

## EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA URBANA MEDIANTE EL USO DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

F.J. Moral García <sup>1</sup>, F. López Rodríguez <sup>1</sup>, P. Valiente González <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Expresión Gráfica, Área de Proyectos de Ingeniería; <sup>2</sup>Departamento de Química Analítica

### Abstract

To evaluate and control the pollution in an urban area, diverse graphic representation techniques should be used to map the spatial patterns of the studied pollutants. This is a complex task, which is only feasible if a spatial correlation of the variable of interest is identified. Moreover, the small scale spatial distribution is unusually determined, despite it is fundamental to make a decision from an environmental point of view.

In this work, the link between the geographic information systems and geostatistics is proposed to generate pollution maps in urban areas, in which the spatial distribution patterns have high resolution to provide the variability at small distances.

*Keywords: Ozone, Geostatistics, Geographic Information System, Variogram, Kriging, Map.*

### Resumen

La evaluación y el control de la contaminación en ámbitos urbanos requieren, con carácter previo, el uso de diversas técnicas de representación gráfica con el fin de realizar mapas en los cuales se muestren las variaciones espaciales de los contaminantes estudiados. Esta tarea es compleja, sólo realizable de forma precisa si existe correlación espacial en la variable de interés. Además, en raras ocasiones se determina la distribución espacial a pequeña escala, si bien ésta es fundamental para una correcta toma de decisiones desde el punto de vista medioambiental.

En este trabajo se propone el uso combinado de los sistemas de información geográfica y la geoestadística con el fin de generar mapas de contaminación en ámbitos urbanos, en los que los patrones de distribución espacial tengan unos niveles de resolución capaces de mostrar la variabilidad a distancias reducidas.

*Palabras claves: Ozono, Geoestadística, Sistema de Información Geográfica, Variograma, Krigeado, Mapa.*

## **1. Introducción**

La política de medio ambiente cobra cada vez un protagonismo más importante, tanto en España como en la Unión Europea, debido a la creciente alarma que supone para la seguridad y la salud humana una expansión económica incontrolada y sucesos tan notables como, por ejemplo, el efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono.

La preocupación de la sociedad actual por su naturaleza y la progresiva degradación debida a la contaminación hace que cada vez más los ciudadanos estén demandando un tipo de vida menos agresivo hacia el medio ambiente, consumiendo productos ecológicos, apostando por industrias no contaminantes, etc. Asimismo, los ciudadanos exigen a sus gobernantes actuaciones y medidas que beneficien al entorno donde viven, lo cual propicia una tendencia a una mejor calidad de vida. Además, desde el punto de vista del planeamiento urbano, el conocimiento de los niveles de contaminación de un lugar concreto incide en actuaciones futuras.

Para el caso concreto de la ciudad de Badajoz, se planteó la necesidad de estimar la incidencia de la contaminación atmosférica y su distribución espacial. Para ello, utilizando un conjunto de técnicas con base en un sistema de información geográfica (SIG) y la geoestadística, se analizó la distribución espacial del ozono troposférico, el cual constituye un parámetro indicativo del nivel de contaminación ambiental, y, con posterioridad, se realizaron diversos mapas en los cuales se muestra la representación gráfica continua de dicha variable.

## **2. Materiales y métodos**

En el desarrollo del trabajo, inicialmente se realizó una toma de datos. Las medidas se efectuaron en días laborables, entre los meses de mayo y agosto de 2007, elegidos en función de las condiciones favorables para la generación del ozono y dentro de unas franjas horarias en las cuales los niveles de ozono esperados son los máximos (entre las 16 y las 22 h).

Se seleccionaron 138 localizaciones dentro del casco urbano de la ciudad de Badajoz, en las cuales, mediante el uso de un analizador portátil automático, basado en la absorción de radiación ultravioleta, se midió la concentración de ozono en el aire. Con la información proveniente de cada una de las campañas de muestreo, se elaboró una base de datos en la cual se registraban, para cada día, los valores de ozono medidos y sus coordenadas geográficas. A partir de la misma, mediante el uso de un sistema de información geográfica, en concreto el programa ArcGIS, versión 9.3, y su extensión Geostatistical Analyst, se llevó a cabo un estudio geoestadístico completo y se elaboraron diversos mapas en los cuales se visualiza la distribución espacial de la variable en toda el área experimental, en este caso la ciudad de Badajoz.

Con el fin de realizar las estimaciones oportunas en aquellos lugares donde no se contaba con una medición del ozono, se emplearon algoritmos geoestadísticos. La geoestadística comprende a un conjunto de herramientas y técnicas que sirven para analizar y predecir los

valores de una variable que se muestra distribuida en el espacio, o en el tiempo, de una forma continua.

Todo trabajo geoestadístico tiene que llevarse a cabo en tres etapas (e.g. Isaaks y Srivastava, 1989):

1º) Análisis exploratorio de los datos. En esta fase se estudian los datos muestrales sin tener en cuenta su distribución geográfica. Sería una etapa de aplicación de la estadística. Se comprueba la consistencia de los datos, eliminándose aquellos que sean erróneos, y se identifican las distribuciones de las cuales provienen.

2º) Análisis estructural. Se estudia la continuidad espacial de la variable. En esta etapa se calcula el variograma experimental, o cualquier otra función que nos explique la variabilidad espacial, se ajusta al mismo un variograma teórico y se analiza e interpreta dicho ajuste al modelo paramétrico seleccionado.

3º) Predicciones. Estimaciones de la variable en los puntos no muestrales, considerando la estructura de correlación espacial seleccionada e integrando la información obtenida de forma directa, en los puntos muestrales, así como la conseguida indirectamente en forma de tendencias conocidas u observadas. También se pueden realizar simulaciones, teniendo en cuenta los patrones de continuidad espacial elegidos.

Generalmente, la función que se emplea para modelizar la variabilidad espacial es el variograma. Éste se define como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2$$

(1)

siendo  $g(h)$  el valor de la semivarianza experimental considerando una distancia  $h$ ,  $Z(x_i)$  son los valores medidos de la variable considerada en los puntos  $x_i$ , existiendo datos en  $x_i$  y  $x_i+h$ ;  $N(h)$  es el número de pares de datos separados la distancia  $h$  entre sí.

Los métodos de estimación geoestadística son conocidos como krigeado o krigeaje (kriging en la literatura inglesa, en honor de Danie Krige, quien formuló por primera vez esta metodología en 1951). Las principales características que hacen del krigeado un método de estimación muy superior a los tradicionales, como el inverso ponderado de la distancia, la triangulación, etc., se han descrito en diversas obras (por ejemplo, Goovaerts, 1997; Moral, 2003).

La idea fundamental del krigeado es consecuencia de los conceptos relacionados con la dependencia espacial: los lugares que disten menos entre sí tendrán unos valores de los atributos más semejantes que los correspondientes a los puntos o bloques que estén más separados. En la naturaleza, esto suele cumplirse y, además, las variables naturales generalmente se distribuyen de una forma continua. Los distintos tipos de krigeado se diferencian por el modelo elegido para caracterizar a la tendencia de la función aleatoria (e.g. Goovaerts, 1997). En este trabajo se empleó el krigeado ordinario, por lo que se asumió una fluctuación de los valores medios pero existiendo estacionariedad local (Deutsch y Journel, 1992).

### 3. Resultados y discusión

Durante el análisis exploratorio de los datos se constató como éstos mostraban una tendencia hacia una distribución normal: la media y la mediana fueron muy parecidos y el coeficiente de sesgo prácticamente cero (Tabla 1). Por otra parte, se validó la base de datos ya que se comprobó como no existían valores anormales o errores que pudieran incidir de forma extraordinaria en las estimaciones posteriores.

Finalizado el análisis exploratorio de los datos se pasó al el análisis estructural de los mismos. Para ello se determinaron los variogramas experimentales correspondientes a cada una de las campañas efectuadas y, a continuación, se le ajustaron unos variogramas teóricos, compuesto por un efecto pepita y un esférico (Figura 1). No se consideró anisotropía debido a que no existen en principio causas que la puedan justificar. Además, con el número de puntos muestrales considerados, la influencia de las diferentes direcciones del espacio hubieran supuesto la imposibilidad de definir unos variogramas direccionales aceptables (e.g. Isaaks y Srivastava, 1989).

Tabla 1. Estadísticos correspondientes a las medidas de ozono ambiental obtenidas en las campañas de muestreo realizadas en la ciudad de Badajoz

	May 21-24	June 25-28	July 17-19	August 8-10	August 18-20
Mínimo (ppbv)	25.90	26.20	25.20	35.00	27.00
Máximo (ppbv)	43.20	45.70	40.70	47.00	42.00
Media (ppbv)	33.13	36.21	33.21	39.73	36.41
Mediana (ppbv)	33.10	36.70	33.10	39.00	37.00
Desviación típica (ppbv)	4.25	4.32	3.30	2.57	2.93
Coeficiente de sesgo	0.04	-0.42	-0.04	0.62	-0.67
Coeficiente de kurtosis	2.02	2.62	2.65	3.21	3.39

Para la estimación se aplicó el algoritmo conocido como krigado ordinario (e.g. Moral, 2003). Para su aplicación, en primer lugar se diseñó una retícula, formada por celdas cuadradas de 40 m de lado, la cual se superpuso sobre el área de estudio. Seguidamente, se procedió a estimar el nivel de ozono en cada uno de los vértices de las celdas. A partir de dichos valores estimados se realizó la representación gráfica en donde se muestra la distribución del ozono ambiental en la ciudad de Badajoz (Figura 2).

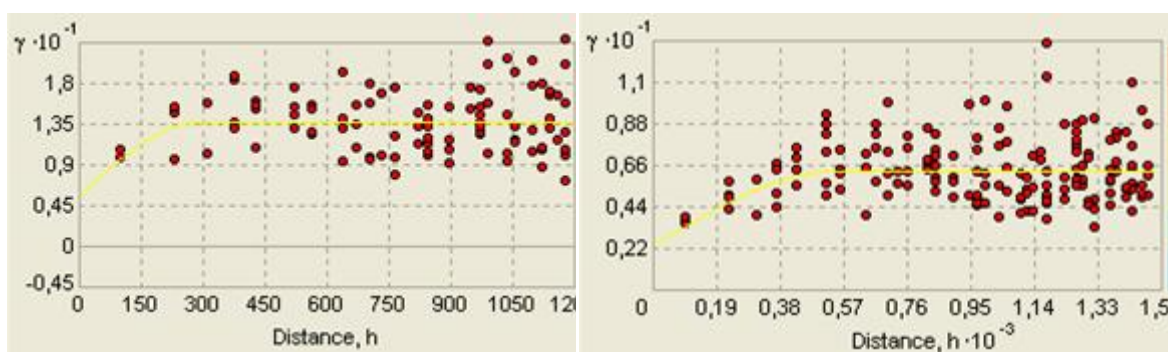


Figura 1. Variogramas experimentales (puntos rojos) correspondientes a las campañas efectuadas los días 25-28 de junio (izquierda) y 8- 10 de agosto de 2007, y variogramas teóricos (líneas amarillas) ajustados en cada caso.

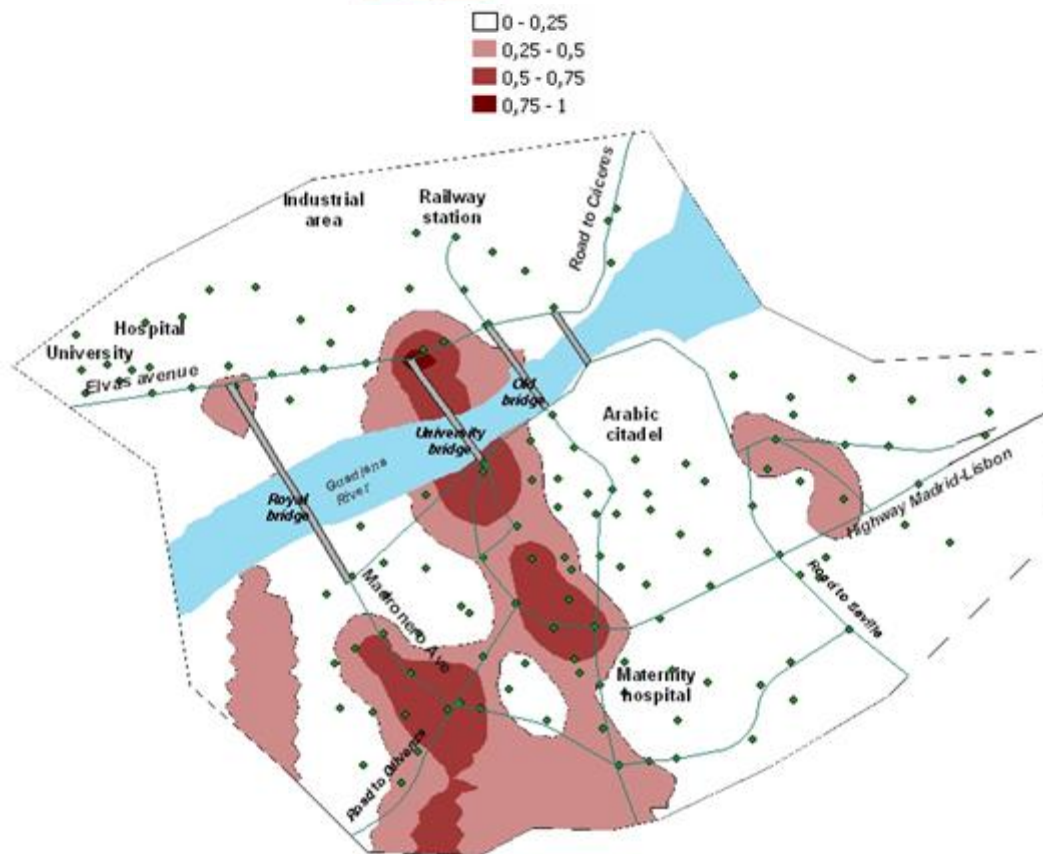
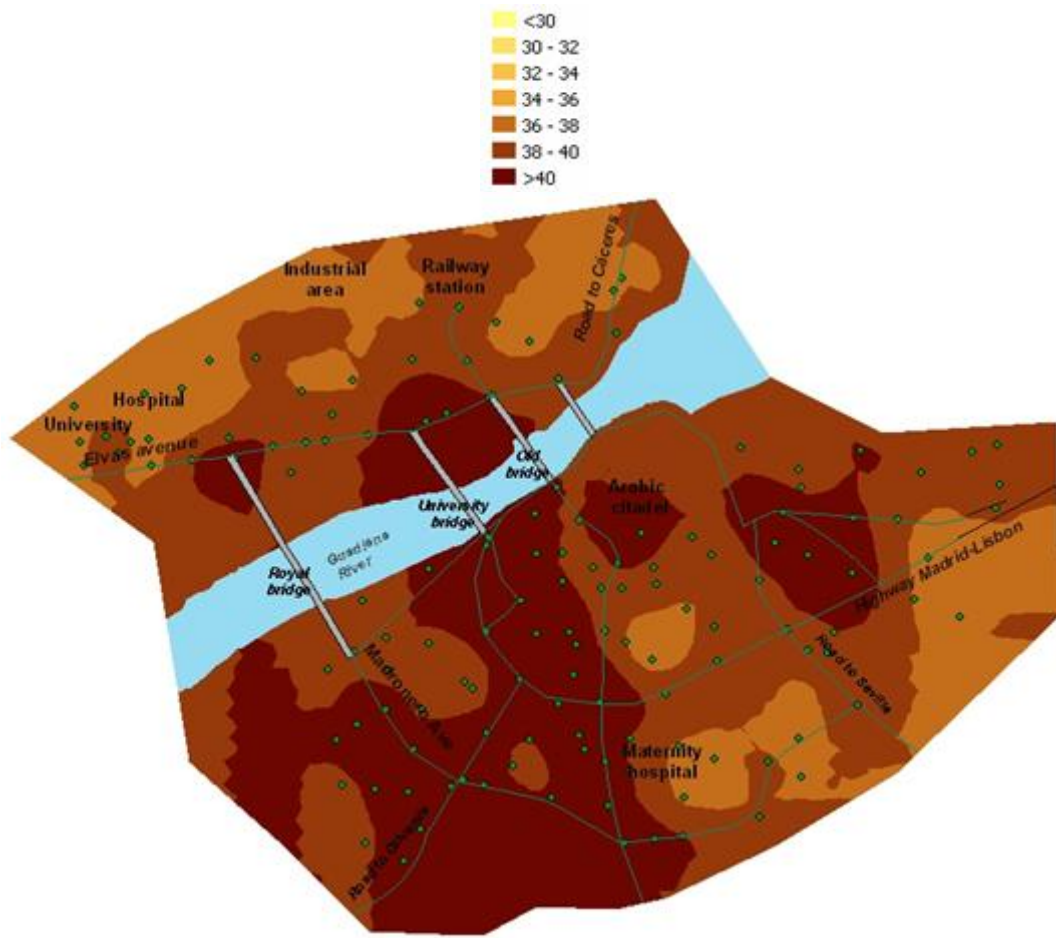


Figura 2. Mapa de predicción (arriba) y de probabilidad (abajo) del ozono ambiental en la ciudad de Badajoz, correspondientes a los días 8- 10 de agosto de 2007.

La escala del mapa de predicción representa ppbV.

Los puntos verdes corresponden a los lugares donde se midieron las concentraciones de ozono.

Una de las muchas ventajas que aporta los métodos de estimación geoestadística sobre otros se encuentra en que, además de la estimación en cada punto, se obtiene adicionalmente un valor puntual de la varianza o de la desviación típica, denominada varianza o desviación típica del krigeado (e.g. Moral, 2003). Cualquiera de ellos informa sobre la precisión de las estimaciones en el área de estudio considerada. Por ello, junto al mapa donde se muestran las predicciones, se puede adjuntar otro donde se informe de la bondad de las mismas. Además, otro tipo de mapas de especial utilidad son los denominados mapas de probabilidad. En ellos se representan las probabilidades de exceder el valor umbral que el usuario establezca. Estos mapas se basan en la normalidad de los datos, con lo cual este requisito es imprescindible para obtenerlos con la suficiente precisión (Goovaerts, 1997). En este trabajo, a modo de ejemplo, se muestran los mapas de probabilidad correspondientes a dos campañas (Figura 2).

#### **4. Conclusiones**

El presente trabajo muestra como, mediante el empleo de técnicas geoestadísticas y de un sistema de información geográfica, se puede cumplir el doble objetivo de caracterizar la variabilidad espacial del ozono ambiental y cuantificar sus niveles en el área de estudio.

Adicionalmente, se puede analizar la evolución temporal de este contaminante atmosférico, ya que se llevaron a cabo diversas campañas de muestreo para las que se generaron unos mapas de distribución del ozono. Con ello es factible el conocimiento de las zonas urbanas más propensas a soportar unos niveles de contaminación no solo más elevados sino también más continuos en el tiempo.

Además de los mapas predictivos, con el uso de los métodos geoestadísticos se pueden generar mapas de probabilidad, lo cuales se basan en la normalidad de los datos. Este tipo de información es fundamental para una correcta gestión ambiental, en especial en los ámbitos urbanos.

## Referencias

[1] Deutsch, C.V., y Journel, A.G. Gslib: Geostatistical Software Library and user's guide, Oxford Univ. Press, New York. 1992

[2] Goovaerts, P. Geostatistics for Natural Resources Evaluation, Oxford Univ. Press, New York. 1997.

[3] Isaaks E.H., y Srivastava, R.M. An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford Univ. Press, New York. 1989.

[4] Moral, F.J. La Representación Gráfica de las Variables Regionalizadas. Geoestadística lineal. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Extremadura, Cáceres. 2003.