

APLICACIÓN DE UN ANÁLISIS *CLUSTER* PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS

JESÚS M^a VÍAS MARTÍNEZ¹, MARÍA JESÚS PERLES ROSELLÓ² y BARTOLOMÉ ANDREO NAVARRO³

¹ y ² Dpto. Geografía, ³ Dpto. Ecología y Geología
Universidad de Málaga, Campus de Teatinos s/n, 29071, Málaga

¹ jmvias@uma.es, ² mjperles@uma.es, ³ andreo@uma.es

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una puesta a prueba de la capacidad del análisis *cluster* para realizar una cartografía de vulnerabilidad de la contaminación del acuífero carbonatado de Torremolinos (Sierra de Mijas, Málaga). Para este objetivo se comparan los resultados obtenidos a través del análisis *cluster* con otros procedentes de la aplicación de distintos métodos para cartografía de vulnerabilidad (DRASTIC, GOD y AVI). La cartografía resultante del análisis *cluster* muestra una distribución espacial de la vulnerabilidad del acuífero similar a la ofrecida por otros métodos, e incluso se observa en algunas zonas del acuífero una mayor capacidad de discriminación espacial. El grado de vulnerabilidad, de las distintas unidades espaciales homogéneas obtenidas a partir del *cluster*, se ha establecido mediante un análisis de la distancia al punto ideal.

Palabras clave: vulnerabilidad de acuíferos, análisis *cluster*, análisis de distancia al punto ideal.

ABSTRACT

In this paper, has been made a cluster analysis to evaluate vulnerability of the Torremolinos carbonate aquifer (Sierra de Mijas, Málaga). This objective has been validated comparing vulnerability maps by cluster analysis with vulnerability maps from other methods (DRASTIC, GOD and AVI). The final map shows a similar distribution of the vulnerability respect to the other methods. Furthermore, the final map discriminate vulnerability zones better than other methods. The vulnerability degree has been established by ideal point analysis.

Keywords: Aquifers' vulnerability, cluster analysis, ideal point analysis.

1. Introducción

El riesgo de contaminación de las aguas subterráneas ha sido objeto de reciente interés dentro del ámbito del estudio de los riesgos. La estimación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas debe tener en cuenta diversos elementos, como son el peligro potencial de contaminación, la vulnerabilidad del medio físico del acuífero frente a este proceso y las consecuencias sociales en el caso de producirse un evento contaminante.

El presente trabajo se centra en la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos frente a la contaminación. El concepto de vulnerabilidad utilizado es el definido por Daly *et al.* (2002) como vulnerabilidad intrínseca. La susceptibilidad del agua subterránea a ser contaminada en función de las características físicas del acuífero e independientemente del tipo de contaminante.

En los últimos años han proliferado los intentos de consolidación de métodos para la evaluación de la vulnerabilidad. La mayoría de las propuestas se orientan a la elaboración de un índice de vulnerabilidad del acuífero a través de métodos multicriterio, cuyo fin es obtener modelos extrapolables a distintas situaciones medioambientales. Estas metodologías suelen presentar, no obstante, una serie de dificultades y sesgos estructurales.

Por un lado, algunos problemas genéricos de los métodos de estimación de la vulnerabilidad radican en la dificultad para el chequeo y modelización del proceso de contaminación en un sistema complejo como es el acuífero, lo que obstaculiza, en gran parte, la posibilidad de elaboración y calibración de los métodos. En general, resulta difícil comprobar la validez de los resultados obtenidos por cada método mediante su comparación con los valores de vulnerabilidad de otras aproximaciones (Corniello *et al.*, 1997) o de forma individual mediante técnicas de chequeo. Este hecho justifica que la elección de criterios de ponderación, de asignación de rangos y delimitación de clases en los métodos multicriterio sea muy variable según la experiencia y juicio de quienes los aplican. En ocasiones, los sistemas de puntuaciones, diseñados por estos métodos, son laxos y están abiertos a la selección de distintas opciones por parte del investigador en el momento de la aplicación, lo que genera una nueva fuente de variabilidad en los resultados finales (Perles y Vías, 2001). Vías (2000), tras la aplicación y análisis de distintos métodos consensuados de evaluación de la vulnerabilidad, constata, junto a estas dificultades, el problema del uso frecuente de variables redundantes, lo que repercute en una reducción de la variabilidad potencial de los resultados y en la obtención de mapas muy homogéneos.

Ante esta diversidad de juicios, Daly *et al.* (2002) proponen la necesidad de establecer criterios de consenso para el establecimiento de la cuantificación y categorización de las variables, para su ponderación y para la obtención de un total de 5 clases finales de vulnerabilidad que sean válidas bajo distintas condiciones ambientales. En este contexto resulta de especial interés establecer una estrategia alternativa de evaluación de la vulnerabilidad mediante un procedimiento poco dirigido (análisis *cluster*), que introduzca el menor número de modificaciones a priori en el tratamiento de las variables (por ejemplo puntuaciones, límites de clase) y que no altere su distribución estadística original, facilitando así una interpretación más directa de los resultados

Vías Martínez, J. M., Perles Roselló, M. J. y Andreo Navarro, B. (2003): "Aplicación de un análisis cluster para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos", *GeoFocus (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 199-215. ISSN: 1578-5157

finales. En este sentido, Perles (1995) demuestra la operatividad de un procedimiento similar para la elaboración de unidades homogéneas frente al riesgo de erosión.

En el presente trabajo, se pone a prueba este tipo de método, aplicado a la evaluación de la vulnerabilidad en el acuífero carbonatado de Torremolinos. El acuífero de Torremolinos está sometido a una fuerte presión antrópica debido a su cercanía a la Costa del Sol, una zona con una fuerte demanda de recursos hídricos y suelo urbano.

2. Características del área de estudio

El acuífero de Torremolinos ocupa una extensión de 56 km² entre las localidades de Alhaurín de la Torre y Benalmádena, al Oeste de la ciudad de Málaga ([figura 1](#)). La altitud varía entre los 920 m de su cumbre más elevada, Gorreta de Valcázar, y los 80 m s.n.m. al NE. La altitud desciende progresivamente de Oeste a Este, al igual que la pendiente que supera ampliamente el 50% en el sector occidental y disminuye hasta un 15% en la parte oriental y septentrional.

El clima se caracteriza por una temperatura media anual de 18° y una pluviometría media anual de 600 mm. Las precipitaciones presentan una fuerte irregularidad, anual e interanual, propia del clima mediterráneo, así se observan años con 1200 mm de precipitación (año hidrológico 1996/1997) y años con precipitaciones inferiores a 230 mm (año hidrológico 1994/1995).

Desde el punto de vista geológico se pueden diferenciar dos grandes conjuntos estructurales: el complejo Alpujarride y la cuenca neógeno-cuaternaria del Guadalhorce. La estratigrafía del complejo Alpujarride, en el área de estudio, presenta dos formaciones: metapelitas en la parte inferior y mármoles en la superior. La formación metapelítica está formada, básicamente, por gneises de edad paleozoica que llegan a alcanzar una potencia de 400 m. El conjunto superior está formado por mármoles de edad triásica y se divide en dos tramos: en la base, mármoles blancos dolomíticos con una potencia de 300 m, muy diaclasados y con una elevada disgregación intergranular y, hacia techo, mármoles azules calizos cuya potencia también es de 300 m. El otro gran conjunto estructural está formado por materiales de edad plio-cuaternaria con una potencia que supera los 500 m en la cuenca del Guadalhorce. Se trata de margas pliocenas sobre las que afloran en contacto discordante conglomerados y brechas.

Los afloramientos de mármoles constituyen los materiales acuíferos del sistema de Torremolinos que ocupan una extensión de 45 km². Esta unidad queda limitada por fallas normales al Este y Oeste, una falla de desgarre al Norte y por el núcleo metapelítico de un anticlinal al Sur ([figura 2](#)).

Los mármoles tienen una elevada transmisividad y conductividad hidráulica del orden de 10³ m²/día y 10¹ m/día, respectivamente, de acuerdo con los datos disponibles de ensayos de bombeo (Andreo, 1997). Aunque el orden de magnitud es el mismo para el conjunto de mármoles triásicos, los valores de transmisividad y conductividad hidráulica son más elevados en los mármoles dolomíticos (generalmente más fisurados) que en los mármoles calizos. Así, como

Vías Martínez, J. M., Perles Roselló, M. J. y Andreo Navarro, B. (2003): "Aplicación de un análisis cluster para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos", *GeoFocus (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 199-215. ISSN: 1578-5157

valores representativos de la conductividad hidráulica se han estimado 30 m/día para los mármoles dolomíticos y 10 m/día para los mármoles calizos.

El nivel piezométrico se encuentra a cota más elevada en el Suroeste y desciende progresivamente hasta el sector nororiental. Las variaciones interanuales en las precipitaciones quedan reflejadas en la piezometría, de modo que se han registrado variaciones de hasta 40 m entre un periodo seco (1994/95) y un periodo húmedo (1996/97).

Por lo que respecta a la capa edáfica, hay cuatro tipos de suelos (ICONA, 1991). Sobre los mármoles se desarrollan leptosoles caracterizados por una textura areno-arcillosa, una gran discontinuidad espacial y una potencia máxima de 30 cm. En el piedemonte y terrenos pliocuaternarios hay antrosoles, regosoles y calcisoles, los cuales tienen una potencia máxima de 70 cm y una textura arenosa, excepto los calcisoles de textura arcillosa.

En función de los usos y aprovechamientos del suelo se pueden diferenciar dos zonas. Por un lado, un sector que comprende las áreas de pendiente suave del límite Norte y Este del acuífero donde afloran los materiales pliocuaternarios, que ocupan, aproximadamente, el 20 % de la superficie del sistema. En esta zona hay una intensa actividad urbanística que propicia la presencia de carreteras, gasolineras, canteras y vertederos de residuos sólidos urbanos, que ponen en peligro la calidad de las aguas subterráneas. En menor medida, la actividad agrícola también está presente, aunque la mayoría de las parcelas no tienen un fuerte impacto al situarse sobre materiales de baja permeabilidad y no hacer uso de pesticidas y herbicidas. Por otro lado, el 80 % de la superficie del sistema es un espacio donde predomina el matorral mediterráneo y el pinar de repoblación.

El acuífero tiene unas reservas hídricas estimadas en 75 Hm³ (Andreo, 1997). Estas reservas están siendo explotadas de forma intensiva desde el año 1989, último año en que los manantiales de Torremolinos manaron agua. Este hecho se debe a que el volumen de agua que se extrae, desde los numerosos sondeos situados en los bordes del acuífero ([figura 2](#)), es muy superior a las entradas de agua en el sistema. Los recursos equivalen a 11'4 Hm³ anuales, mientras que el abastecimiento de agua supone un volumen de 20'3 Hm³. Por tanto, se está sobreexplotando el acuífero.

La sobreexplotación del acuífero parece no tener fin a corto plazo, en la medida que el ritmo de crecimiento poblacional de las localidades que se abastecen del mismo continúa siendo similar al de la década de los noventa cifrado en el 4'1%. El incremento poblacional y el desarrollo turístico de la Costa del Sol (ámbito donde se inserta el acuífero) ejerce una fuerte presión sobre los recursos hídricos maximizada en el periodo estival.

3. Metodología

Con el fin de comprobar la efectividad de la propuesta estadística adoptada en la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca, se han abordado dos tareas básicas: a) elaboración de mapas de áreas homogéneas frente a la vulnerabilidad mediante la aplicación de un análisis *cluster* y b) clasificación de los grupos obtenidos en una escala de vulnerabilidad. Por último, para la valoración de los resultados se ha procedido a la comparación de los mapas de vulnerabilidad obtenidos

Vías Martínez, J. M., Perles Roselló, M. J. y Andreo Navarro, B. (2003): "Aplicación de un análisis cluster para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos", *GeoFocus (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 199-215. ISSN: 1578-5157

mediante este procedimiento con otros de la misma zona realizados mediante métodos de estimación de la vulnerabilidad consensuados como DRASTIC (Aller *et al.*, 1978), GOD (Foster, 1987) y AVI (Stempvoort *et al.*, 1993).

3.1. Elaboración de unidades homogéneas de vulnerabilidad

3.1.1. Selección de las variables del análisis *cluster*

En la selección de las variables se han tenido en cuenta las variables más comúnmente utilizadas por los distintos métodos en función de su clara relación con la vulnerabilidad, procurando además que no aporten información reiterativa:

- a) espesor de zona no saturada (zns)
- b) espesor de suelo (s)
- c) pendiente del terreno (p)
- d) permeabilidad de los materiales de la zona no saturada (k)

Estas cuatro variables se caracterizan por ser de naturaleza cuantitativa, lo que permite utilizar los métodos convencionales de análisis *cluster*, y por no estar correlacionadas entre sí, de manera que se elimina el sesgo debido a la redundancia que pudiera derivar de ellas.

Las unidades espaciales de partida para la generación de grupos se han obtenido mediante superposición cartográfica. Para ello se han combinado las variables con el comando *intersect* de ARCINFO v.8.0.2, y a cada registro resultante de la superposición se le ha asignado un identificador único para su posterior tratamiento en el programa estadístico SPSS v.11.0.

3.1.2. Selección de las variables del análisis *cluster*

Los criterios de ponderación utilizados son genéricos y se basan en la clasificación elaborada por Vrba y Civita (1994), según la importancia de cada variable en la evaluación de la vulnerabilidad (primarias y secundarias), mientras que los coeficientes de ponderación se obtienen por el procedimiento de comparación binaria de Saaty (1977) ([tabla 1](#)).

3.1.3. Aplicación del análisis *cluster*

El análisis *cluster* empleado ha sido del tipo no jerárquico, especialmente indicado para grandes tablas de datos. Los métodos no jerárquicos tienen por objeto formar un número de clases homogéneas excluyentes, con máxima divergencia entre ellas. Las clases resultantes constituyen una única partición, distinta para cada solución sin estar organizadas jerárquicamente ni relacionadas entre sí. Por este motivo es necesario definir, previamente al análisis, el número de

grupos que se desea obtener, lo que normalmente supone hacer distintas pruebas para decidir la solución adecuada. En este trabajo se han elaborado soluciones desde cinco grupos hasta diez.

El método de análisis seleccionado ha sido el de *k-medias*. El algoritmo de *k-medias* define un centro de gravedad de cada aglomerado en función de las medias de las observaciones de cada variable en los individuos del grupo, haciendo mínima la suma de desviaciones cuadráticas de las distintas observaciones respecto al centro, y máxima la suma de desviaciones cuadráticas entre los centros de gravedad de los distintos grupos. Se trata de un algoritmo secuencial que parte de medias arbitrarias (o definidas por el investigador) y va contrastando la varianza residual, a la vez, que reasigna individuos a cada grupo hasta que no sea posible mejorar el criterio. Las variables han sido normalizadas para eliminar el sesgo asociado a la magnitud en que se expresan.

3.2. Elaboración de clases de vulnerabilidad de cada grupo resultante mediante el análisis de la distancia al punto ideal

Esta fase ha permitido dirimir el significado de cada grupo o área de características homogéneas frente a la vulnerabilidad y ajustarlo a una escala de grados de vulnerabilidad. El criterio adoptado para establecer el grado de vulnerabilidad ha sido comparar la distancia de cada grupo o área homogénea respecto a un punto ideal de vulnerabilidad. Este punto ideal actúa de referencia para todas las alternativas (Barredo, 1996). En este trabajo, el punto ideal hace referencia a la situación más favorable frente a la vulnerabilidad y, por tanto, expresa la situación de menor vulnerabilidad del acuífero.

$$\text{Distancia al punto ideal (pi)} = \sqrt{\sum_1^n (x_i - pi)^2}$$

Siendo n = número de variables, x_i = valor de cada variable, pi = el punto ideal

Para el cálculo de estas distancias se han establecido: a) los puntos ideales y anti-ideales para cada variable en función de criterios bibliográficos, b) se ha calculado la distancia euclídea que separa el valor medio de cada variable en cada grupo respecto al punto ideal. Este valor será considerado un indicativo de vulnerabilidad del grupo.

Como referentes de punto ideal para el cálculo de las distancias, se aplican dos puntos: uno referido exclusivamente a la zona de estudio y otro válido para un ámbito más general. En este último caso, se ha estimado la vulnerabilidad de cada grupo respecto al punto ideal de vulnerabilidad en una escala que sirva de comparación para un ámbito suprarregional como el Mediterráneo. En este sentido, se ha estimado el valor que indica ese punto ideal y no-ideal de vulnerabilidad para cada variable a esta escala y se ha calculado la distancia de los valores medios para cada variable en cada grupo, respecto a ese punto ideal.

Para obtener una zonificación expresiva a una escala más detallada se ha relativizado la gradación de la vulnerabilidad en el acuífero analizado. Los puntos ideales y no-ideales se han

establecido en función de los valores de mayor y menor vulnerabilidad presentes en la zona. Para la representación espacial, el recorrido de los valores de distancia al punto ideal obtenidos para cada grupo del análisis *cluster* se ha dividido en cinco intervalos regulares ([tabla 2](#)), correspondientes a cinco grados de vulnerabilidad relativas al área de estudio.

4. Resultados y discusión

De acuerdo con los objetivos propuestos, los resultados obtenidos se pueden agrupar en dos tipos: uno referente a las soluciones del análisis de aglomerados y sus potencialidades para la zonificación de la vulnerabilidad y otro dedicado al análisis de la gradación en clases de vulnerabilidad obtenida en función de la distancia al punto ideal. Como punto de referencia en el análisis de los resultados se han utilizado los mapas obtenidos por Vías *et al.* (2001) mediante la aplicación de los métodos DRATIC, GOD y AVI al acuífero de Torremolinos ([figuras 3, 4 y 5](#) respectivamente). En estos mapas se observa una menor vulnerabilidad en los bordes septentrional y oriental del acuífero, donde predominan los materiales pliocuaternarios, de muy baja permeabilidad, mientras que los mármoles triásicos que constituyen el resto del área de estudio presentan una mayor vulnerabilidad.

4.1. Soluciones del análisis de aglomerados

Se han obtenido seis soluciones, a partir del análisis de aglomerados, diferenciadas en función del número de grupos preestablecidos; concretamente, se han calculado soluciones para 5, 6, 7, 8, 9 y 10 grupos ([figura 6](#)). Este número de grupos está elegido en razón del nivel de detalle que son capaces de mostrar sin reiterar información. Así, mapas con menos de cinco grupos muestran una diferenciación de la vulnerabilidad muy simple, mientras que a partir de 10 grupos la información de cada aglomerado comienza a ser reiterativa y la excesiva segmentación no expresa variaciones de la vulnerabilidad.

Los resultados obtenidos indican un mismo patrón espacial, coherente con las condiciones de vulnerabilidad de la zona. Las características comunes a todos los mapas son la presencia de áreas de baja permeabilidad coincidiendo con los afloramientos de materiales pliocuaternarios, en los bordes del sistema y de áreas con suelo desarrollado sobre mármoles. La diferenciación entre unos mapas y otros vienen dadas, principalmente, por el mayor o menor espesor de la zona no saturada en el afloramiento de los mármoles triásicos. Así, conforme se incrementa el número de aglomerados aumenta la discriminación de áreas con distinto grado de vulnerabilidad, en función, esencialmente, del espesor de la zona no saturada.

4.2. Vulnerabilidad de cada grupo en función de la distancia al punto ideal

Los resultados obtenidos en el ámbito suprarregional muestran, para el conjunto de los grupos, unos valores de distancia al punto ideal, que pueden ser considerados indicativos de una

vulnerabilidad media. Ello es coherente con la valoración del acuífero por distintos métodos, pero, a una escala pequeña, la diferenciación de clases en el interior del acuífero es prácticamente imposible, dada la amplia variabilidad de situaciones de vulnerabilidad probables. Esta operación muestra que a una escala tan pequeña las diferencias locales de vulnerabilidad son despreciables. A su vez, hay que tener en cuenta que los puntos ideales son teóricos y su manifestación al unísono es raramente observable.

Los resultados obtenidos mediante el segundo de los procedimientos utilizados, es decir, a escala del acuífero, muestran una buena capacidad de discriminación espacial ([figura 7](#)). La distribución espacial de las clases de vulnerabilidad refleja dos patrones. El primero se corresponde con las soluciones para 5, 6 y 7 grupos en el análisis *cluster*. En él se diferencian dos grandes zonas con distinta vulnerabilidad, en función del espesor de la zona no saturada, allí donde afloran los mármoles y no hay presencia de cubierta edáfica. El segundo patrón está relacionado con los mapas derivados de las soluciones en 8, 9 y 10 grupos que discriminan, en el afloramiento de mármoles citado anteriormente, tres zonas con distinta vulnerabilidad. El hecho de haber obtenido las clases finales referidas únicamente al marco del acuífero imposibilita categorizar de forma absoluta y extrapolable la vulnerabilidad de cada una de estas clases, y sólo es viable nombrar cada una de ellas en términos relativos.

Entre los mapas resultantes destaca como más expresivo el que deriva de la solución en 8 grupos ([figura 7-IV](#)). Con este número de aglomerados se diferencian de forma detallada clases de vulnerabilidad suficientemente significativas dentro del conjunto del afloramiento de mármoles, mientras que, al aumentar el número de aglomerados apenas mejoran los resultados.

En este mapa se observan dos zonas claramente diferenciadas que responden al mismo patrón espacial mencionado anteriormente. Una zona asociada a los mármoles triásicos donde la vulnerabilidad varía entre las clases "C" y "A" y, otra, asociada con los materiales pliocuaternarios con una vulnerabilidad de clase "E". La diferencia entre un conjunto y otro se debe a variaciones en la permeabilidad.

En el sector correspondiente al afloramiento de mármoles se pueden diferenciar áreas en función de la profundidad del nivel piezométrico. Así, la mayor vulnerabilidad en este sector, clase "A", se corresponde con las áreas, donde el espesor de la zona no saturada es inferior a 300 m, y la clase "C" con aquellas otras en que dicho espesor supera los 450 m aproximadamente. Entre ambos sectores aparece una zona intermedia de transición con una vulnerabilidad "B".

Como puede observarse, el mapa resultante del análisis *cluster* muestra las variaciones en la vulnerabilidad, de forma análoga a los métodos DRASTIC, GOD y AVI. El mapa de vulnerabilidad derivado del análisis *cluster* presenta una menor vulnerabilidad en los bordes septentrional y oriental del sistema, y valores más altos en el resto del acuífero. La aportación del análisis *cluster* es la capacidad de discriminar áreas con distinta vulnerabilidad en zonas donde los métodos DRASTIC, GOD y AVI muestran una gran homogeneidad, es decir, implica un mayor nivel de detalle en la gradación de la vulnerabilidad.

5. Conclusiones

En general, la utilización del análisis *cluster* para la delimitación de áreas de comportamiento homogéneo frente a la contaminación de aguas subterráneas se ha mostrado como positiva. A través de la comparación de la zonificación obtenida para soluciones con distinto número de grupos, ese tipo de análisis muestra un patrón espacial subyacente, que se mantiene constante, a pesar de que el método de clasificación utilizado no es jerárquico, hecho que contribuye a considerar la solidez de la delimitación proporcionada por la clasificación no dirigida. Mediante esta estrategia se reduce muy sustancialmente el número de sesgos implícitos en la elección de rangos y puntuaciones de los distintos parámetros que evalúan la vulnerabilidad.

Respecto a la delimitación de la clase de vulnerabilidad, en un contexto suprarregional, la estrategia se muestra útil para la comparación de las clases de vulnerabilidad entre distintos acuíferos, aunque no para la gradación interna de la vulnerabilidad dentro de un mismo sistema.

En una escala de vulnerabilidad local, sin embargo, mediante la estrategia utilizada, la cartografía se beneficia de la buena discriminación espacial proporcionada por el análisis *cluster* y, a la vez, el procedimiento posibilita una gradación detallada de la vulnerabilidad en el área de estudio.

La estrategia idónea, no obstante, debería basarse en una buena discriminación espacial y una valoración absoluta, no relativa, de las clases de vulnerabilidad. Esto sería posible a través de la utilización de unos puntos ideales para cada variable que, estableciéndose de forma genérica y consensuada, sirvieran de referente para el conjunto de las aplicaciones a distintas escalas, garantizando así la homogeneidad de criterios de valoración. En esta primera aplicación, los puntos ideales seleccionados para cada variable representan situaciones ideales teóricas respecto a la vulnerabilidad, aunque difícilmente coincidentes en la realidad; por otra parte, existen niveles en el recorrido de las variables que, sin llegar a reflejar una situación ideal óptima respecto a la vulnerabilidad, marcan una inflexión a partir de la cual las mejoras en la vulnerabilidad son despreciables. La selección de puntos ideales (y anti-ideales) para las distintas variables que reflejen situaciones de vulnerabilidad menos utópicas que los utilizados en esta aplicación acortaría el recorrido de las clases de vulnerabilidad posibles, y permitiría una mejor discriminación de clases. Así, por ejemplo, en el caso de la pendiente, la elección de 0° de inclinación como punto anti-ideal podría aumentarse hasta el valor mínimo de pendiente en el área de estudio, con lo que la cartografía final tendría una mayor capacidad de discriminación.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco de los grupos de investigación RNM 139 y 308 de la Junta de Andalucía y es una aportación a los proyectos de investigación PB98-1397 y REN2002-01797/HID de la DGI.

Vías Martínez, J. M., Perles Roselló, M. J. y Andreo Navarro, B. (2003): "Aplicación de un análisis cluster para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 199-215. ISSN: 1578-5157

Referencias bibliográficas

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. H. y Hackett, G. (1987): *Drastic: A standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. Oklahoma, US Environmental Protection Agency.
- Andreo, B. (1997): *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las sierras Blanca y Mijas, Cordillera Bética, Sur de España*. Málaga, Servicios de Publicaciones de la Universidad.
- Barredo, J. (1996): *Sistema de Información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, RA-MA.
- Corniello, A., Ducci, D. y Napolitano, P. (1997): "Comparison between parametric methods to evaluate aquifer pollution vulnerability using a GIS: An example in the 'Piana Campana', Southern Italy", en Marinos, P., Koukis, G., Tsiambos, G. y Stournaras, G. (Eds.): *Proceedings International Symposium on engineering geology and the environment*. Rotterdam, Balkema, pp. 1721-1726.
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu Ch. y Zwhalen, F. (2002): "Main concepts of the 'European Approach' for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping", *Hydrogeology Journal*, 10, 2, pp 340-345.
- Foster, S. (1987): "Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy", en W. Van Duijvenbooden y H. G. Van Waegeningh. (Eds.): *Proceedings and information n° 38 of the International conference on vulnerability of soil and groundwater to pollutants*. The Hague. TNO Committee on hydrological research, pp. 69-86.
- ICONA (1993): *Memoria y mapa de suelos de Andalucía*. Proyecto lucdeme, Hojas 1066 (Coín), 1066 (Málaga) y 1067 (Torremolinos) a escala 1/100.000, Universidad de Granada.
- Perles, M. J. (1995): "Cartografía de paisajes erosivos a partir del uso de un SIG y de técnicas estadísticas multivariantes", *XIV Congreso Nacional de Geografía*, Salamanca, AGE, pp. 436-439.
- Perles, M. J. y Vías, J. M. (2001): "Problemas asociados a la cartografía de riesgo como instrumento para la ordenación", *Actas del XVII Congreso de Geógrafos Españoles*, Oviedo, AGE, pp 194-198.
- Saaty, T.L. (1977): "A scaling method for priorities in hierarchical structures", *Journal of Mathematical Psychology*, 15, pp. 234-281.
- Van Stempvoort, D., Ewert, I. y Wassenaar, L. (1993): "Aquifer vulnerability index (avi): A gis compatible method for groundwater vulnerability mapping", *Canadian water resources journal*, 18, pp. 25-37.
- Vías, J. M. (2000): *Evaluación y cartografía de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero carbonatado de Torremolinos (Málaga)*. Memoria de Licenciatura, Inédita, Málaga, 160 p.
- Vías, J. M., Perles, M. J., Andreo, B. y Carrasco, F. (2001): "Application of several methods of contamination vulnerability mapping in a carbonate aquifer from south Spain", en Ribiero (Ed.): *3rd International Conference on Future Groundwater Resources at Risk*. Lisboa, pp. 113-124.
- Vrba, J. y Civita, M. (1994): "Assessment of groundwater vulnerability", en J. Vrba y A. Zaporozec, (Eds.): *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*, International contributions to hydrogeology, Vol 16, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp 31-48.

TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de ponderación asignados a cada variable.

Variable	Coefficiente de ponderación
Espesor de la zona no saturada	0.3
Espesor del suelo	0.3
Pendiente	0.1
Permeabilidad de la litología	0.3

Fte. Elaboración propia

Tabla 2. Clases de vulnerabilidad relativas al área de estudio.

Intervalos de distancias al punto ideal	Clase	Vulnerabilidad
(1'6 – 2)	A	Mayor
(1'2 – 1'6)	B	.
(0'8 – 1'2)	C	.
(0'4 – 0'8)	D	.
≤ 0'4	E	Menor

Fte. Elaboración propia.

Vías Martínez, J. M., Perles Roselló, M. J. y Andreo Navarro, B. (2003): "Aplicación de un análisis cluster para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos", *GeoFocus (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 199-215. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

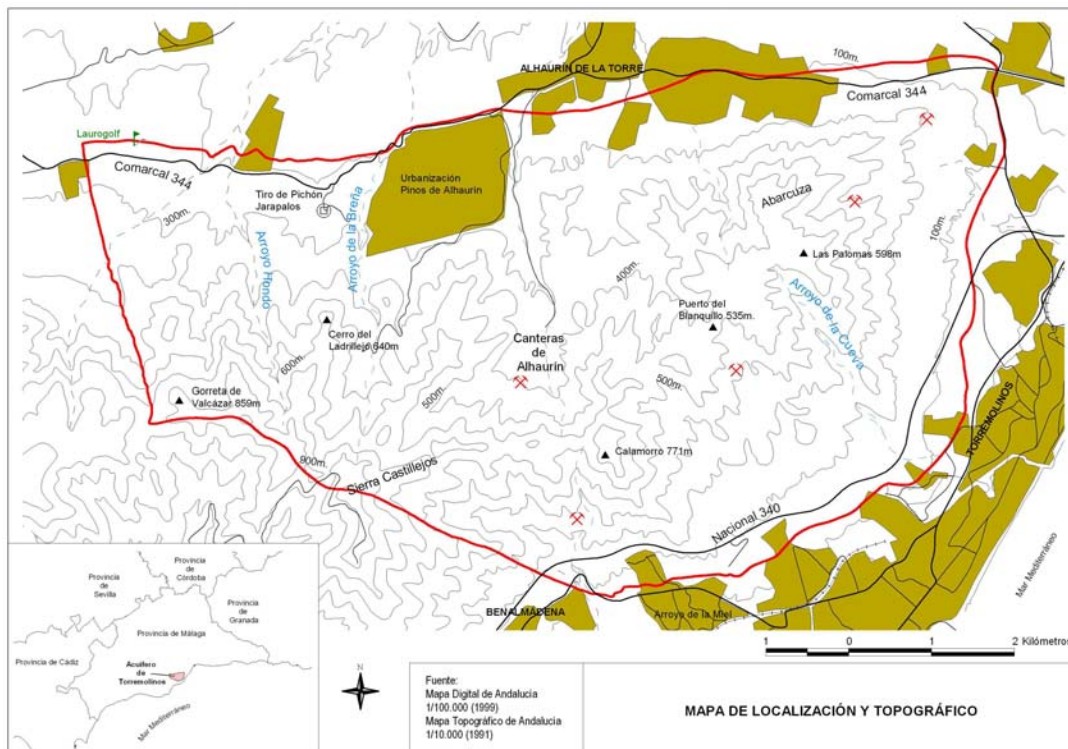


Figura 1. Localización del acuífero de Torremolinos

Vías Martínez, J. M., Perles Roselló, M. J. y Andreo Navarro, B. (2003): "Aplicación de un análisis cluster para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 199-215. ISSN: 1578-5157

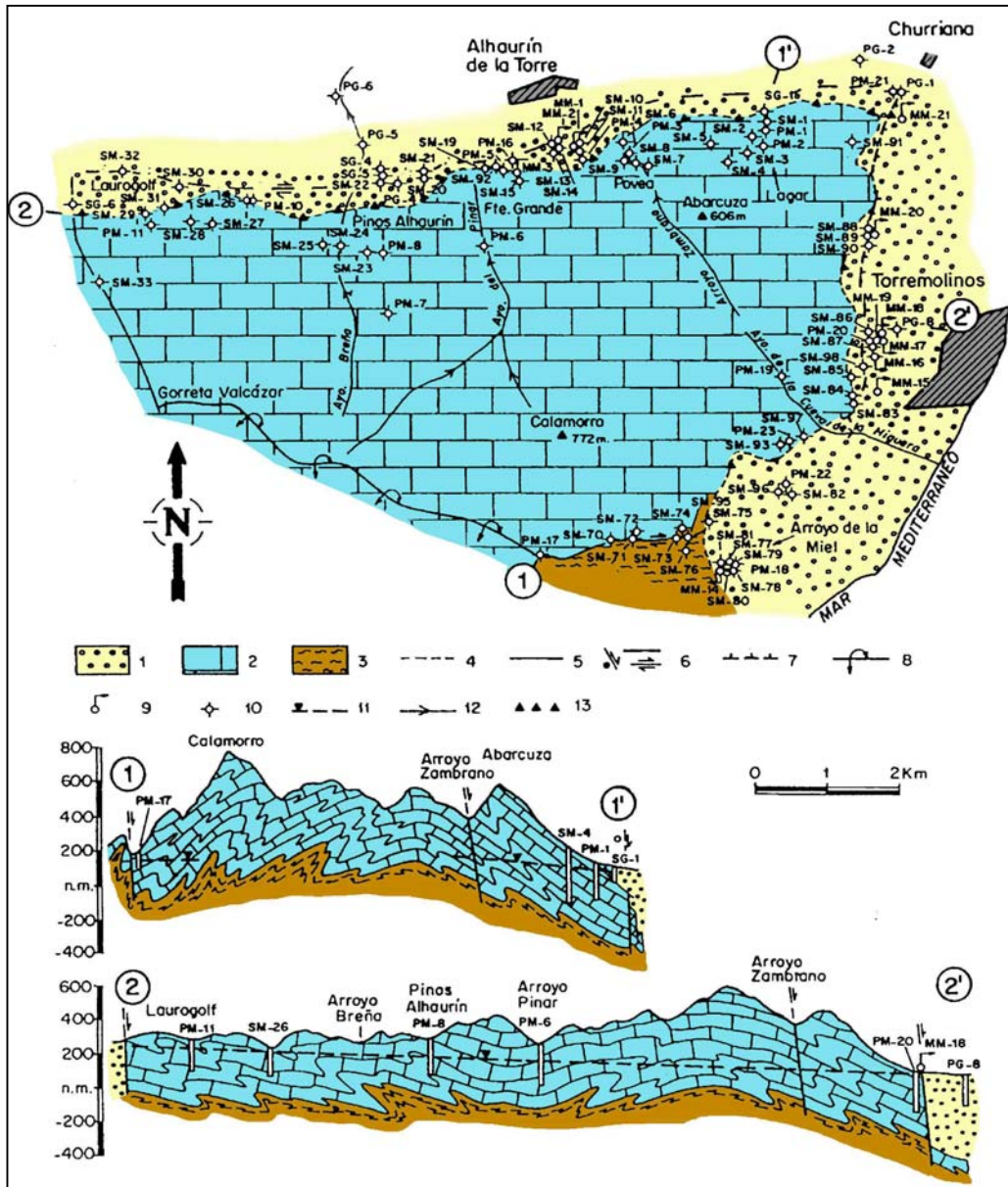


Figura 2. Mapa y cortes hidrogeológicos del acuífero de Torremolinos.

Leyenda: 1= sedimentos pliocuaternarios, 2 = mármoles, 3 = materiales de baja permeabilidad (gneises, migmatitas y arcillas), 4 = contacto discordante, 5 = falla, 6 = falla de desgarre, 7 = falla normal, 8 = anticlinal tumbado, 9 = manantial, 10 = sondeo, 11 = nivel piezométrico, 12 = arroyo, 13 = posible transferencia de recursos. Fte. Tomado de Andreo (1997).

Vías Martínez, J. M., Perles Roselló, M. J. y Andreo Navarro, B. (2003): "Aplicación de un análisis cluster para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos", *GeoFocus (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 199-215. ISSN: 1578-5157

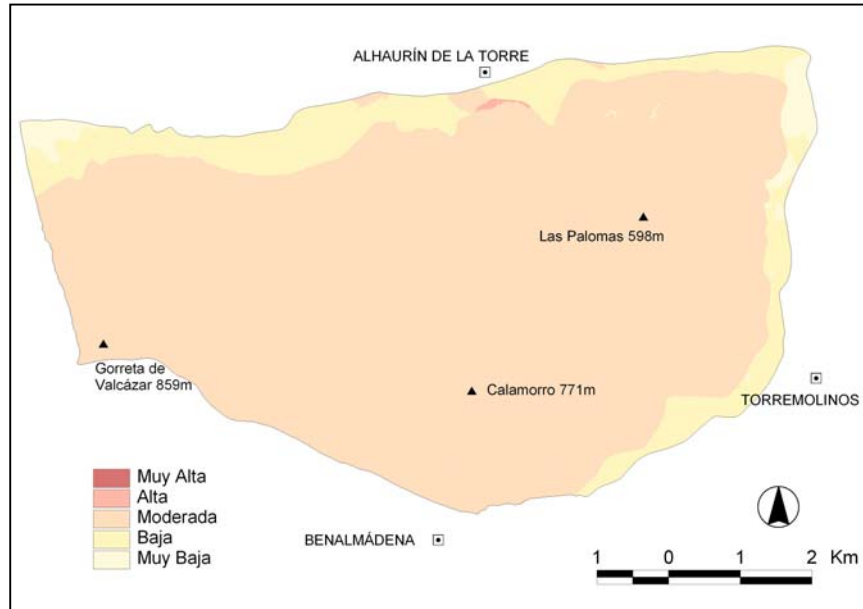


Figura 3. Mapa de vulnerabilidad mediante el método DRASTIC
Fte. (Vías *et al.*, 2001)

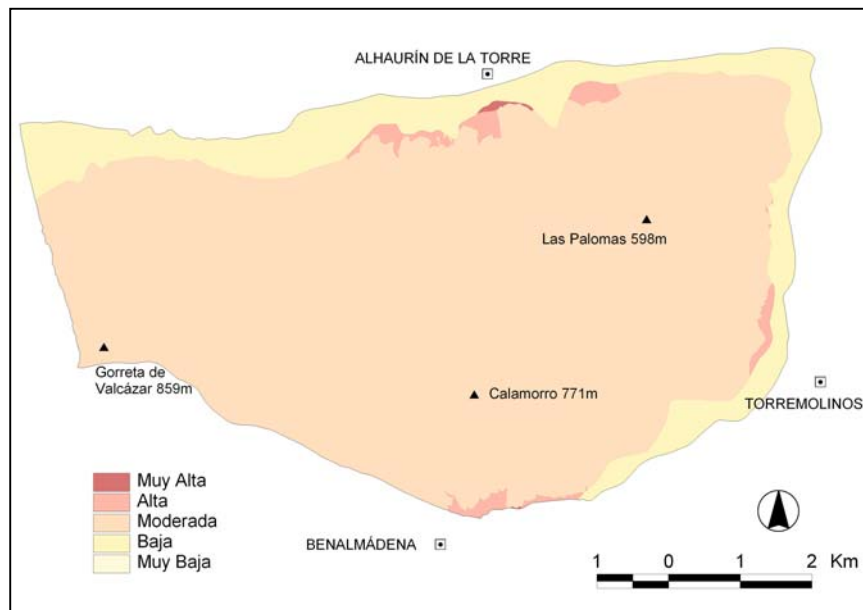


Figura 4. Mapa de vulnerabilidad mediante el método GOD
Fte. (Vías *et al.*, 2001)

Vías Martínez, J. M., Perles Roselló, M. J. y Andreo Navarro, B. (2003): "Aplicación de un análisis cluster para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 3, 2003, p. 199-215. ISSN: 1578-5157

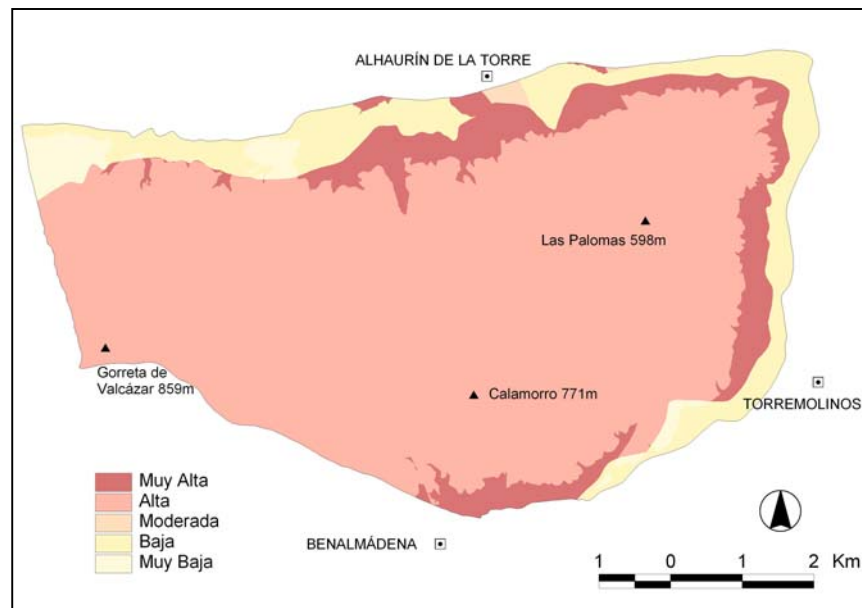


Figura 5. Mapa de vulnerabilidad mediante el método AVI
Fte. (Vías *et al.*, 2001)

Vías Martínez, J. M., Perles Roselló, M. J. y Andreo Navarro, B. (2003): "Aplicación de un análisis cluster para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos", *GeoFocus (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 199-215. ISSN: 1578-5157

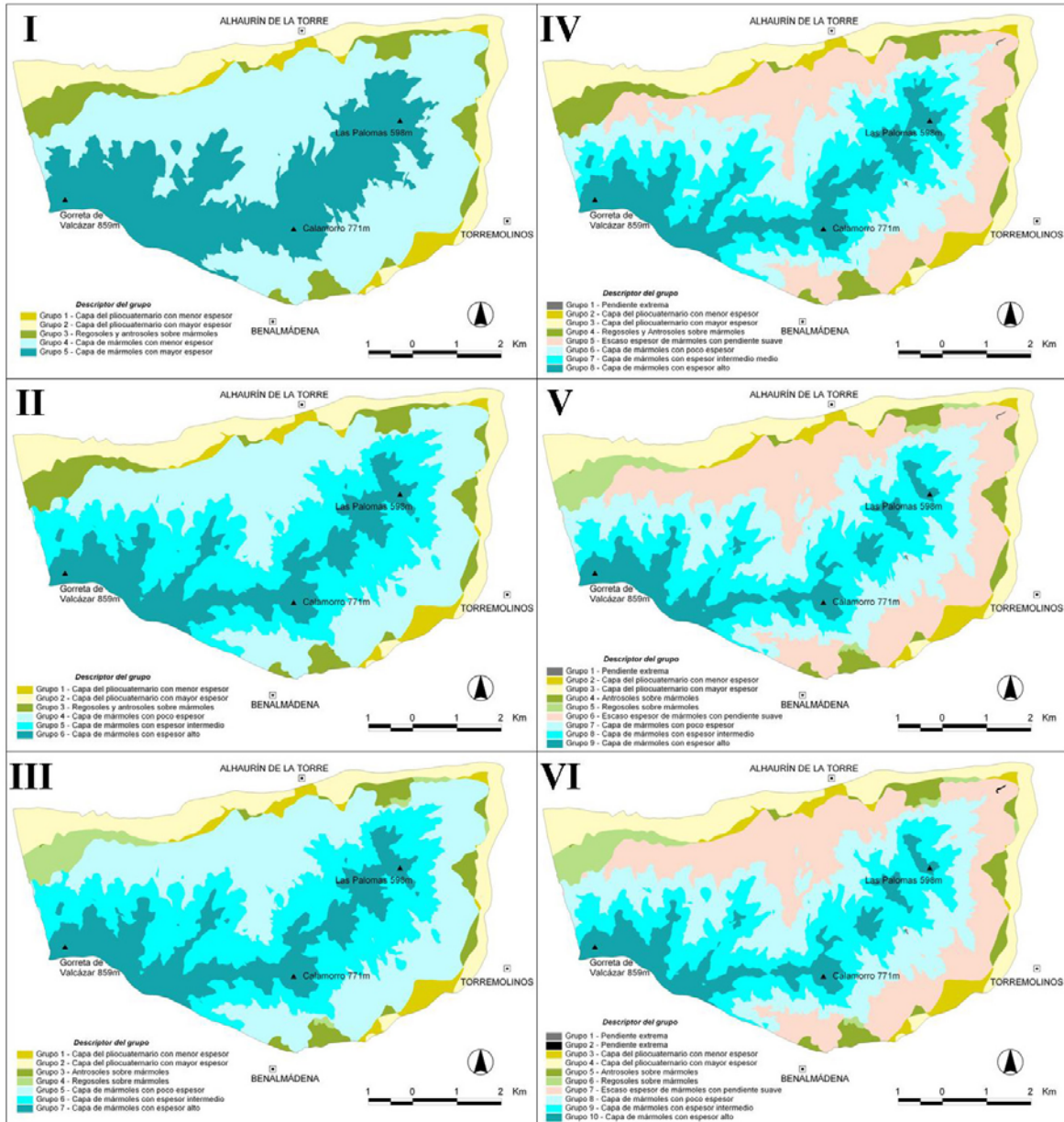


Figura 6. Mapas elaborados a partir del análisis cluster para 5 grupos (I), 6 grupos (II), 7 grupos, (III), 8 grupos (IV), 9 grupos (V) y 10 grupos (VI)

Vías Martínez, J. M., Perles Roselló, M. J. y Andreo Navarro, B. (2003): "Aplicación de un análisis cluster para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos", *GeoFocus (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 199-215. ISSN: 1578-5157

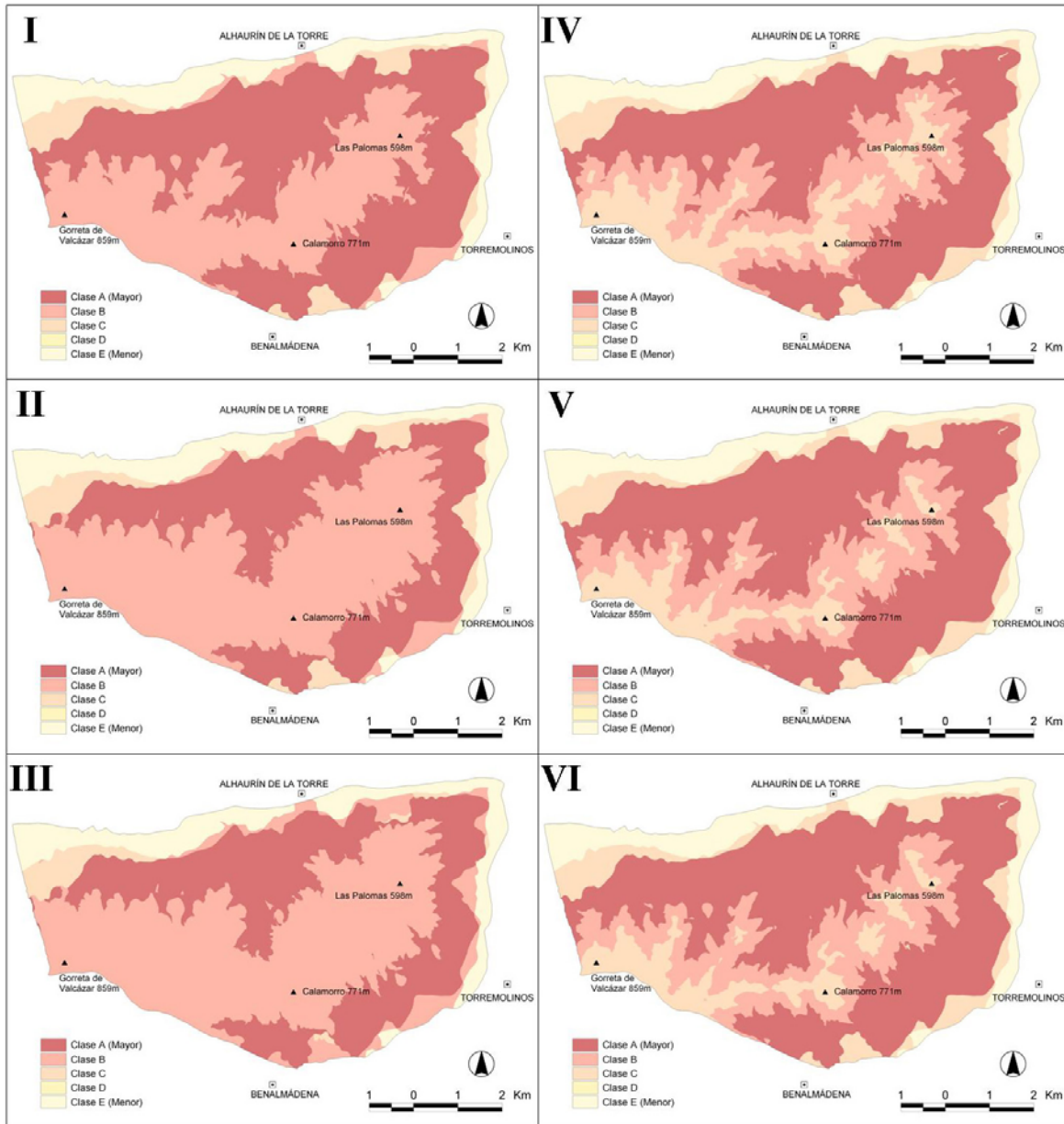


Figura 7. Mapas de vulnerabilidad del acuífero de Torremolinos derivados del análisis *cluster* de 5 grupos (I), 6 grupos (II), 7 grupos (III), 8 grupos (IV), 9 grupos (V), 10 grupos (VI)