la predicción de los elementos meteorológicos (a saber, campos de viento y de temperatura) a las escalas apropiadas para el problema.

En este último terreno se requieren urgentemente esfuerzos coordinados de los servicios meteorológicos nacionales. Con respecto a los puntos (a) y (b) es esencial una estrecha colaboración y un enlace con las Oficinas de inspección de la contaminación atmosférica y los organismos sanitarios, ya que la información de datos no meteorológicos es esencial para preparar cualquier sistema de trabajo válido para hacer predicciones cuantitativas.

La meteorología en las actividades de eliminación

El efecto de un manantial o de un amplio conjunto de focos emisores de suciedad sobre la calidad del aire circundante debe estar relacionado en última instancia con la decisiva cuestión de quién debe disminuir su emisión de impurezas, en qué proporción y cuándo, con objeto de obtener un nivel aceptable de pureza en el aire de la ciudad. Las determinaciones *cuantitativas* deben indicar cuáles son las concentraciones de contaminantes que resultan perjudiciales para la salud o el bienestar o dañosas de algún otro modo. Se requiere una base científica y técnica para discutir sobre la existencia real de un problema de contaminación atmosférica que deba ser resuelto. A causa de las limitaciones de tiempo y la escasez total de mediciones de pureza del aire, es en gran parte tarea del meteorólogo el presentar pruebas convincentes de la magnitud y frecuencia del transporte y disolución del agente contaminante; este es, también, *el límite* de su responsabilidad.

La figura 3 es un diagrama que muestra, esquemática y claramente, la vital importancia del modelo meteorológico de transporte de contaminaciones por el aire en el programa de actividades para la lucha contra la contaminación. La *región* es la superficie del complejo urbano o industrial al cual serán aplicadas las medidas de lucha correspondientes; nótese que el modelo debe ser capaz de *reaccionar* a las transformaciones sucesivas que experimenten los focos y deberá permitir la obtención de las soluciones *óptimas* para los problemas agudos y crónicos.

En su *momento de verdad* el meteorólogo deberá proporcionar estimaciones suficientemente razonables para soportar las críticas de colegas pertenecientes a otras disciplinas científicas y técnicas, así como la discusión con meteorólogos y representantes de intereses políticos. Para conseguir esto, deberá hacer uso de los métodos clásicos de análisis y predicción del repertorio meteorológico, así como de otros más modernos y complicados. La fotografía aérea, las muestras de aire a diversas alturas, rosas de viento de la contaminación, lanzamiento de globos de presión constante y experimentos con indicadores radiactivos pueden ser empleados para obtener las informaciones necesarias para efectuar los cálculos del flujo de contaminación en una zona y para comprobar su exactitud. También deben recogerse muestras de aire en el suelo, con equipos fijos o móviles y formar estadísticas de la cantidad de emisión y la distribución topográfica de los manantiales de contaminación. En cierta ocasión, que se publicó, se pudo valorar directamente el flujo de masa de contaminante a través de una frontera política, mediante mediciones de correlación espectrométrica del agente contaminador desde un avión que volaba sobre el techo de la capa de mezcla, unido a observaciones del perfil vertical de vientos.

Cuando se deban determinar las exigencias de máxima emisión de contaminación aceptable para *cada uno* de los principales focos contaminadores, superando los varios cientos, quizá, en una ciudad, con objeto de obtener un valor normal de pureza del aire, será prácticamente imposible obtener datos independientes que apoyen los requisitos de reducción de *cada uno* de los focos. En estos casos deberá emplearse una formulación adecuada de la difusión valorada razonablemente y aplicada con prudencia, para estimar la magnitud del problema y la importancia relativa de cada generador de impurezas.

El problema de operación más crítico es el de estimar la difusión atmosférica en y sobre una ciudad con vientos muy flojos y variables, cuando la distribución de la concentración de los contaminantes no es estacionaria. La aplicación del *modelo de caja* para obtener un valor de la concentración *media* puede no ser absurda si la mayor parte de los focos contaminadores están a poca altura confinados dentro de la capa de mezcla. Si hay influencias o restricciones topográficas importantes sobre el movimiento del aire y si algunos manantiales de impurezas están a alturas efectivamente grandes, entonces aquella representación simplificada no será justificable.

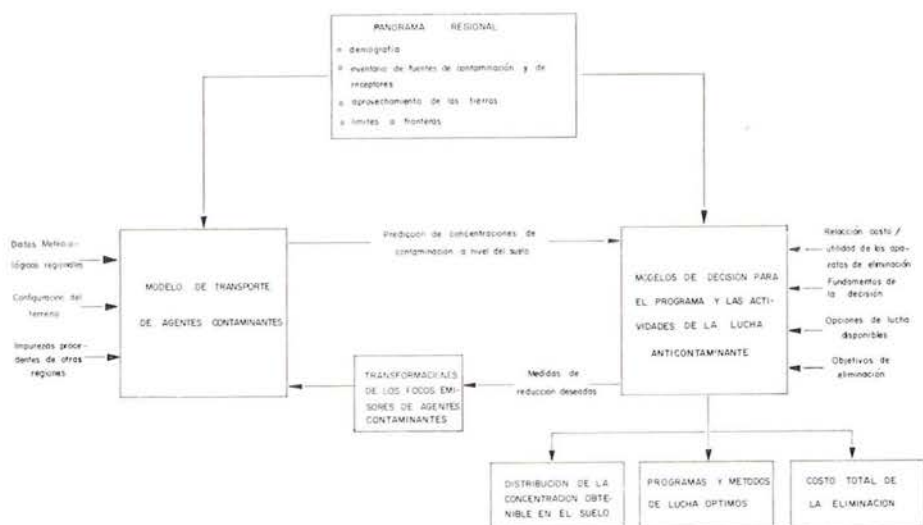


Figura 3.—Principales elementos componentes de un sistema modelo para la lucha contra la contaminación atmosférica

En resumen, los más difíciles problemas meteorológicos presentados por la contaminación atmosférica cuando se trata de decidir una campaña de eliminación aparecen en la estimación *cuantitativa* del transporte y difusión de los contaminantes procedentes, en general, de múltiples fuentes heterogéneas. En la investigación y en la práctica, tales valoraciones son una exigencia técnica para la realización de los objetivos técnicos y de organización; en estudios de eliminación de la contaminación pueden ser una obligación legal. Para cubrir estas necesidades será imperativa la ampliación de los organismos urbanos de los servicios meteorológicos nacionales; de hecho esta ampliación ha empezado ya en los Estados Unidos. El perfeccionamiento del servicio meteorológico en relación con las actividades de lucha contra la contaminación atmosférica de las ciudades puede ser aplicado igualmente a resolver otros problemas, como los derivados del efecto que los fenómenos atmosféricos producen en la estructura de los edificios, como la

predicción de tormentas locales violentas, de nevadas y de su persistencia, influencias sobre el transporte y el comercio, y la determinación de la bioclimatología del ambiente ciudadano y de sus alrededores.

BIBLIOGRAFÍA

- CHANDLER, T. J. (1969): *Climas urbanos y climatología de la construcción* «Bol. de la OMM», XVIII, 1, pág. 36.
- FRENKIEL, F. N. (1956): «Ann. Rept. Smithsonian Inst.», pág. 269.
- GEORGH, H. W.; BUSCH, E, y WEBER, E. (1967): *Untersuchung uber die zeitliche und raumliche Verteilung der Immisions-Konzentration des Kohlenmonoxid in Frankfurt am Main*. Informe del Instituto de Meteorología y Geofísica, Univ. de Francfort/Main.
- HECK, W. C.; DUNNING, J. A., y HINDAWI (1965): «Jour Air Poll. Cont. Assn.», 15, pág. 511.
- HOLZWORTH, G. C. (1969): *Large-scale weather influences on air pollution potential in the United States* (Pendiente de publicación, «Jour. Air Poll. Cont. Assn.).
- MUNN, R. E. (1968): *Airflow in urban areas*. Comunicación presentada al Simposio sobre Climas urbanos y climatología de la construcción, Bruselas.
- NEIBURGER, M. (1968): *Diffusion Models of urban air pollution*. Comunicación presentada al Simposio sobre Climas Urbanos y climatología de la Construcción, Bruselas.
- PASQUILL, F. (1962): *Atmospheric Diffusion*. O. Van Nostrand Co. Ltd., Londres.
- POOLER, F. (1963): «Jour. App. Met.», 2, p. 446.
- SCORER, R. S. (1968): *Air Pollution*. Pergamon Press, Nueva York.
- SLADE, D. H. (Ed) (1968): *Meteorology and Atomic Energy, 1968*. «U. S. Atomic Energy Comm.», Div. of Tech. Information, Oak Ridge, Tenn.
- SMITH, M. E. (Ed.) (1968): *Recommended Guide for the Prediction of the Dispersion of Airborne Effluents*. «Amer. Soc. of Mechanical Eng.», Nueva York.
- WANTA, R. S. (1968): *Meteorology and air pollution en Air Pollution*, 2.^a ed., A. C. Stern (Ed), Academic Press, Nueva York.

Meteorología y cuestiones oceánicas

En un número anterior del *Boletín* (Vol. XVIII, N.º 1, págs. 12-15), se reseñaban brevemente los avances que en el campo de las cuestiones internacionales del océano se habían realizado desde diciembre de 1966. Posteriormente, la 23.ª Asamblea General de la Naciones Unidas examinó el informe *Ciencia marina y tecnología; Perspectiva y Propuestas*, preparado en respuesta a la Resolución 2172 (XXI) de las NU —Recursos marinos— por el Secretario General de las NU en cooperación con diversas organizaciones internacionales, incluyendo la OMM. Las conclusiones de la 23.ª Asamblea General han sido, posteriormente, discutidas y tratadas en diversas reuniones. Los puntos más importantes que se deducen de algunas de estas reuniones y de la 23.ª Asamblea General se tratan en las páginas siguientes.