

# ASOCIACION DE MICROBIOLOGIA, HIGIENE Y MEDICINA PREVENTIVA

---

*Sesión del día 15 de diciembre de 1972*

## CONDICIONES SANITARIAS SOBRE CALIDAD DEL AIRE. PROPUESTA DE NORMAS Y MÉTODOS APLICABLES EN ESPAÑA

B. F. SÁNCHEZ-MURÍAS, y J. PLEITE SÁNCHEZ

### 1. Introducción

La concentración de un determinado contaminante en una misma localidad, es en la mayoría de los casos muy variable en el espacio y en el tiempo. Así, dos estaciones rara vez indican igual valor instantáneo, y las mediciones a lo largo de un día, un mes o un año, son netamente diferentes. Por ello es escasamente significativa la calificación del estado de perturbación de la atmósfera simplemente por los valores de las mediciones diarias.

La incidencia de un contaminante atmosférico sobre la salud se deriva cualitativamente de los siguientes aspectos:

- Valor de su concentración en cada momento.
- Tiempo de exposición a un determinado nivel.
- Distribución cronológica de las concentraciones alcanzadas.

En consecuencia, para definir el estado de contaminación atmosférica en la zona de influencia de una estación de medición, se precisa relacionar estos tres factores de manera que pueda establecerse un criterio racional y uniforme, definidor de zona de condiciones higiénicas, de zona contaminada y de situaciones de emergencia.

Las soluciones adoptadas por los diversos países hasta el momento contemplan, a nuestro juicio, solamente los dos primeros aspectos enunciados, mientras que el tercero queda desdibujado al limitar simplemente el porcentaje de períodos de tiempo en que no debe sobrepasarse determinadas concentraciones. Por ello, con tales disposiciones no puede establecerse una correlación directa entre el estado de contaminación y las medidas restrictivas y correctoras exigibles por la Administración.

Con este estudio se pretende esbozar unas bases para definir, bajo el aspecto sanitario, la calidad de la atmósfera contaminable y establecer una graduación de las situaciones, a fin de que escalonadamente pueda imponerse las correcciones y limitaciones oportunas.

## 2. Terminología internacional en relación con las dosis, tiempos de exposición y efectos de la contaminación sobre las personas

Como en otros sectores de la ciencia o de la técnica, la diferencia de opiniones sobre puntos básicos se debe en muchas ocasiones a que la terminología empleada por los diferentes autores es distinta. Tratóndose de los problemas de la contaminación atmosférica que son relativamente nuevos, es lógico que así suceda.

Cuando se trata de reflejar el efecto de la contaminación atmosférica con el fin de fijar unas concentraciones que determinen una decisión administrativa, es necesario tener en cuenta entre otras cosas:

1.º Especificar el test que hemos empleado para conocer el efecto de la contaminación atmosférica. Así se puede utilizar como referencia las plantas, los animales, los materiales o el mismo hombre. Porque ha de considerarse que *la misma concentración de igual contaminante producirá efectos diferentes según el «grupo test» elegido, ya que por ejemplo, será menos grave en las personas sanas que en los bronquíticos crónicos.*

2.º *Es necesario conocer para un test elegido los distintos efectos a diferentes concentraciones, verbigracia, reacción biológica de alarma → enfermedad → muerte.*

Estos conceptos básicos se manejan en la literatura mundial bajo diversas denominaciones.

Según la OMS<sup>1</sup> los «criterios» son los test que permiten determinar la naturaleza y magnitud de los efectos de la contaminación atmosférica en el hombre y su medio ambiente. Sin embargo, en la terminología utilizada en la Primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano celebrada en Estocolmo,<sup>2</sup> los «criterios» serían las relaciones cuantitativas entre la exposición a un agente contaminante y el riesgo o magnitud de un efecto no deseado en circunstancias específicas definidas por variables del medio y variables del receptor. En el mismo sentido se conciben los «criterios» en USA.<sup>3</sup>

Esta definición de «criterio» coincide con la de la OMS sobre «guías» de calidad del aire, que equivalen al conjunto de concentraciones y tiempos de exposición que se asocian a efectos específicos de diferentes niveles de contaminación en el hombre, los animales, las plantas o el medio ambiente general, obtenidos científicamente.

A la luz de nuestros conocimientos actuales, las guías de calidad del aire pueden representarse como cuatro categorías de concentraciones, tiempos de exposición y efectos correspondientes.

Estas cuatro categorías pueden variar dependiendo del «criterio» utilizado, de la coexistencia con otros contaminantes, de la concurrencia de determinados factores físicos y de las diferentes respuestas de los distintos grupos humanos.

El Comité de expertos de la OMS considera, en general, los siguientes cuatro niveles:

*Nivel I.* Las concentraciones y los tiempos de exposición son inferiores o iguales a los valores para los cuales, en el estado actual de nuestros conocimientos, no se observa ningún efecto directo ni indirecto (incluyendo alteraciones de los reflejos o reacciones de protección).

*Nivel II.* Las concentraciones y la duración de la exposición son iguales o superiores a los valores para los cuales, probablemente, se observará irritación de los órganos de los sentidos, daños sobre vegetación, reducción de la visibilidad u otros efectos desfavorables sobre el medio.

*Nivel III.* Las concentraciones y tiempo de exposición son iguales o superiores a los valores para los cuales, probablemente, habrá enfermedades agudas o muertes en los grupos vulnerables de la población.

Los «standard» o normas de calidad del aire, según la OMS son los valores de las guías de calidad que adoptan los Gobiernos sobre concentraciones y tiempos de exposición.

Los standards reflejan los objetivos y se expresan como un valor medio simple para cada «grupo test» (hombre, visibilidad) en un período medio de tiempo seleccionado.

Constituyen por lo tanto una elección dentro de los diferentes niveles, ya que el legislador puede tener en cuenta no sólo la relación dosis-efectos, sino también otros factores entre los que destacan el binomio coste del daño de la contaminación-beneficio de su prevención.

Debe quedar bien claro que los standards, en algunos casos, pueden no proteger de forma absoluta y constituyen un compromiso entre la defensa de la salud y del medio ambiente por un lado, y las disponibilidades efectivas para evitarla, por otro.

Toda norma standard es, en el fondo, la expresión de una elección en la opcionalidad multidisciplinaria que se ofrece al legislador. Se trata de un problema de prioridades con argumentos que pueden ser temporales o contingentes.

Este concepto de la OMS equivale a los «niveles o límites operativos derivados» de la terminología de las Naciones Unidas, que los concibe como los niveles máximos aceptables de contaminantes en ambientes determinados, distintos de los del receptor, fijados para asegurar que en circunstancias específicas no se exceda una norma primaria

de protección (\*). También se llaman *normas ambientales de calidad del aire, límites máximos permisibles y concentraciones máximas permisibles*.

En lo que resta de esta exposición emplearemos la terminología adoptada por la OMS.

### 3. Los standards de calidad del aire como base del control de la contaminación

La Organización Mundial de la Salud recomienda que cuando no exista ninguna legislación específica en un país, éste debe establecerla lo antes posible, aunque no sea perfecta, porque está demostrado que, sin ella, la contaminación crece muy rápidamente y después se necesita un mayor esfuerzo para reducirla.

Aparte de otras consideraciones sobre la legislación, tenemos disponibilidades de base para reducir la contaminación atmosférica. La primera es la de aplicar los «mejores medios practicables» que existan en aquel momento sobre diferentes focos de contaminación, independientemente que tengamos o no standards o guías de calidad del aire. Con estos principios se ha logrado reducir la contaminación en algún país.

Se limita así, ciertamente, la emisión de contaminantes en las fuentes, pero no se tiene en cuenta la densidad de la población ni la proporción de fuentes móviles o estacionarias ni la zonificación, ni la meteorología.

La segunda forma de reducción de contaminación del aire, está basada en el deseo o necesidad de tener un aire con una calidad que nosotros fijamos previamente, es decir sobre unos «standards de calidad».

Para que estos no se sobrepasen, se necesita controlar las fuentes de contaminación, planificar la ubicación de las industrias, calcular el crecimiento de la población en todos los órdenes, tener en cuenta los factores meteorológicos, etc. Es una verdadera ordenación del territorio en función del aire.

Esta forma parece la más lógica, de programación de lucha contra la contaminación atmosférica.

Como aún tenemos lagunas que cubrir y éstas no pueden rellenarse en un momento, lo aconsejable parece presentar unos *standards de*

---

(\*) Norma primaria de protección es un *nivel máximo* aceptado de un contaminante en el receptor o parte de él, o la absorción máxima aceptada de un contaminante o una perturbación por el receptor en circunstancias específicas.

*calidad tolerables* y marcar otros en concepto de *standards de calidad deseables*, mucho más estrictos, como meta a la que debemos tender.

Lógicamente, se deduce de todo lo considerado con anterioridad, que el mejor sistema será aquel que conjugue el empleo de los mejores medios posibles con los standards de calidad deseables.

A pesar de estos factores mediatizantes, conviene que los gobiernos adopten unos standards de calidad del aire modificables que, a medida que los estudios científicos lo permitan, se vayan acomodando a las circunstancias del momento.

Para nuestro país, estamos convencidos que tenemos que basarnos en los standards de calidad. La razón fundamental de nuestra afirmación se basa en nuestra propia experiencia de diez años en relación con estos problemas. Hemos comprobado que pocos siguen el pragmatismo inglés de los «mejores medios prácticos posibles» para evitar la contaminación. Fundamentalmente, los contaminadores quieren conocer los standards de calidad que la Sanidad considera deben exigirse y, en consecuencia, poner los «medios suficientes» para que no se sobrepasen, pero no emplear los «mejores medios» posibles si de otra forma pueden evitarlo. Indudablemente supone un menor esfuerzo económico.

Esta es la realidad y aunque en nuestra legislación deben tenerse en cuenta todas las formas de control, resulta evidente que en España es necesario dar unas cifras que guíen a las personas interesadas u obligadas a mantener un aire limpio.

Existen en varios países standard de calidad del aire, en la mayor parte de los casos incompletos, pero que han cumplido y cumplen una importante misión y que pueden valerlos de orientación para establecer nuestros propios standards.

#### **4. Causas de las diferencias de los standards entre los distintos países**

Es un deber del sanitario tratar de poner en claro, porque es motivo frecuente de confusión, la razón de la diferencia, a veces notable, que existe entre los standards de calidad del aire en los diferentes países.

El primer motivo se debe a la falta de conocimiento de los efectos concretos derivados de todas las concentraciones posibles de un contaminante, sus tiempos de exposición y su evolución en el tiempo.

En segundo término, a que tanto los «criterios» como las «guías» elegidos son diferentes de un país a otro para un mismo contaminante; por ejemplo, los standards dados por la URSS son más estrictos

que los de Estados Unidos o Alemania. Se debe a que los rusos consideran que la sola *reacción de alarma* del organismo, detectada con técnicas fisiológicas muy finas, es decir, la simple aparición de una reacción defensiva frente a un contaminante, determina el nivel máximo permisible. Por tanto, esto significa que la presencia del contaminante no debe causar prácticamente, la más mínima reacción. Para los Estados Unidos, esto constituye un ideal realmente inalcanzable y su «criterio» se basa en los efectos sobre la *mortalidad o la morbilidad*. Como se puede suponer, las concentraciones que vienen dadas por los standards que protegen al hombre en la mortalidad o morbilidad son muchos menos exigentes que los que le protegen frente a las más mínima alarma.

En tercer lugar, los valores numéricos que establecen las legislaciones de los diversos países no son comparables entre sí, ya que debe conocerse también la forma de aplicación, la tolerancia en la adopción de las correcciones, etc., es decir, la intención del legislador. Por ejemplo, en Francia las centrales térmicas deben tomar medidas de reducción cuando el contenido de  $\text{SO}_2$  en el aire llegue a  $1 \text{ mg/m}^3$  en 24 horas, pero, sin embargo, esta cifra no es un límite de *tolerancia*, sino un límite de *alerta* que lleva consigo una acción inmediata como es el cambio del combustible por uno desulfurado.

En último lugar, tampoco existe un acuerdo unánime hasta ahora que en todos los países se fijen iguales intervalos de tiempo. A título de muestra, en Alemania, la concentración permitida para el  $\text{SO}_2$  en la atmósfera es de  $400 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  con muestreos de 30 minutos, mientras que en Italia, los  $400 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  se consideran admisibles en período de 24 horas.

## 5. Actitud sanitaria ante los standards de calidad del aire

Nuestra elección debe ir orientada sobre unos principios que en todo momento respondan al fin último que nos proponemos, cuál es la protección del hombre en particular y del medio ambiente en general. Sobre este ideal debemos:<sup>4</sup>

1.º *Definir el criterio cualitativo* o lo que es lo mismo, qué es lo que queremos evitar.

Por ejemplo, las muertes se producen con concentraciones más altas que aquellas que ocasionan trastornos funcionales respiratorios y, por lo tanto, si lo que queremos es prevenir la mortalidad, pondremos unos standards menos estrictos que si quisiéramos prevenir los síntomas respiratorios, pues para ello tendríamos que establecer límites más rigurosos, ya que lo que primero produciría la contaminación serían los efectos funcionales.

2.º *Fijar el carácter cuantitativo* de tolerancia para los efectos de la contaminación. Podemos reducir, si no es posible evitar, la gravedad de una enfermedad.

3.º *Determinar el riesgo* que vamos a admitir a un determinado grupo de la población. Por ejemplo, pudiera ser aceptable que el diez por ciento de una población presente una función respiratoria con una disminución de un veinte por ciento respecto a la correspondiente a la media de la población.

Es muy importante esta noción del riesgo que puede permitirse por que, obviamente, cuanto menos riesgo toleremos más esfuerzos tendremos que hacer en la prevención de la contaminación atmosférica y no debemos olvidar que todo va ligado a las disponibilidades económicas.

#### 5.1. CONDICIONANTES SANITARIOS DE LOS STANDARDS DE CALIDAD.

Un standard de calidad del aire debe presentar los siguientes parámetros:

- 1.º Concentración máxima permitida.
- 2.º Tiempo de exposición.
- 3.º Evolución de la contaminación en el tiempo.

Para contemplar todas las posibles situaciones debe, además, tenerse en cuenta que no solamente se precisa definir standards para situaciones higienicantes aceptables de normalidad, sino que también para zonas contaminadas y en regímenes de emergencia.

Si nos referimos, como lo estamos haciendo, a los standards de calidad del aire en sus efectos sobre las personas, será conveniente recordar que las catástrofes de Londres, Donora, etc., se produjeron en circunstancias en las que existieron concentraciones elevadas de contaminantes persistiendo en la atmósfera durante varios días y que hasta por lo menos 24 horas no se empezaron a sentir los efectos.

Los standards de calidad, dan concentraciones máximas admisibles, teniendo en cuenta las experiencias que acabamos de comentar. Las concentraciones que duran poco tiempo, por ejemplo, 30 minutos, no tienen tanta significación patológica como aquellas que se mantienen más tiempo. Como por otra parte se sabe muy poco de las pequeñas concentraciones a largo plazo, consideramos que lo más significativo en el control de los efectos sobre las personas serán las concentraciones de 24 horas.

A su vez las cifras marcadas para 24 horas como concentraciones máximas admisibles, no deben permitirse a largo plazo.

Esta es la razón por la que es necesario dar otra cifra, por lo menos, mensual o anual. Si no, se presentaría la paradoja de que duran-

te todo un año estaríamos admitiendo unas concentraciones constantes al nivel límite.

Los standards de calidad del aire, deben cubrir el principio fundamental de proteger a los «grupos críticos» de la población,<sup>5</sup> entiendo por tales, aquellos que sabemos son más fácilmente afectados por la contaminación atmosférica, como pueden ser los niños, los ancianos o los enfermos, ya que las personas en buen estado de salud, resisten concentraciones superiores. La experiencia del Smog de Londres hizo ver que el exceso de 4.000 muertos se debió a la mayor mortalidad entre los cardíacos y bronquíticos principalmente.

Otra condición que deben cumplir es que, no deben permitir que se exceda el umbral del olor o de otra incomodidad ostensible, aunque supongamos que no tiene efectos directos sobre la salud. La población así se creería no defendida. En todo caso, hay que evitar también las molestias.<sup>6</sup>

Las reservas fisiológicas son variables de una persona a otra. Todas, no obstante, la poseen. Los standards de calidad del aire cumplen la gran misión de que esta reserva sea mantenida y ahorrada para poderla emplear en otros esfuerzos necesarios.

## 5.2. LIMITACIONES DE LOS STANDARDS EN LA DEFENSA DE LA SALUD.

Los standards que consideramos deben respetarse, constituyen un compromiso entre las posibilidades de reducir la contaminación atmosférica en nuestro país y la defensa del medio ambiente en general y de la salud humana en particular. *Sin embargo, no son la meta final hacia la que debemos tender, sino un objeto previo a la fijación de standards más estrictos.* Su aplicación viene dada como una orientación necesaria en lugares con alto grado de contaminación y en ningún caso supone una libertad de ocupación del medio ambiente.

Surge la controversia si los standards de calidad del aire deben hacerse sobre una base nacional o sobre una base local.

En ocasiones, se quiere proteger determinada región o localidad que se utiliza para fines que parecen exigir en sí mismo aire puro (actividades deportivas, parques naturales, etc.), marcando standards de calidad especiales. Esta alternativa no parece la más apropiada.

Para impedir la contaminación de estos territorios, lo que hay que tratar de regular es la ubicación de las actividades en los mismos sobre la base de la reglamentación ya existente.

Los standards mínimos de calidad del aire deben ser para todo el territorio. *Los niveles de contaminación que son peligrosos para la salud de una comunidad o la limpieza de una ciudad, no son menos peligrosos en otro lugar.*

No parece acertado que el derecho del ciudadano a tener un aire que no dañe su salud dependa del lugar donde vive, y por tanto el nivel de calidad del aire no debe superarse por encima de unos standards comunes.<sup>7</sup>

Los criterios, guías y standards más significativos de los diversos países se recogen en el anexo I.<sup>8</sup>

## 6. Consideraciones de base para adoptar los standards de calidad del aire

Como se ha dicho anteriormente, la decisión en la elección de los standards ha de basarse en las guías de calidad del aire obtenidas científicamente, a fin de poseer razones objetivas. Ahora bien, puesto que las guías son distintas según el criterio utilizado, nuestra postura ha de contemplar las diversas soluciones adoptadas en atención a tales guías, las cuales, hasta el presente, se obtuvieron por alguno de los siguientes procedimientos:

a) Experimentación animal en laboratorio. Es el procedimiento más riguroso y comprobable, ya que permite regular a voluntad los distintos parámetros, como son las concentraciones, las exposiciones y los criterios. Tiene el inconveniente de que la fisiología de los animales empleados no es igual que la de las personas, por lo cual es imposible transferir rigurosamente los resultados al hombre.

b) Experimentación humana en laboratorios con sujetos sanos voluntarios. En este caso los valores de concentraciones y tiempos tienen valor real, con el único inconveniente de que los resultados obtenidos no pueden darnos más que una información de las respuestas a la exposición a niveles bajos, puesto que, por razones deontológicas, no es posible someter a las personas al riesgo de las altas concentraciones. Estas guías pueden hacerse extensivas a la población que representa la edad y sexo de los sujetos experimentados.

c) Experimentación humana en laboratorio con sujetos voluntarios enfermos. Presenta las mismas ventajas e inconvenientes del método anterior. En este grupo las concentraciones y exposiciones han de ser menores a las correspondientes para personas sanas, y las guías así obtenidas pueden hacerse extensivas a la población enferma que representan las condiciones de los sujetos experimentados.

d) Estudios epidemiológicos sobre mortalidad y morbilidad general y específica en relación con la contaminación real en las ciudades. Se realizan mediante encuestas específicamente dirigidas o por medio de estudios prospectivos o retrospectivos en grupos de poblaciones.

El absentismo laboral, al ingreso en hospitales o las encuestas sobre bronquitis crónicas, son ejemplos de la variedad de las posibilidades del método. Sin embargo, estos trabajos tienen en la mayoría de las veces el inconveniente de ser largos y costosos de realizar, además sus resultados son difíciles de interpretar.

## 7. Propuesta de valores standard de calidad del aire en España

En el anexo II quedan recogidos los valores standard para los diversos contaminantes, que a nuestro juicio debieran implantarse en nuestro país. Para su determinación se han tenido en cuenta los estudios científicos existentes (<sup>9</sup> a <sup>310</sup>) sobre los efectos de la contaminación en las personas, al tiempo que se ha atendido a otros condicionantes señalados en párrafos anteriores. Estos valores límites de inmisión deben ser considerados solamente como «tolerables», ya que se debiera tender a unos límites «deseables» por lo menos un 30 % más bajos.

A modo de justificación se procede al análisis de algunos ejemplos comparativos.

El Departamento de Salud del Gobierno de Estados Unidos, publicó en 1967 <sup>311</sup> una recopilación de todos los estudios de cualquier tipo relacionados con los efectos de la contaminación por SO<sub>2</sub> que existían en el mundo, y que fueron llevados a un gráfico, el cual posteriormente fue rectificado por BRASSER <sup>312</sup> (fig. 1).

Sus conclusiones no pueden adoptarse como definitivas ya que se han obtenido con datos muy heterogéneos, pero no obstante, son de gran interés por su valor de síntesis y su innegable base objetiva. En el gráfico puede distinguirse:

- 1.<sup>a</sup> Zona en blanco, para concentraciones y tiempos de exposición, en los cuales no se producirán efectos nocivos.
- 2.<sup>a</sup> Zona cuadriculada, para concentraciones y tiempos de exposición en los que existe probabilidad de alteraciones funcionales o lesionales.
- 3.<sup>a</sup> Zona rayada, para concentraciones y tiempos de exposición en los que se ha comprobado que habrá efectos funcionales o lesionales.

Según estos resultados, las concentraciones de 500 µg/m<sup>3</sup> durante 24 horas, 225 µg/m<sup>3</sup> mensual, y 125 µg/m<sup>3</sup> promedio anual, serían los niveles en los cuales empieza la probabilidad de alteraciones en los grupos críticos de la población. Con seguridad aparecerían alteraciones en la mortalidad y morbilidad con concentraciones medias de 1.750 µg/m<sup>3</sup> en 24 horas, 625 µg/m<sup>3</sup> en un mes, y 300 µg/m<sup>3</sup> en un año.

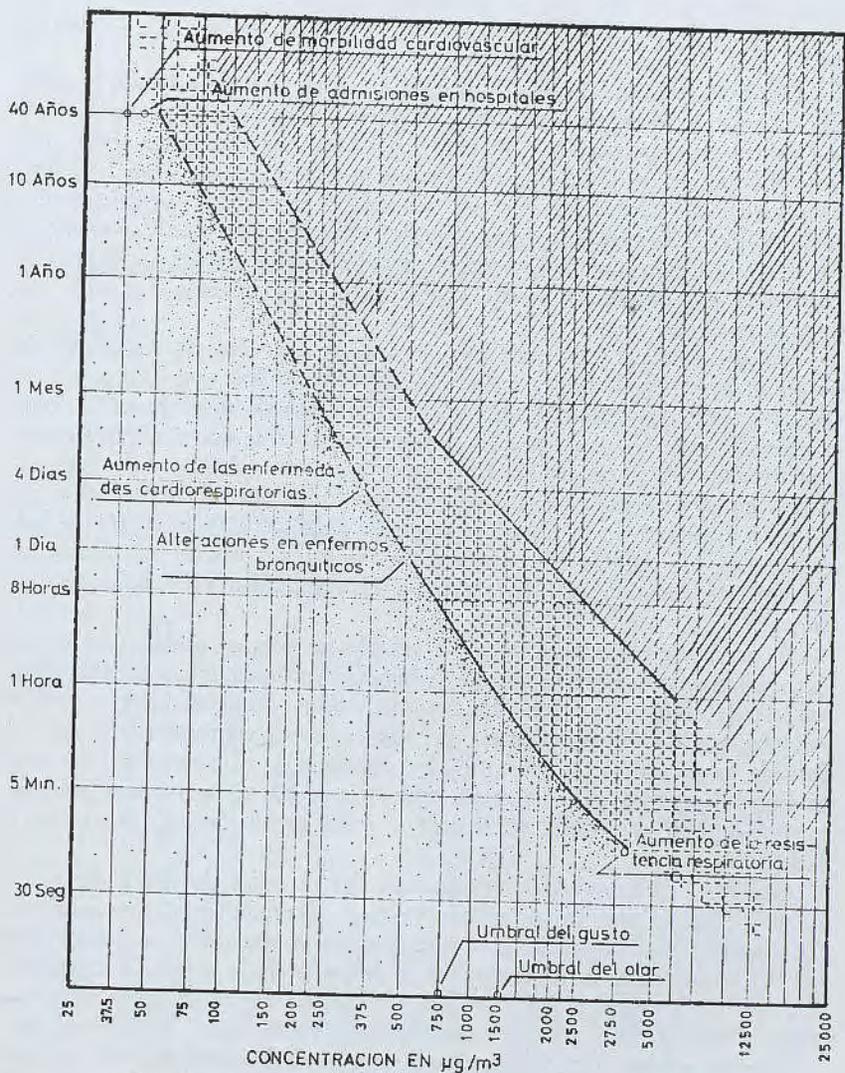


FIG. 1.— Relación dosis-efecto-tiempo de exposición para SO<sub>2</sub>

La figura número 2 del Instituto de Investigaciones Sanitarias de Delft<sup>313</sup> nos indica que las concentraciones o niveles de sensibilidad son de  $425 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , promedio de 24 horas; de  $230 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , promedio de un mes; y de  $165 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de un año, mientras que los efectos de primer grado comenzarían con  $840 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 24 horas,  $340 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en un mes, y  $225 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en un año.

Por otra parte, el hecho de la existencia de efectos aditivos y multiplicativos de diversas sustancias tóxicas, junto con la grave dificultad de estudiar las combinaciones de posibles contaminantes, hace que el problema de la determinación de los standards para todas las combinaciones de contaminantes sea en estos momentos prácticamente inabordable. No obstante, para el caso concreto, típico de las urbes, de contaminación por la presencia simultánea de óxidos de azufre y partículas en suspensión, hay suficientes conocimientos tomados de experiencias reales.

Por ejemplo, se han estudiado los efectos en siete episodios de la contaminación en Londres y Nueva York,<sup>314</sup> en los que se conoce la concentración de contaminantes y el incremento de muertes atribuibles al episodio, y se ha visto que los efectos mortales se correlacionan como una función del producto de las concentraciones del  $\text{SO}_2$  y de las partículas en suspensión (fig. n.º 3), con un coeficiente de correlación de 0,98. La ecuación de la recta de regresión es  $M = 0,24 \times 10^{-3}(C_p \times C_s)$ , siendo M el número de exceso de muertes durante el episodio,  $C_s$  concentración de  $\text{SO}_2$  en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $C_p$  partículas en suspensión en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

A partir de tal ecuación puede calcularse cuántas muertes se evitarían reduciendo un contaminante o los dos en una ciudad de 10 millones de habitantes.<sup>312</sup> Para ello, en un plano «concentración de  $\text{SO}_2$  —concentración de partículas en suspensión», representamos las líneas de isomuertes (fig. núm. 4). Se deduce que el exceso de muertes en Londres y Nueva York puede reducirse a 10, si la máxima concentración de  $\text{SO}_2$  se reduce a  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y las partículas en suspensión a  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Debido a la variabilidad normal de las muertes de día a día y semana a semana, no son significativos los incrementos de muertes en una ciudad como Londres, si el exceso sobre el promedio es menor que 50. Aplicando nuestros standards a la fórmula de la recta de regresión, tendrían en Londres o Nueva York un exceso de 22 muertes teóricas, cifra inferior a 50 y por lo tanto no objetivable según lo antes dicho.

Con el mismo razonamiento en una ciudad como Madrid o Barcelona, con la tercera parte de habitantes tendríamos un exceso de 7 muertes. Esta cifra es inferior a la desviación standard de los muertos de un año. Esto corrobora que nuestros standards tolerables prote-

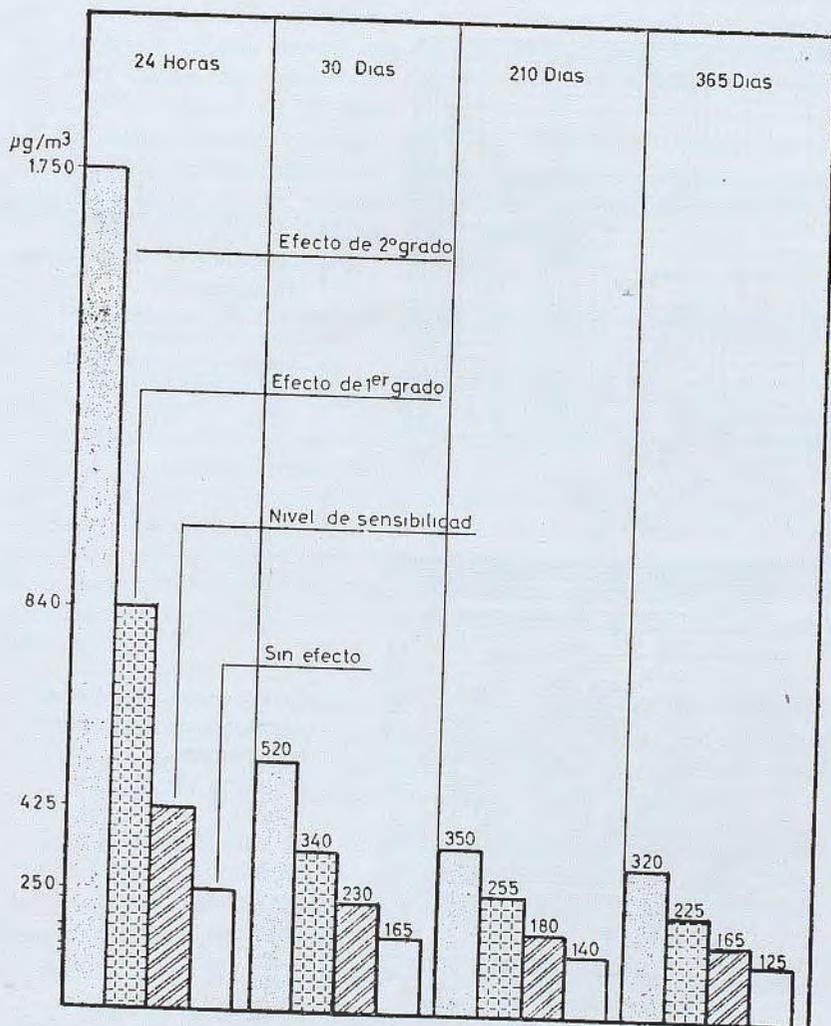
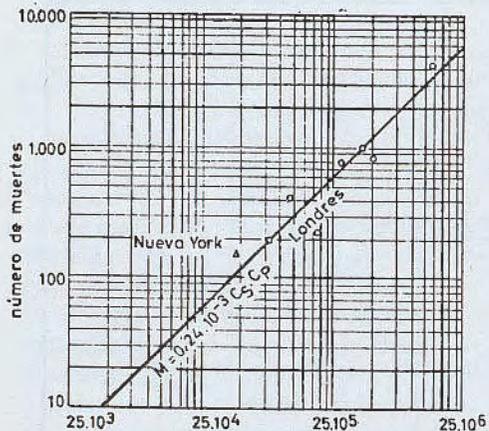


FIG. 2.— Relación dosis-efecto para el SO<sub>2</sub> en función del tiempo de exposición



$C_S \cdot C_P$  en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Fig. 3

$C_S$  = Concentración en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{SO}_2$

$C_P$  = Concentración de partículas en suspensión.

Correlación entre el número de muertes y el producto de concentraciones.

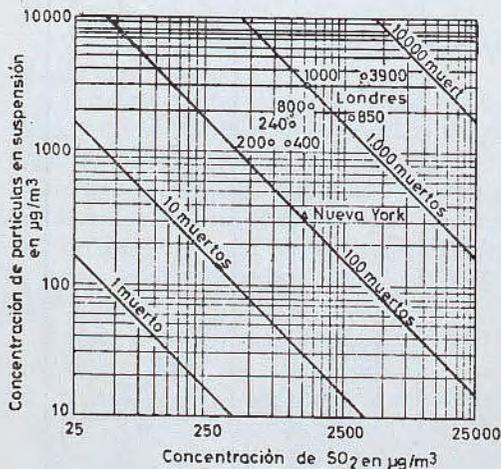


Fig. 4

Correspondencia entre las concentraciones y las líneas de isomuertes.

gen suficientemente la población, aun cuando todos los días de un episodio se alcanzasen los standards diarios de  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{SO}_2$  y  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de materias en suspensión.

Si además se tiene en cuenta que nuestros standards son ponderados y monótonamente decrecientes con el tiempo, llegando al cabo de un año a los valores respectivos de  $150$  y  $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , para alcanzar estos resultados, las mediciones diarias deben ser inferiores al valor de inmisión máximo de 24 horas.

Por estas razones creemos que deben tenerse en cuenta las situaciones de contaminación persistente al declararse las zonas contaminadas y los grados de emergencia, en base a las cuales desarrollamos un método en el que se integran estos conceptos.

## 8. Proposición de un método de evaluación de la contaminación

La simple superación del valor promedio de un día, una o varias veces en el período más amplio correspondiente a un mes o un año, no es representativa del estado de contaminación. Por contra, la persistencia en concentraciones elevadas, aun cuando sean inferiores a las máximas admitidas, pueden crear situaciones higiénicas intolerables.

Estos dos inconvenientes, que se ocasionan al establecer valores standards individualizados, es decir, sin conexión a los estados preexistentes de contaminación ni a las previsiones a corto plazo, pudieran obviarse con el método que a continuación se propone, el cual consiste en:

- 1.º Determinar el estado real de la contaminación en la zona de influencia de una estación medidora, a partir de los datos promedios diarios, ponderados con los valores en días anteriores, a la que llamaremos *contaminación ponderada*.
- 2.º Establecer una relación teórica, higiénicamente admisible, entre la contaminación y el tiempo de exposición, que llamaremos *concentración de contraste*, y que constituye propiamente el standard buscado.
- 3.º Analizar las desviaciones entre la contaminación ponderada y la de contraste.
- 4.º Definir un *índice de contaminación* a partir de los datos del apartado anterior, como desviación específica del estado real respecto al de contraste, que permita apreciar la manera objetiva la perturbación.

## 8.1. CONTAMINACIÓN PONDERADA.

Supuesto conocidos los valores de concentración promedio de cada día, durante un año, se define un número que llamamos de contaminación ponderada, en el que se tiene en cuenta el estado actual y los anteriores, mediante la expresión.

$$C_d = \frac{V_d + d \cdot C_{d-1}}{d + 1} \quad \text{con } d = 1, 2, 3 \dots 365$$

en donde:

$C_d$  es el valor de la contaminación ponderada en el día  $d$ .

$V_d$  es el valor de la concentración promedio del día  $d$ .

$d$  es el número de días transcurridos desde un origen de tiempo arbitrario. Este origen, por comodidad se establece en el primer día del mes en el que se ha superado el valor máximo admisible para un día, o de no alcanzarse en todo el período, del mes en que la concentración fuera más alta.

La anterior expresión, de forma recurrente, admite otra escritura más cómoda para el cálculo manual, mediante el siguiente desarrollo:

En efecto:

para  $d = 0$

$$C_0 = \frac{V_0 + 0 \cdot C_{-1}}{1} = V_0$$

para  $d = 1$

$$C_1 = \frac{V_1 + 1 \cdot C_0}{2} = \frac{V_1 + V_0}{2}$$

Hipótesis:

$$C_n = \frac{\sum V_n}{n + 1}$$

Inducción completa

$$\begin{aligned} C_{n+1} &= \frac{V_{n+1} + (n + 1) C_n}{n + 2} = \frac{V_{n+1} + (n + 1) \frac{\sum V_n}{n + 1}}{n + 2} = \\ &= \frac{\sum V_{n+1}}{n + 2} \end{aligned}$$

es decir, puede encribirse

$$C_d = \frac{\sum V_d}{d + 1} \quad \text{con } d = 0, 1, 2, 3 \dots \dots \dots 365$$

El valor  $V_0$  se toma igual al promedio del período anual anterior.

Como los intervalos de tiempo en los que la contaminación se mide y evoluciona (el día, mes o año), son de muy distinta amplitud, parece oportuno contemplar dos estados de contaminación en régimen ordinario, uno al extendido al como se acaba de mostrar, y otro valedero para períodos mensuales.

Con el mismo procedimiento anterior, se define:

$$C_{d,m} = \frac{V_{d,m} + d \cdot C_{d-1,m}}{d + 1} \quad \text{con } d = 1, 2, 3 \dots \dots \dots 30$$

$$m = 1, 2, 3 \dots \dots \dots 12$$

en donde

$C_{d,m}$  es la contaminación ponderada del día  $d$  del mes  $m$ .

$V_{d,m}$  es la contaminación media del día  $d$  del mes  $m$ .

$d$  es el número de días transcurridos desde el comienzo del mes.

Igualmente puede escribirse

$$C_{d,m} = \frac{\sum V_{d,m}}{d + 1} \quad \text{con } d = 0, 1, 2, 3 \dots \dots \dots 30$$

$$m = 1, 2, 3 \dots \dots \dots 12$$

Para relacionar dos períodos consecutivos, se conviene en admitir la igualdad.

$$C_{30,m} = C_{0,m+1} = V_{0,m+1}$$

es decir, la contaminación ponderada al final del período  $m$ , igual a la inicial del siguiente.

Nótese que con estas expresiones se obtienen unos conjuntos de valores en los que un valor alto pero aislado tiene poca influencia en los días sucesivos, mientras que situaciones sostenidas gravitan de manera importante sobre las posteriores.

En el ejemplo que se acompaña puede observarse estas afirmaciones.

## 8.2. CONTAMINACIÓN DE CONTRASTE.

El estado de contaminación admisible como compromiso entre la salud y los condicionantes socioeconómicos, es decir, el standard de calidad del aire que se propone aquí, corresponde a una relación puramente teórica entre la concentración y el tiempo de exposición, de carácter monótonamente decreciente y ajustada a la evolución de los fenómenos naturales. A los valores de tal relación los llamaremos contaminación de contraste. Al igual que para la contaminación ponderada, se contemplan dos intervalos: el mensual y el anual.

Se definirían mediante las expresiones:

Para el año:

$$C^*_{d} = C_{i-a} L d \quad \text{con } d = 1, 2, 3 \dots 365$$

Para el mes:

$$C^*_{d,m} = C_{i-b} L d_m \quad \begin{array}{l} \text{con } d = 1, 2, 3 \dots 30 \\ m = 1, 2, 3 \dots 12 \end{array}$$

en donde:

$C^*_{d}$  es el valor de la concentración de contraste en el día «d».

$C^*_{d,m}$  es el valor correspondiente al día «d» del mes «m».

$C_i$  es el valor de concentración promedio máximo de un día.

$d$  es el número de días transcurridos desde el origen de tiempos. Este origen se hace coincidir con el elegido para la contaminación ponderada.

$a$  y  $b$  son constantes de proporcionalidad que permiten ajustar la función a las concentraciones diaria y a corto o medio plazo, elegidas.

## 8.3 INDICE DE CONTAMINACIÓN.

Si en un caso real se comparan los valores obtenidos para la concentración ponderada y la de contraste, en una zona de aire limpio todos los primeros serían correlativamente más pequeños que los segundos y se trataría de una situación sin perturbación higiénica. En cambio, en una zona de aire contaminado seguramente habría momentos en que ocurriese lo contrario. Como situación límite cabría la posibilidad de que ambas fueran coincidentes, en cuyo caso se trataría de un estado de equilibrio, en el que el ambiente estaba justamente saturado, no permitiendo el más mínimo incremento.

Para reunir en una sola cifra las desviaciones entre las contaminaciones de contraste y ponderada, se define los que llamaremos *índices de contaminación anual y mensual* mediante las fórmulas:

$$\text{Índice anual: } I_a = \frac{\sum \delta \frac{C_d}{C^*_d}}{N} \quad \text{con } d = 1, 2, 3 \dots 365$$

$$\delta = 1 \text{ para } C_d \geq C^*_d$$

$$\delta = 0 \text{ para } C_d < C^*_d$$

$$\text{Índice mensual: } I = \frac{\delta \frac{C_{d,m}}{C^*_{d,m}}}{n} \quad \text{con } d = 1, 2, 3, \dots 30$$

$$m = 1, 2, 3 \dots 12$$

$N$  y  $n$  son los números de días en los que  $\delta = 1$ .

Ambos índices valen la unidad cuando las concentraciones de contraste y ponderada son iguales a lo largo de todo el período; son nulos en caso de zonas con aire limpio y pueden superar el valor unitario en las zonas contaminadas.

Por tanto, estos índices pueden emplearse para definir unos standards de calidad que corresponden a un estado de perturbación atmosférica persistente y no ocasional, con los cuales se harían las declaraciones de «zona atmosféricamente contaminada», así como la ordenación del territorio a largo plazo. Su análisis en períodos sucesivos permitiría conocer su evolución y la incidencia de las acciones tomadas contra la contaminación.

#### 8.4 STANDARDS EN SITUACIONES DE EMERGENCIA.

Las situaciones de emergencia solamente deben ocasionarse en cortos períodos de tiempo, a causa de accidentes fortuitos o condiciones climáticas adversas.

Aquí vamos a definir tres standards en base a las siguientes guías.

- 1.º Emergencia de primer grado, correspondiente a relaciones de concentración-tiempo de exposición que pueden incidir desfavorablemente sobre el grupo más receptivo de la población.
- 2.º Emergencia de segundo grado, para condiciones en la que es previsible el aumento de la morbilidad y la mortalidad.
- 3.º Emergencia de tercer grado, en la que el riesgo es grave para la mayoría de la población.

Los valores numéricos de aplicación se establecen fijando los valores máximos diario y después de siete, cinco y tres días, respectivamente para cada grado de emergencia.

Si en un mismo gráfico se representan los standards de régimen ordinario y de emergencia, el plano concentración-tiempo quedará dividido en zonas de muy fácil interpretación visual como puede observarse en los standards que se propone.

## 9. Ejemplo de aplicación del método

En lo que sigue se va a desarrollar la aplicación a un caso real, concretamente a una estación medidora del Ayuntamiento de Madrid, situada en una zona de perturbación media. El período elegido se extiende desde el otoño de 1971 al de 1972, habiéndose elegido como contaminantes el  $\text{SO}_2$  y los humos.

Los valores diarios medios figuran con el símbolo  $V_d$  en el cuadro de la evolución de la contaminación respectiva (Cuadros 4 y 5).

### 9.1. DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE CONTRASTE.

Para el  $\text{SO}_2$

Según los standards indicados anteriormente:

$$\begin{aligned} C_1 &= 400 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3 \\ C_{30,m} &= 250 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3 \\ C_{360} &= 150 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

Por tanto, en el valor mensual.

$$C^*_{d,m} = C_1 - b \text{ L d}$$

se debe cumplir para  $d = 30$

$$C^*_{30,m} = C_1 - b \text{ L 30}$$

es decir,  $250 = 400 - b \text{ L 30}$

de donde

$$b = \frac{400 - 250}{\text{L 30}} = \frac{150}{\text{L 30}} = 44,1$$

Luego  $C^*_{d,m} = 400 - 44,1 \text{ L d}$

Igualmente, para el valor anual

$$C^*_d = C_1 - a \text{ L d para } d = 360$$

$$C^*_{360} = C_1 - a \text{ L 360}$$

$$150 = 400 - a \text{ L 360}$$

$$a = \frac{400 - 150}{L \ 360} = \frac{250}{L \ 360} = 42,479$$

luego  $C^*_{d} = 400 - 42,479 L \ d$

Teniendo en cuenta que

$$C^*_{30} = 400 - 42,479 L \ 30 = 256$$

es para nuestros fines prácticamente igual el valor límite mensual, simplificaremos los cálculos adoptando esta expresión anual como válida también para los meses.

Los valores numéricos resultantes aparecen en el cuadro 1.

*Para los humos.*

Análogamente

$$C_1 = 300 \text{ ug/m}^3$$

$$C_{30,m} = 200 \text{ ug/m}^3$$

$$C_{360} = 130 \text{ ug/m}^3$$

Resulta:

$$C^*_{d,m} = 300 - 29,4 L \ d$$

$$C^*_{d} = 300 - 28,881 L \ d$$

también, por su escasa diferencia utilizamos la segunda expresión con carácter general.

Los valores desarrollados se encuentran en el cuadro 2.

*Determinación de los índices de contaminación.*

En los cuadros 4 y 5 aparecen los cocientes

$$\frac{C_{d,m}}{C^*_{d,m}} \text{ y } \frac{C_d}{C^*_{d}}$$

cuyo numerador es mayor que su denominador, así como su suma. En el cuadro 6 se reflejan los resúmenes mensuales y anuales para cada contaminante.

*Análisis de la contaminación en base a los resultados obtenidos.*

De manera gráfica la evolución del estado de contaminación puede observarse en los esquemas 7 y 8.

Con esta información se deduce:

### 1.º *Con relación a la contaminación por SO<sub>2</sub>.*

—En el mes de noviembre durante los días 15 al 20 se presenta un episodio de contaminación importante, pero de escasa incidencia sanitaria, ya que los correspondientes valores ponderados no superan a los de contraste. Después, desde el día 26 al 28 vuelve a aumentar la concentración media diaria en valor moderado, sosteniéndose la ponderada en un entorno del nivel alcanzado al final del episodio anterior. Con todo, este mes presenta unas condiciones higiénicamente tolerables.

—En diciembre, en los intervalos comprendidos entre los días 9 al 16 y del 18 al 22 nuevamente se superan los valores admisibles, de forma que a partir del día 12 la concentración ponderada mensual rebasa a la de contraste, manteniéndose así en los días siguientes. Desde el día anterior la concentración ponderada anual supera a la de contraste anual, y estará en estas condiciones durante todo el período. Puede observarse como la ponderación de los valores diarios debilita sensiblemente su fluctuación al tiempo que recoge sostenidamente los estados anteriores.

El índice de contaminación mensual es superior a la unidad.

—Durante el mes de enero la situación se agrava notoriamente, ya que además de presentarse tres episodios de contaminación, (los comprendidos entre los días 2 y 3, 7 y 12; 15 y 17), en el segundo se alcanza durante cuatro días el régimen de primera emergencia. Las concentraciones ponderadas mensual y anual llegan a un máximo al final de este segundo episodio, y si bien la mensual decrece después con cierta rapidez, por contra, la anual de valor más limitado se va a mantener casi constante durante el mes, incidiendo además notablemente en los resultados del siguiente.

El índice de contaminación mensual vale 1,64 justificativo de las muy desfavorables condiciones higiénicas de este intervalo.

—El mes de febrero transcurre con un estado de contaminación muy sostenido (solamente en nueve días no se superan valores admisibles), con concentraciones moderadamente altas. No obstante, durante todo él, las concentraciones ponderadas son superiores a sus respectivas de contraste. Por ello, el índice de contaminación mensual también supera la unidad.

—Para los meses que siguen las concentraciones medias diarias se mantienen, salvo en contadas ocasiones, por debajo de los valores higiénicos. Por ello el índice de contaminación mensual ya no vuelve a ser significativo. Sin embargo, la contaminación ponderada anual, que desde marzo tiende a descender monótonamente se mantiene a cota más alta que la de contraste como consecuencia de las graves si-

tuaciones invernales padecidas. El índice de contaminación anual es superior, consecuentemente, a la unidad.

—Como resumen, la evolución de la contaminación por  $\text{SO}_2$  en este ejemplo, presenta las siguientes particularidades:

a) Durante los meses de noviembre a febrero, la contaminación es importante.

b) Se alcanza en una ocasión el estado de emergencia de primer grado.

c) En tres meses el índice de contaminación supera la unidad. También ocurre lo mismo en el correspondiente al año.

## 2.º *Respecto a los humos.*

Aquí la evolución tiene un carácter muy similar a la del  $\text{SO}_2$ , estando contaminados los meses desde octubre a febrero, aún cuando el índice mensual sólo se supera en diciembre y enero. Los valores promedio diario son muy fluctuantes y en dos ocasiones próximos a la situación de emergencia de primer grado. La concentración ponderada anual no se aparta sensiblemente de la de contraste anual, y así el índice anual de contaminación es muy próximo a la unidad.

Es decir, la zona de influencia de la citada estación medidora debería ser declarada contaminada por  $\text{SO}_2$ , y en cambio no por humos. La acción legal se dirigiría a disminuir la emisión de  $\text{SO}_2$ , particularmente en invierno, así como a evitar nuevas fuentes emisoras de humos por haberse alcanzado la saturación higiénica.