

METODO DE DISEÑO DE REDES DE MEDIDA DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

F.J. SERON ARBELOA

y

C. PEREZ CASEIRAS

*Dpto. Matemática Aplicada,
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales,
Universidad de Zaragoza,
c/ María de Luna, 3,
50015 Zaragoza.*

RESUMEN

Se presenta un método de diseño de redes de medida de contaminantes atmosféricos, útil para realizar Estudios de Impacto Ambiental. Esta técnica conduce a una red óptima, en el sentido de que proporciona la mayor información posible utilizando el mínimo número de dispositivos de medida.

En el diseño se utiliza la técnica de Análisis de Correlación Espacial, para comparar la información contenida en las posibles estaciones de medida que pueden pertenecer a la red, y el concepto de Potencial de Violación, para tener en cuenta el número de ocasiones que se detectan en que se superan los valores de inmisión permitidos por la ley.

Como ilustración del método, se diseña una red de medida de contaminantes atmosféricos para realizar el Estudio del Impacto Ambiental producido por una Planta de Procesado de Potasio.

SUMMARY

A method to design Air Quality Monitoring Networks is presented, which is useful to perform Environmental Impact Analysis. This technique leads to an optimal network, i.e., a network which provides a maximum of information with a minimum of measurement devices.

The Spatial Correlation Analysis technique, in order to compare the information given by the possible measurement stations that can belong to the network, and the concept of Potential of Violation, to take into account the number of times that the maximum inmission values tolerated by law are exceeded, are used in the design.

As an illustration of the method, an Air Quality Monitoring Network to perform an analysis of the Environmental Impact due to a potash processing plant is designed.

Recibido: Septiembre 1988

INTRODUCCION

El Real Decreto Legislativo 1302/1986 del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, dispone que en el conjunto de proyectos públicos o privados que cita, se deberá incluir un Estudio de Impacto Ambiental que contendrá al menos los siguientes datos:

- a) Descripción general del proyecto y exigencias previsibles en el tiempo en relación con la utilización del suelo y de otros recursos naturales. Estimación de los tipos y cantidad de residuos vertidos y emisiones de materia o energía resultantes.
- b) Evaluación de los efectos previsibles directos e indirectos del proyecto sobre la población, la fauna, la flora, el suelo, el aire, el agua, los factores climáticos, el paisaje y los bienes materiales, incluido el patrimonio histórico-artístico y el arqueológico.
- c) Medidas previstas para reducir, eliminar o paliar los efectos ambientales negativos significativos y las alternativas existentes a las condiciones inicialmente previstas del proyecto.
- d) Resumen del estudio y conclusiones en términos fácilmente comprensibles. Informe en su caso de las dificultades informativas o técnicas encontradas en la elaboración del mismo.
- e) Programa de vigilancia ambiental.

Cuando se desarrollan Estudios del Impacto Ambiental para evaluar los efectos directos e indirectos causados por algún foco industrial rural o urbano, las redes de medida de contaminantes atmosféricos, son una herramienta esencial a la hora de realizar el seguimiento y el control de la contaminación atmosférica.

Los factores más importantes que se deben tener en cuenta cuando se diseñan redes de este tipo son; el número de dispositivos a instalar, que es el factor que influye en el desembolso monetario que se debe realizar y los lugares geográficos donde se han de colocar los dispositivos, que es el factor que influye en la cantidad de información que se obtiene del impacto ambiental producido por el fenómeno que se está estudiando.

Dado el elevado coste de los equipos de medida, la optimización de las redes es indispensable en la actualidad.

En este trabajo, se presenta un método de diseño de redes de medida de contaminantes atmosféricos, que proporciona una red óptima.

ANTECEDENTES

Los programas para la medición de la contaminación atmosférica se iniciaron en el siglo pasado, pero el primer ensayo a gran escala se realizó en Leicester, Reino Unido entre 1937 y 1939¹.

Al inicio de la década de los cincuenta se establecieron programas de control de la contaminación en varias grandes ciudades del mundo. Generalmente en esta época la determinación del número y ubicación de las estaciones de control necesarias en una red, se basaba en consideraciones subjetivas, a menudo dictadas por la experiencia.

Sin embargo este tipo de procedimientos conducían frecuentemente a resultados no excesivamente satisfactorios. A partir de esa época ha ido creciendo el interés por el diseño de redes y por las técnicas de optimización del diseño. Algunos de los primeros estudios en este sentido se realizaron en Gran Bretaña² y en los Estados Unidos^{3,4}.

Durante los diez años siguientes no se hicieron otros estudios hasta que al principio de los sesenta aumentó de nuevo el interés en las cuestiones como la densidad de las redes y los criterios de localización, con objeto de poder verificar las predicciones de los modelos de difusión. En esta época la Organización Mundial de la Salud desarrolló una gran actividad en la sistematización de todos aquellos aspectos involucrados en el control de la polución, en particular en la relacionada con las áreas industriales y urbanas. Los resultados fundamentales desarrollados en esa década se pueden encontrar en sus publicaciones^{5,6,7,8,9}.

A partir de entonces se han desarrollado multitud de trabajos en todas las líneas relacionadas con el tema de la contaminación ambiental. En particular, en el caso del diseño de redes, a modo de información y dentro del rango de nuestros conocimientos, los siguientes trabajos pueden servir de ejemplos caracterizados por diferentes aspectos como por ejemplo, el empleo de herramientas analíticas sencillas¹⁰, la utilización de gran cantidad de datos experimentales¹¹, la realización de diseños para largos períodos de tiempo¹², el empleo de procedimientos muy generales pero excesivamente costosos desde el punto de vista computacional¹³.

La técnica presentada en este trabajo, se basa en una aproximación heurística introducida por Liu et al.¹⁴ y en las ideas presentadas por Modak y Lohani¹⁵.

IDEAS BASICAS

En general, el objetivo primario de una red de control de la calidad ambiental, es medir las concentraciones máximas que pueden aparecer en el entorno geográfico del foco o focos contaminantes, con objeto de poder compararlas en todo momento con las concentraciones permitidas por la legislación vigente.

Los datos que se emplean para realizar el diseño de una red, suelen ser valores de concentración de inmisión procedentes de campañas de medida de la contaminación atmosférica, o aproximaciones de dichas concentraciones procedentes de los resultados numéricos obtenidos a partir de algún modelo matemático que simule de forma adecuada el fenómeno contaminante. Normalmente, aunque se disponga de abundantes observaciones reales, es aconsejable emplearlas para validar un modelo matemático que se utilice posteriormente para generar una base de datos mucho más completa. De esta forma puede partirse de una red teórica en la que el número de localizaciones potenciales para la instalación de estaciones sea tan densa como se desee.

Con objeto de que la red que se diseñe sea efectiva, es necesario contar con datos de la calidad ambiental recogidos durante un período de tiempo suficientemente largo, de modo que el conjunto disponible sea claramente representativo del área donde se situará la red.

Se considera que un período de un año es suficiente ya que de esta forma queda reflejada en los datos toda la variabilidad meteorológica de la zona. Asimismo dado que

la frecuencia de las observaciones ha de ser elevada, lo ideal es disponer de muestras horarias.

Partiendo de un conjunto de localizaciones potenciales en las cuales se supone que puede estar situada una estación, la idea básica del método propuesto consiste en construir una Función de Utilidad que engloba para cada estación, su área de cobertura y las violaciones legales detectadas.

En este contexto, se define como Cobertura Espacial de una estación o también Esfera de Influencia de una estación, a la zona que la rodea dentro de la cual las medidas de la concentración de la estación, se consideran representativas de la zona.

Para realizar el cálculo de una esfera de influencia, la aproximación adoptada en este estudio se basa en el análisis de la similitud de la información contenida en una estación cuando se la compara con la del resto de las estaciones. Para este fin, se hace uso de las propiedades estadísticas de la distribución espacial de la concentración de contaminantes, estudiada a través del cálculo del coeficiente de correlación espacial (r), empleando para ello los valores de las concentraciones medidas en cada estación. De esta forma el coeficiente de correlación espacial proporciona una medida de la relación existente entre las estaciones.

Si suponemos que $C_1 = (C_{11}, C_{12}, C_{13}, \dots, C_{1n})$ y $C_2 = (C_{21}, C_{22}, C_{23}, \dots, C_{2n})$ denotan las concentraciones de contaminante en 2 puntos de la malla, medidos en los mismos instantes, se puede expresar el coeficiente de correlación espacial para un tamaño de muestra n como

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{1i} - \bar{C}_1)(C_{2i} - \bar{C}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_{1i} - \bar{C}_1)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (C_{2i} - \bar{C}_2)^2}}, \quad (1)$$

donde

$$\bar{C}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{1i} \quad \bar{C}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{2i}.$$

La justificación de la aproximación adoptada se basa en que el fenómeno de las fluctuaciones de la concentración de contaminante, se caracteriza porque dada una estación, los coeficientes de correlación espacial decrecen conforme las otras estaciones se alejan de la primera (Figura 1). Estos coeficientes de correlación pueden variar entre +1 y -1.

Por lo tanto se puede hablar de una distancia de corte (S_c) a partir del cual, el coeficiente de correlación se espera que sea menor que un valor dado (r_c). Las suposiciones que están implícitas en esta hipótesis de trabajo son:

- Los conjuntos de datos C_1 y C_2 son dos variables correlacionadas que siguen una distribución bivariada normal.
- No existen variaciones temporales significativas que puedan producir coeficientes de autocorrelación espúreos.

Por todo lo dicho se puede afirmar que la esfera de influencia de una estación, es el área que la rodea dentro de la cual se verifica que el coeficiente de correlación espacial

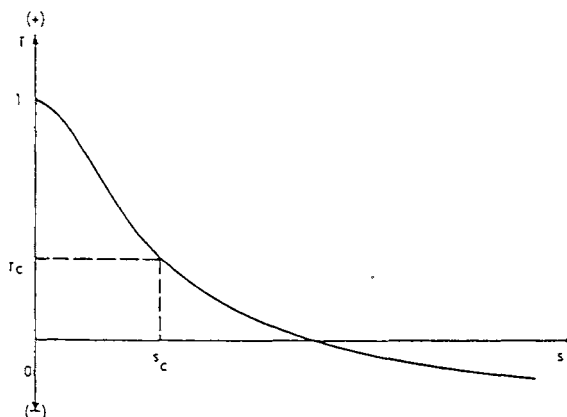


Figura 1. Coeficiente de correlación en función de la distancia.

de esta estación con los puntos de su alrededor, está por encima de un determinado valor de corte. Lo que significa que los datos de la calidad del aire medidos por dicha estación, pueden considerarse representativos y extrapolables con un cierto grado de confianza a cualquier punto de dicha área.

De hecho, el valor de (r_c) no implica una relación causal entre C_1 y C_2 , sino la existencia de una asociación entre ambos conjuntos, de tal forma que $100r^2$ representa el porcentaje de las variaciones de la concentración medida en una de las estaciones, que se puede explicar observando las variaciones de las concentraciones medidas en la otra estación¹⁷.

La igualdad (2)

$$\text{varianza explicada} = r^2 \quad (2)$$

es válida suponiendo un tamaño de muestra suficientemente grande, en caso contrario debe corregirse en función del número de muestras (n) disponibles. Para ello pueden utilizarse, por ejemplo, las tablas que aparecen en¹⁸.

Resumiendo, el procedimiento de caracterización de la esfera de influencia de una estación, consiste en:

- Escoger el valor de la varianza explicada.
- Calcular el valor de (r_c) mediante (2).
- En el caso de disponer de pocas muestras, es necesario corregir ese valor mediante tablas.

Una vez caracterizada la esfera de influencia de una estación, se denomina Magnitud de dicha esfera, al número de posibles estaciones que están en el interior de dicha esfera y se denota como Np .

Hay que destacar el hecho de que la correlación no da información sobre los valores absolutos de las concentraciones en una estación y sí que la da sobre las variaciones relativas de las concentraciones entre estaciones. Por ello, si se diseñase una red teniendo en cuenta sólo el parámetro Np , se estaría desdiciendo que en la mayoría de las aplicaciones, lo realmente importante es la predicción de los picos máximos de concentración.

La capacidad de una posición para detectar violaciones se mide mediante un parámetro denominado Potencial de Violación que será denotado por Nv . Este parámetro debe tener en cuenta el hecho de que no todas las violaciones son iguales. Para ello se utiliza una ponderación de las violaciones, clasificando las concentraciones y asignando a cada rango un factor de ponderación.

Entre las muchas formas posibles de construir una función que permita calcular el potencial de violación de una posición (i), se ha elegido una función no lineal a trozos propuesta en ¹⁶.

$$Nv_i = \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^{N_t} (v_{k+1} - v_k)(x_i - x_k) \frac{X}{(x_{k+1} - x_k)} \quad (3)$$

donde

- v_k = factor de ponderación del umbral x_k
- x_k = umbral k -ésimo
- $X = 0$, si $(x_i - x_k) \leq 0$
- $X = 1$, en caso contrario
- N_t = número total de umbrales
- T = número de observaciones en cada posición
- Nv_i = potencial de violación de la posición (i)

En estos momentos, ya se dispone de la información suficientemente cuantificada para construir la Función de Utilidad del método, en la que intervienen como parámetros de diseño para cada posible estación; Np que actúa como variable de decisión asociada con el objetivo "predicción de las variaciones espaciales y temporales del campo de concentraciones", y Nv que actúa como variable de decisión asociada con el objetivo "detección de violaciones sobre las normas legales".

La Función de Utilidad (FU) propuesta para cada posible estación es:

$$(FU) = Np \times (Nv)^b \quad (4)$$

con

$$b \geq 0$$

El parámetro (b) es un nuevo grado de libertad que sirve para ponderar la importancia relativa que se le da a la consecución de cada objetivo. En¹⁹ se demuestra que con valores de (b) comprendidos entre 0.075 y 0.1, se puede llegar a un buen compromiso entre ambos objetivos.

PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

A partir de los datos de concentraciones obtenidos de la simulación numérica del fenómeno de contaminación, utilizando una red formada por N localizaciones potenciales que se suponen están numeradas de 1 a N y fijado el coeficiente de correlación espacial de corte r_c que caracteriza a las esferas de influencia, se procede del modo siguiente:

- Paso 1. Se calculan los coeficientes de correlación

$$r_{i,j} \text{ con } i = 1, 2, 3, \dots, N ; j = 1, 2, 3, \dots, N$$

- Paso 2. Se calculan las esferas de influencia

$$E_i \text{ con } i = 1, 2, 3, \dots, N$$

siendo E_i el conjunto formado por las localizaciones m cuya correlación $r_{i,m}$ es mayor o igual que r_c .

- Paso 3. Para cada esfera de influencia E_i se obtiene su magnitud N_{pi} .
- Paso 4. Se calculan los potenciales de violación

$$N_{vi} \text{ con } i = 1, 2, 3, \dots, N$$

utilizando la expresión (3) y los coeficientes mostrados en la Tabla I.

Concentración	coeficiente
< 200	0.5
200-400	1
400-1000	1.5
1000-2000	3

Tabla I.

- Paso 5. Se calculan las funciones de utilidad

$$FU_i \text{ con } i = 1, 2, 3, \dots, N$$

mediante la expresión (4) con el valor de b adecuado y se forma el conjunto

$$F = \{FU_i, i = 1, 2, 3, \dots, N\}$$

- Paso 6. Se ordena el conjunto F con la relación de orden {de mayor a menor} y se selecciona la estación cuya función de utilidad es la máxima.

- **Paso 7.** Para evitar solapamientos, se hacen desaparecer las estaciones que pertenecen a la esfera de influencia de la estación seleccionada en el Paso 6 en todos aquellos conjuntos E_i en los que estuviesen.
- **Paso 8.** Se vuelve al Paso 3, hasta que el número de estaciones seleccionadas sea el adecuado.

En el método expuesto es necesario especificar al comienzo cuál es el número de estaciones que se considera adecuado. Para determinarlo se emplean dos parámetros. El primero, al que se denomina Efectividad de Cobertura, no es más que la suma de las magnitudes de las esferas de influencia de todos los receptores de la red. Este parámetro depende del número de receptores de la red, a mayor número de receptores mayor cobertura, y también del valor r_c elegido para caracterizar las esferas de influencia.

El segundo parámetro a tener en cuenta en la determinación del número de receptores óptimo es el Número de Violaciones, que evalúa la cantidad total de violaciones de la ley detectadas por la red, en relación con el número de violaciones totales que se producen en el área de estudio.

Como puede verse en¹⁹, el número óptimo de sensores se alcanza cuando al añadir uno más, el aumento de la efectividad de cobertura y del número de violaciones detectadas no sea rentable.

Si se dispone de muestras horarias de concentraciones, suele ser normal la elección de las medidas diarias como datos base para realizar el diseño de la red. Este hecho puede llevar aparejada una posible pérdida de sensibilidad de la red en cuanto a la detección de los picos horarios de concentración máxima. Para comprobar que la red diseñada mide apropiadamente, basta con calcular los gráficos "concentración en función del tiempo" de la estación seleccionada para colocar el receptor y de otras posiciones de su esfera de influencia. En el caso de que se observase una cierta deficiencia en la detección de máximos, habría que rehacer el diseño, utilizando como datos base las medidas cada 12 horas. Si la nueva red obtenida siguiese siendo deficiente, se efectuaría un nuevo refinamiento, esta vez con una base de 6 horas y así sucesivamente. Con este tipo de proceso se consigue aumentar la sensibilidad de la red ante los grandes picos de concentración aunque disminuyen en general los coeficientes de correlación.

ILUSTRACION DEL METODO

Descripción del fenómeno contaminante

La Figura 2 muestra el esquema de una planta de procesado de Potasio. La Silvina se saca a la superficie de una mina subterránea y se vuelca en una pila de mineral. Posteriormente el mineral viaja a lo largo de una cinta transportadora inclinada, hacia el edificio de procesado donde se muele y tamiza. Las emisiones de partículas resultantes de los procesos de molido y tamizado, se liberan horizontalmente a temperatura ambiente desde la terraza del edificio. Posteriormente el mineral se refina por flotación en espuma y se envía a los secadores. Las emisiones de partículas producidas en el proceso de secado se liberan en una chimenea, de 50 metros de altura, que está colocada al lado del edificio de procesado que tiene una altura de 25 metros.

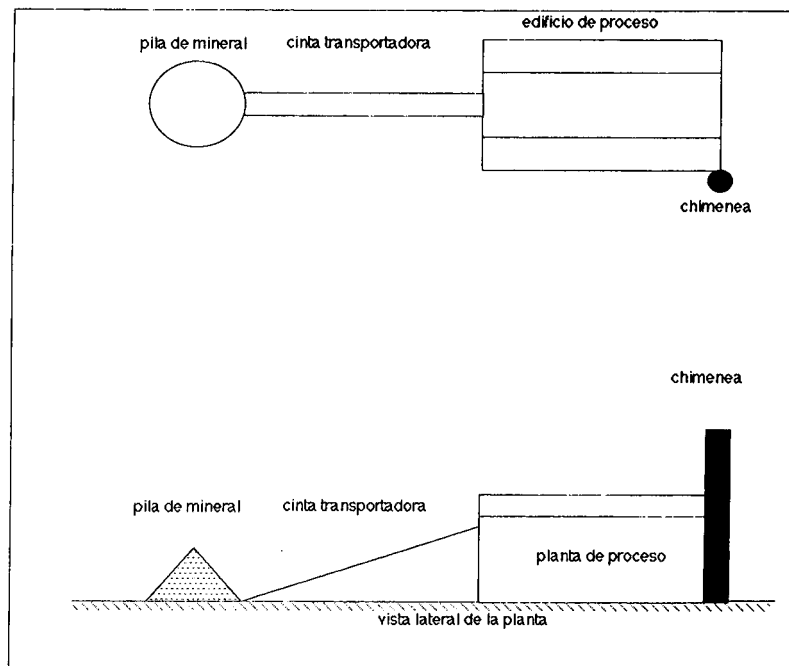


Figura 2. Vistas de la planta de procesamiento de potasio.

FUENTES	pila de mineral	cinta transportadora	terrazza	chimenea
Tasa De Emisión De Partículas	353.4	1.3	10.5	5
Altura de Emisión	—	—	—	50
Velocidad De Emisión	—	—	—	8
Diámetro	—	—	—	1.0
Temperatura De Salida	—	—	—	340

Tabla II. Datos de emisión en (g/seg).

La Tabla II muestra los datos de emisión para la planta de Potasio. Se supone que la mina de Silvina funciona entre las 8^h y las 16^h. La tasa de emisión de 16^h a 8^h es de 70.7 gramos/segundo.

Una parte significativa de las emisiones fugitivas que provienen de la pila de mineral y de la cinta transportadora están formadas por grandes partículas. En la Tabla III se dan la distribución de tamaños, las velocidades de deposición y los coeficientes de reflexión superficial. Se supone que el resto de las emisiones de partículas de la planta son de tamaño menor de 1 micra y por lo tanto los efectos de sedimentación gravitatoria y deposición seca no se deben incluir.

El problema que se plantea es el de diseñar una red de medida para las concentraciones de partículas producidas por la actividad de la planta.

TAMAÑO DE PARTICULA (MICRAS)	DIAMETRO MEDIO	FRACCION MASICA	VELOCIDAD SEDIMENTACION (M/S)	COEFICIENTE REFLEXION
0-10	6.3	0.10	0.001	1.00
10-20	15.54	0.40	0.007	0.82
20-30	25.33	0.28	0.019	0.72
30-40	35.24	0.12	0.037	0.65
40-50	45.18	0.06	0.061	0.59
50-60	17.82	0.04	0.099	0.50

Tabla III. Tamaños, velocidades de sedimentación y coeficientes de reflexión para las emisiones de la pila y de la cinta.

La pila de mineral se modela como una fuente de área, con un lado efectivo dado por $\frac{D \times \sqrt{\pi}}{2}$, donde D es el diámetro de la base de la pila de almacenamiento. La altura de emisión se hace igual a la altura de la pila de mineral (10 metros). La tasa de emisión dada en gramos por segundo, se divide por el área horizontal de la pila (706.9 metros cuadrados) para obtener la tasa de emisión de la fuente de área en gramos por segundo por metro cuadrado.

La cinta transportadora tiene una anchura de 10 metros y una longitud de 100 metros. Por ello, se representa como 10 fuentes de volumen cuadradas de 10 metros. La dimensión lateral de cada fuente se obtiene dividiendo la anchura (10 metros) por 2.15. La dimensión vertical se hace arbitrariamente igual a 1 metro para tener en cuenta los efectos de los elementos de rugosidad locales de la planta. La altura de emisión H ;

para la fuente i -ésima viene dada por la expresión

$$H_i = L_i \text{ sen } \beta$$

siendo

H_i = altura efectiva de la fuente de volumen i

L_i = distancia del centro de la fuente de volumen i al inicio de la cinta transportadora

β = ángulo de inclinación (9 grados)

El modelo para fuentes de volumen se usa también para la terraza de 90 por 20 metros cuadrados. La terraza se aproxima por 4 fuentes de volumen cuadradas de 20 metros, con centros espaciados por intervalos de 23.3 metros. La dimensión lateral de cada una se obtiene dividiendo los 23.3 metros por 2.15. Dado que la terraza se extiende entre los 20 y los 25 metros por encima del suelo, la altura de emisión se fija en 22.5 metros. Para tener en cuenta los efectos aerodinámicos de estela producidos por el edificio de proceso en las emisiones de la terraza, la dimensión vertical se obtiene dividiendo la altura del edificio (25 metros) por 2.15.

Resumiendo, los efectos de las emisiones de la planta de potasio se simulan mediante 16 fuentes. Una de área que representa la pila de mineral, 10 de volumen que representan la cinta transportadora, 4 de volumen que simulan la terraza y una fuente puntual que representa la chimenea. Como la relación entre la altura de la chimenea y la del edificio es menor que 2.5, los efectos de estela producidos por el edificio deben de tenerse en cuenta.

Los datos de emisión dados en la Tabla III se convierten en los de las Tablas IV y V.

Por último, el terreno que rodea a la planta es completamente llano.

Informe meteorológico

Para realizar la simulación del fenómeno de contaminación se dispone de la información meteorológica recogida durante un año completo en una estación próxima a la planta de Potasio. Dicha información está compuesta por registros horarios de velocidad y dirección del viento, temperatura ambiente, clase de estabilidad y altura de la capa de mezcla. Todos los datos se han agrupado para su análisis por estaciones y para el año completo. Por razones de extensión se presentan sólo algunos de ellos.

En la Figura 3 se muestra la evolución de la Temperatura a lo largo del año. Se observa que el clima es continental, con inviernos muy fríos y veranos calurosos.

En cuanto al viento se dispone de información acerca de las direcciones y de las velocidades. En la Figura 4 se muestra la Rosa de Vientos para el año completo. Se observa que la dirección predominante es siempre la dirección NNE, siendo además el cuadrante N-E el que presenta mayor incidencia de vientos.

Las matrices de estabilidad proporcionan información sobre la condición estable o inestable de la atmósfera. En cada caso (4 estaciones y año completo) se han calculado 16 tablas, que se corresponden con cada una de las direcciones tradicionales de la Rosa de Vientos. Para cada dirección se relaciona la clase de estabilidad con la velocidad del viento en la superficie, que a su vez se ha dividido en seis categorías siguiendo

HORA	TASA EMISION (GR/SEG M ²)	EMISIONES HORARIAS TOTALES (GR/M ²)
0100	0.1	360
0200	0.1	360
0300	0.1	360
0400	0.1	360
0500	0.1	360
0600	0.1	360
0700	0.1	360
0800	0.5	1800
0900	0.5	1800
1000	0.5	1800
1100	0.5	1800
1200	0.5	1800
1300	0.5	1800
1400	0.5	1800
1500	0.5	1800
1600	0.1	360
1700	0.1	360
1800	0.1	360
1900	0.1	360
2000	0.1	360
2100	0.1	360
2200	0.1	360
2300	0.1	360
2400	0.1	360

Tabla IV. Tasas de emisión de partículas de la pila de mineral.

los criterios habituales. En la Tabla VI se presenta a modo de ejemplo la matriz de estabilidad para la dirección N en Primavera.

Simulación numérica del fenómeno

Para realizar una simulación matemática del fenómeno, se ha utilizado el modelo ISCST "Industrial Source Complex Short Term Model" de la U.S. Environmental Protection Agency²⁰, que es un modelo Gaussiano avanzado, válido para ambientes industriales rurales y urbanos que admite elevaciones topográficas.

Para tener una idea del fenómeno, en la Figura 5 se muestra una representación tridimensional de las concentraciones acumuladas para la estación de Primavera y en la Figura 6 se muestra el mapa de isoconcentraciones para el año completo.

CATEGORIA DE ESTABILIDAD	TASA DE EMISION PARA VELOCIDADES DE VIENTOS (M/S) DE					
	0-1.5	1.6-3.1	3.2-5.1	5.2-8.2	A8.3-10.8	> 10.8
PILA DE MINERAL (gr/seg m ²)						
A	0.40	0.50	—	—	—	—
B	0.30	0.40	0.50	—	—	—
C	0.20	0.30	0.40	0.50	0.70	1.00
D	0.10	0.25	0.50	0.50	0.70	1.00
E	—	0.20	0.25	—	—	—
F	0.05	0.10	—	—	—	—
FUENTES DE VOLUMEN DE LA CINTA TRANSPORTADORA (gr/seg)						
A	0.13	0.16	—	—	—	—
B	0.10	0.13	0.16	—	—	—
C	0.08	0.12	0.14	0.16	0.19	0.22
D	0.04	0.10	0.13	0.16	0.19	0.22
E	—	0.08	0.10	—	—	—
F	0.02	0.05	—	—	—	—

Tabla V. Tasas de emisión para la pila y la cinta en función de la velocidad del viento y de la clase de estabilidad.

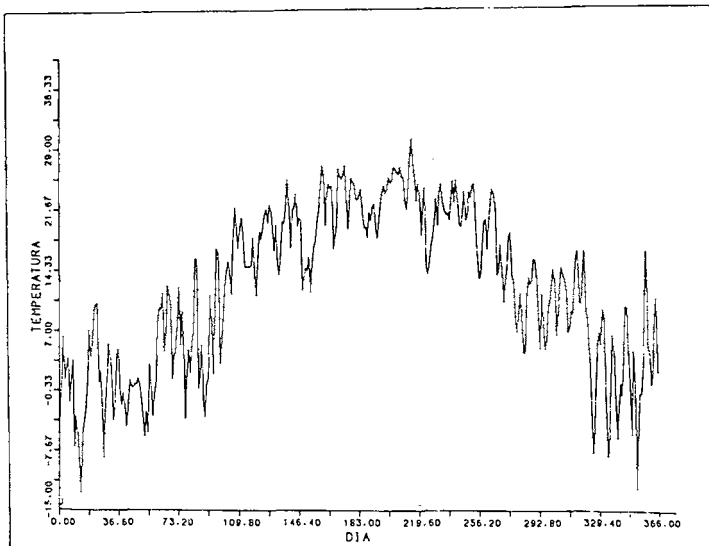


Figura 3. Gráficos de la Temperatura/tiempo. Año completo.

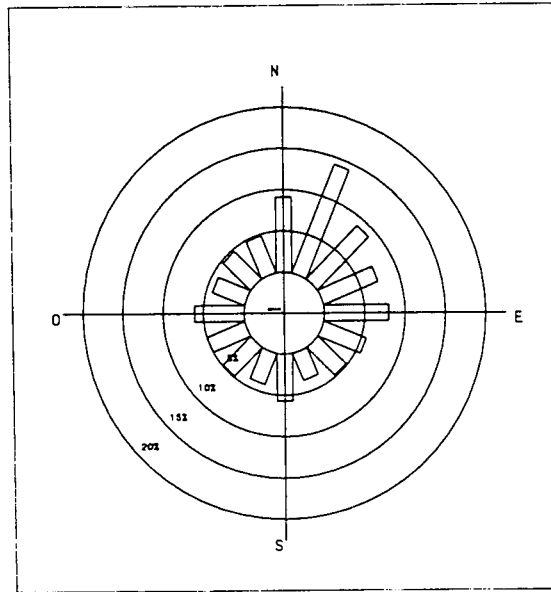


Figura 4. Rosa de Vientos. Año completo.

PERIODO DE MUESTREO: PRIMAVERA

DIRECCION DEL VIENTO: N

CATEGORIAS DE ESTABILIDAD	INTERVALOS DE VELOCIDAD (NUDOS)					
	0-3	3-6	6-10	10-16	17-21	> 21
A	0.05	0.09				
B	0.09	0.37	0.18			
C	0.27	0.50	0.55			
D	0.27	0.92	1.56	0.32	0.05	
E	0.27	1.42	0.78			
F	1.78	0.78	0.23			

EL PORCENTAJE TOTAL ES: 10.48%

Tabla VI. Matriz de estabilidad para la dirección Norte en Primavera.

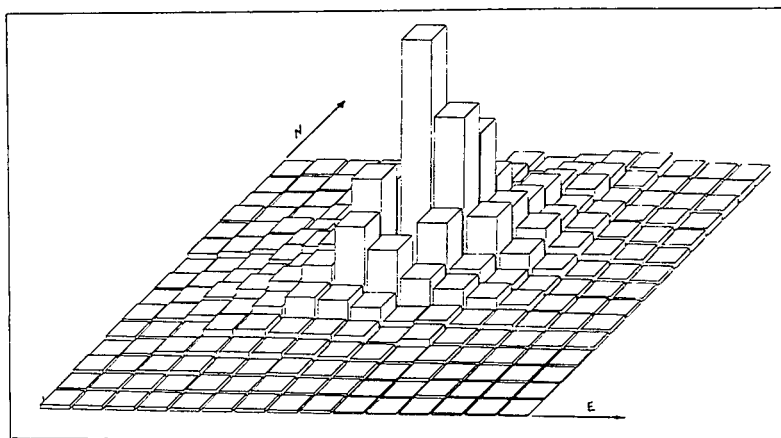


Figura 5. Mapa de concentraciones acumuladas. Primavera.

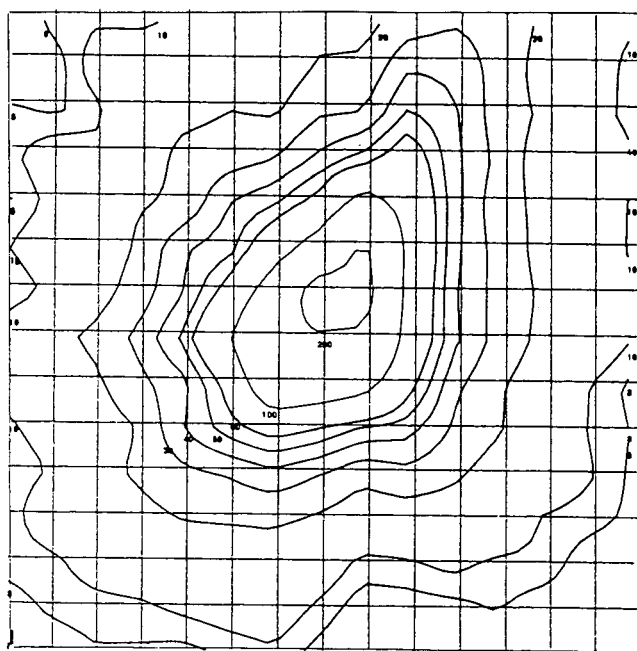


Figura 6. Mapa de isoconcentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Año completo.

Resultados obtenidos

En las Figuras 7, 8, 9 y 10, se presentan las redes diseñadas para cada una de las cuatro estaciones del año y en las Tablas VII, VIII, IX y X, se dan las esferas de influencia de los detectores que forman dichas redes así como el sensor que en cada esfera da el valor de inmisión máximo y la concentración de dicha inmisión.

En todos los casos, los parámetros de diseño que se han adoptado han sido: Datos promedio de 24 horas, coeficiente de correlación espacial de corte $r_c = 0.7$, siete

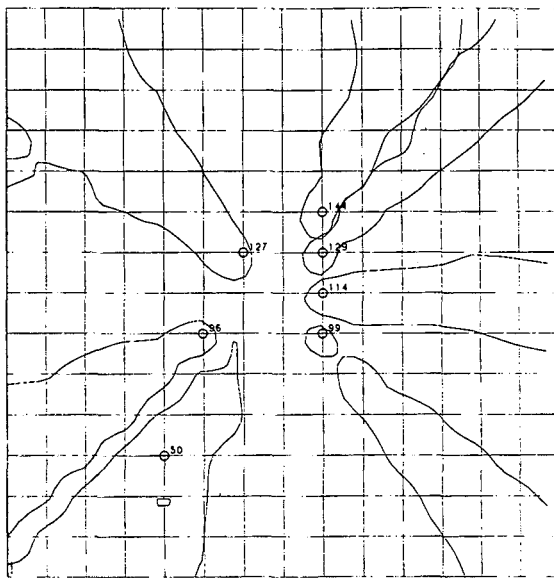


Figura 7. Red de detección diseñada para el Invierno.

DETECTORES						
127	50	99	96	129	114	144
ESFERAS DE INFLUENCIA DE ESTOS DETECTORES						
127	1	13	31	129	104	144
140	2	14	32	145	105	160
141	3	15	46	161	114	175
151	4	28	47	177	115	190
154	5	29	48	178	116	191
155	17	30	61	193	117	206
156	18	42	62	194	118	207
167	19	43	63	208	119	220
168	20	44	64	209	120	221
169	21	56	78	210	133	222
170	33	57	79	224	0	0
181	34	58	80	225	0	0
182	36	71	95	0	0	0
183	49	72	96	0	0	0
184	50	85	0	0	0	0
185	51	99	0	0	0	0
196	65	0	0	0	0	0
197	66	0	0	0	0	0
198	67	0	0	0	0	0
199	81	0	0	0	0	0
211	82	0	0	0	0	0
212	97	0	0	0	0	0
213	0	0	0	0	0	0
214	0	0	0	0	0	0
INMISION MAXIMA DE CADA ESFERA EN LOS SENSORES:						
127	97	99	96	129	114	144
VALOR DE INMISION EN MICROGRAMOS EN ESTOS SENSORES						
48.53011	35.88493	46.23640	19.36120	72.37381	96.10381	82.25668

Tabla VII. Red de detección diseñada para el Invierno.

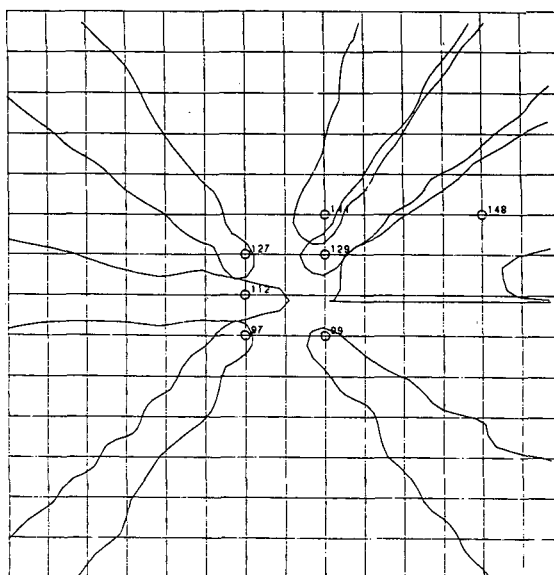


Figura 8. Red de detección diseñada para la Primavera.

DETECTORES						
99	127	148	129	144	112	97
ESFERAS DE INFLUENCIA DE ESTOS DETECTORES						
14	127	115	129	144	106	1
15	141	116	145	159	107	2
28	154	117	161	160	108	17
29	155	118	176	175	109	18
30	156	119	177	176	110	33
42	168	120	178	190	111	34
43	169	130	192	191	112	49
44	170	131	193	205	113	65
45	182	132	194	206	121	66
56	183	133	208	207	122	81
57	184	146	209	221	123	97
58	196	147	210	222	0	0
59	197	148	223	223	0	0
60	198	149	224	0	0	0
71	211	150	225	0	0	0
72	212	163	0	0	0	0
73	0	164	0	0	0	0
85	0	165	0	0	0	0
86	0	179	0	0	0	0
99	0	180	0	0	0	0
INMISION MAXIMA DE CADA ESFERA EN LOS SENSORES:						
99	127	130	129	144	112	97
VALOR DE INMISION EN MICROGRAMOS EN ESTOS SENSORES						
20.59182	58.10963	37.27012	94.19635	75.76173	67.60870	49.70056

Tabla VIII. Red de detección diseñada para la Primavera.

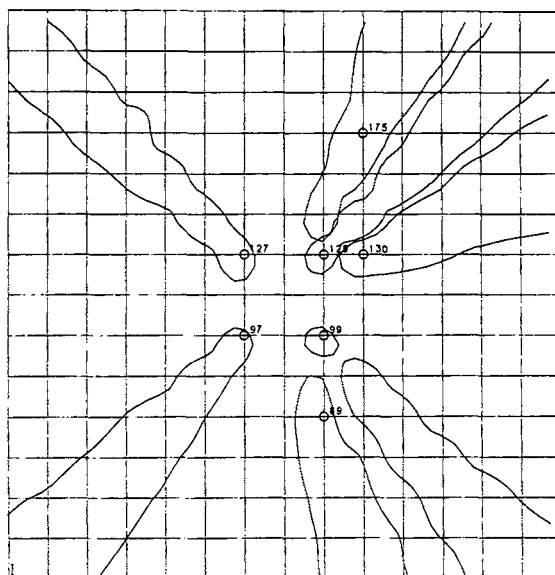


Figura 9. Red de detección diseñada para el Verano.

DETECTORES						
97	129	99	130	127	175	69
ESFERAS DE INFLUENCIA DE ESTOS DETECTORES						
1	129	13	130	127	144	10
2	145	14	131	141	159	11
3	161	15	132	154	160	24
16	162	28	146	155	175	25
17	177	29	147	168	190	26
18	178	30	148	169	191	39
19	192	42	149	182	205	40
32	193	43	150	183	206	54
33	194	44	163	196	207	55
34	208	56	164	197	221	69
48	209	57	165	211	222	84
49	210	71	179	212	0	0
50	224	85	180	0	0	0
64	225	99	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0
81	0	0	0	0	0	0
97	0	0	0	0	0	0
INMISION MAXIMA DE CADA ESFERA EN LOS SENSORES:						
97	129	99	130	127	144	84
VALOR DE INMISION EN MICROGRAMOS EN ESTOS SENSORES						
84.98109	98.43483	61.19775	36.16781	51.49801	99.70612	16.10627

Tabla IX. Red de detección diseñada para el Verano.

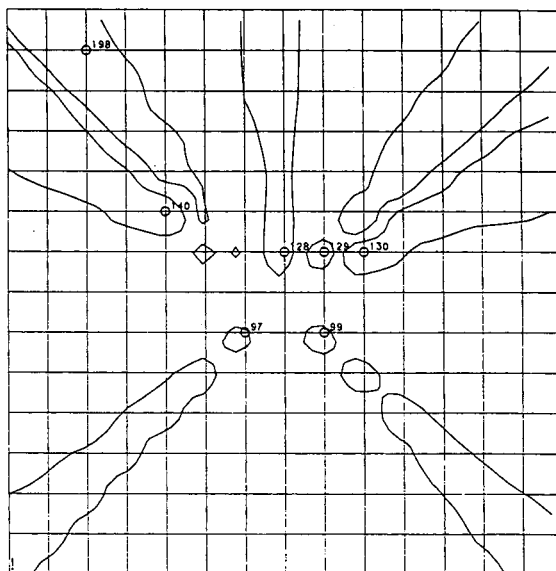


Figura 10. Red de detección diseñada para el Otoño.

DETECTORES						
129	97	99	198	140	130	128
ESFERAS DE INFLUENCIA DE ESTOS DETECTORES						
129	1	14	127	126	130	128
145	16	15	141	139	131	143
161	17	28	155	140	146	158
176	31	29	156	152	147	173
177	32	30	169	153	148	188
192	33	43	170	154	149	202
193	48	44	183	166	163	203
208	49	57	184	167	164	217
209	64	58	197	168	165	218
210	65	71	198	181	179	0
224	81	85	199	182	180	0
225	97	99	211	196	0	0
0	0	0	212	0	0	0
0	0	0	213	0	0	0
INMISION MAXIMA DE CADA ESFERA EN LOS SENSORES:						
129	97	99	127	126	130	128
VALOR DE INMISION EN MICROGRAMOS EN ESTOS SENSORES						
126.57276	67.24960	61.79784	57.53051	17.09646	31.63582	103.06032

Tabla X. Red de detección diseñada para el Otoño.

receptores en cada red y parámetro de la Función de Utilidad $b = 0.075$.

Para responder a la pregunta ¿Cuál es la red óptima de sensores de contaminación atmosférica que permitiría realizar el seguimiento y control del impacto ambiental producido por la planta de procesado de Potasio?, basta con evaluar cuántas veces aparecen cada uno de los receptores en las cuatro redes diseñadas. Los resultados pueden verse en la Tabla XI. De esa Tabla se sigue que los receptores que han de figurar necesariamente en la red óptima han de ser los números 129, 99, 97, 127, 130 y 144. El resto de los receptores quedan en última instancia a criterio de la persona responsable del estudio que puede elegirlos o desdenarlos en función de otros condicionantes que aquí no se han considerado.

Nº veces	Receptores
4	99, 129
3	97, 127
2	130, 144
1	50, 96, 112, 114, 128, 140, 148, 175, 198

Tabla XI.

Como comprobación de que la red diseñada mide apropiadamente, se presentan a modo de ejemplo las Figuras 11, 12, 13 y 14 en las que se representa la concentración frente al tiempo, en invierno, del receptor 127 y de tres posiciones elegidas al azar que están en su esfera de influencia. Como puede verse en todos los casos, los episodios de máximas concentraciones que se producen dentro de la esfera de influencia, se detectan adecuadamente por el receptor elegido para formar parte de la red. Este comportamiento es el del resto de los receptores que forman las distintas redes.

CONCLUSIONES

En cualquier estudio del Impacto Ambiental de la contaminación atmosférica es esencial diseñar una adecuada red de medida, para poder realizar el seguimiento y el control de la Contaminación.

El uso de los modelos matemáticos de simulación es siempre aconsejable y la mayor parte de las veces obligado, ya que normalmente se carece del número de observaciones necesarias para hacer un buen diseño.

Los modelos Gaussianos, cuando se validan y se aplican correctamente, son económicos y fiables en casi todas las situaciones habituales, salvo cuando se producen fenómenos en los que intervienen contaminantes reactivos fotoquímicamente o interacciones complejas con el terreno. Pero siempre hay que tener presente que han de estar apoyados en datos experimentales obtenidos durante períodos adecuados de tiempo y que requieren estudios meteorológicos completos, ya que la carencia total o

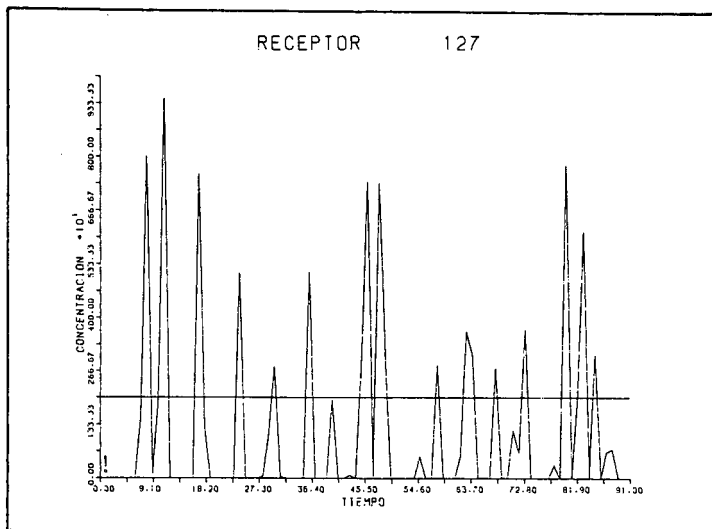


Figura 11.

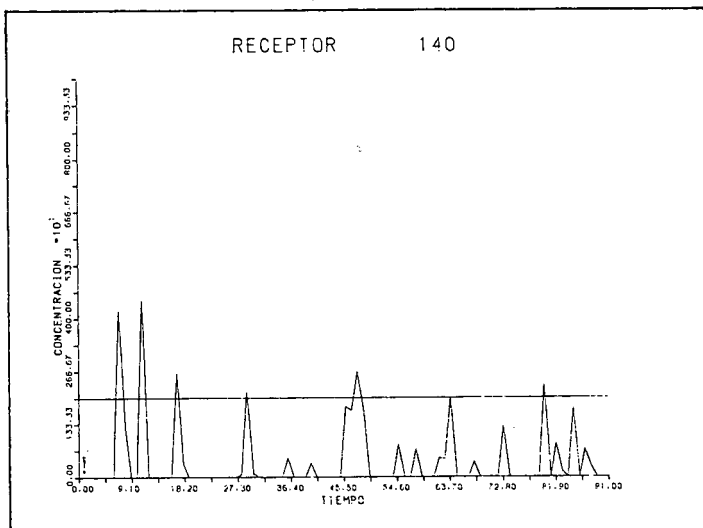


Figura 12.

parcial de todo este tipo de datos, llevan consigo un gran incremento en la incertidumbre propia de las predicciones.

De las redes diseñadas tanto para el ejemplo presentado como para el resto de las situaciones en las que ha sido empleado, se deduce que la Magnitud de la esfera de influencia y el Potencial de violación, son parámetros adecuados de diseño cuando se ponderan adecuadamente y se construye con ellos una buena Función de Utilidad.

Para cada problema analizado, el número de estaciones óptimo de la red se calcula haciendo un estudio de la variación de la Efectividad de Cobertura y del Número de Violaciones respecto al número de estaciones de la red y al valor r_c elegido para

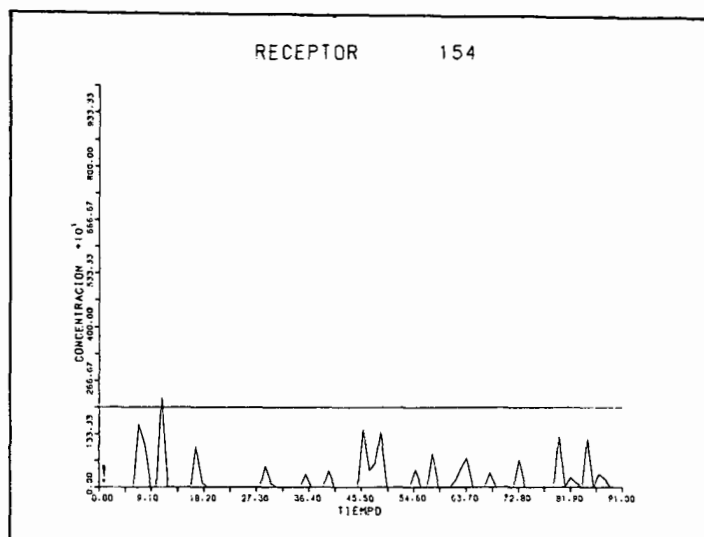


Figura 13.

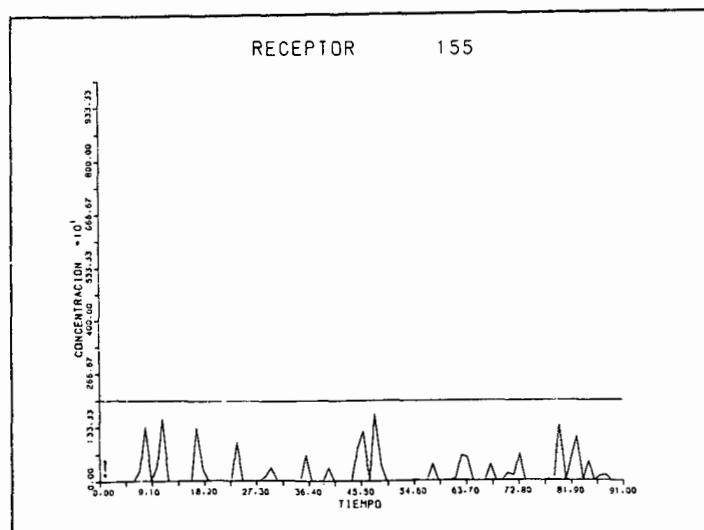


Figura 14.

caracterizar las esferas de influencia.

PROBLEMAS ABIERTOS

En este trabajo se ha desarrollado un método de diseño para redes de detección de la contaminación atmosférica causada por un único contaminante. El paso siguiente sería la ampliación del método a situaciones en las que aparezcan varios contaminantes, sin tener que recurrir al diseño de redes diferentes para cada sustancia y su posterior ensamblado.

REFERENCIAS

1. A.R. Meetham, (Ed), "Atmospheric pollution in Leicester", *Atm. Poll. Res. Techn. Paper No. 1*, London, Her Majesty's Stationery Office, (1945).
2. M. Clifton, D. Kerridge, W. Moulds, J. Pemberton y J.K. Donoghue, "The reliability of air pollution measurements in relation to the siting of instruments", *Int. J. Air Pollut.*, Vol. 2, pp. 188-196, (1959).
3. D.M. Keagy, W.W. Stalker, C.E. Zimmer y R.C. Dickerson, "Sampling station and time requirements for urban air pollution surveys, Part I", *J. Air pollut. Control Assoc.*, Vol. 26, pp. 147-149, (1961).
4. W.W. Stalker, R.C. Dickerson y G.D. Kramer, "Sampling station and time requirements for urban air pollution surveys, Part IV", *J. Air pollut. Control Assoc.*, Vol. 12, pp. 361-375, (1962).
5. WHO, "Air quality in selected urban areas 1973-1974", *Offset Publ.*, No. 24, Geneva, (1976).
6. WHO, "WHO operations manual for sampling and analysis for five major air pollutants", *Offset Publ.*, No. 24, Geneva, (1976).
7. WHO, "Air monitoring programme; design for urban and industrial areas", *Offset Publ.*, No. 23, Geneva, (1977).
8. WHO, "Report of expert meeting on siting criteria", Mainz., Geneva, (1976).
9. WHO, "Report on siting criteria Review Meeting", Geneva, (1978).
10. F.L. Ludwig y J.H.S. Kealoha, "Selecting sites for Carbon Monoxide Monitoring", EPA 450/3-75-077, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, (1975).
11. S. Gustafson y K. Kortanek, "Numerical Optimization Techniques in Air Quality Modelling; Objective Interpolation Formulae for the Spatial Distribution of Pollutant Concentration", EPA 600/4-76-058, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, (1976).
12. E. Hougland, "Air Quality Monitor Network Design by Analytical Techniques III: A case study", Paper presented at the American Society for Quality Control Speciality Meeting on Analytical Assurance in Air Pollution Measurement, New Orleans, Louisiana, (1979).
13. K. Koda y J. Seinfeld, "Air Monitoring Siting by Objective", EPA 600/4-78-036, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, (1978).
14. M.K. Liu y J. Avrin, "Methodology for Designing an Optimum Air Quality Monitoring Network", EPA 600/4-81-002, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, (1981).
15. M.K. Liu, J. Avrin, R.I. Pollack, J.V. Behar y J.L. McElroy, "Methodology for designing air Quality Monitoring Networks: Theoretical Aspects", *Env. Mon. Asses.*, Vol. 6, pp. 1-11, (1986).
16. P.M. Modak and B.N. Lohani, "Optimization of Ambient Air Quality Monitoring Networks: Part II", *Env. Mon. Asses.*, Vol. 5, pp. 21-38, (1985).
17. M. Ezekiel, "Methods of Correlation Analysis", John Wiley and Sons, Inc., London, England, (1941).
18. F.N. David, "Tables of the Ordinates and Probability Integral of the Distribution of the Correlation Coefficient in Small Samples", The Biometrika Office, Cambridge University Press, Cambridge, England, (1938).
19. C. Pérez Caseiras, "Método de diseño de redes de medida de contaminantes atmosféricos en ambientes industriales y urbanos", Proyecto fin de carrera. Escuela Técnica Superior

- de Ingenieros Industriales, Universidad de Zaragoza, (1988).
20. H.E. Cramer, "Industrial Source Complex Dispersion Model. User's Guide", Cramer, H.E. Co.Inc., Salt Lake City, U.T. PB80-133044. EPA 450/4-79-030, (1979).