

Estrategias de protección del agua subterránea destinada al consumo humano en la cuenca del Guadalquivir

A. Jiménez-Madrid⁽¹⁾, C. Martínez⁽²⁾, J. A. Luque⁽²⁾, J. C. Rubio-Campos⁽²⁾ y F. Carrasco⁽³⁾

(1) CRN Consultores. C/ Ríos Rosas, 19. 28003 Madrid, España
ajimenez@crnconsultores.com

(2) Instituto Geológico y Minero de España. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid, España
c.martinez@igme.es; ja.luque@igme.es; jc.rubio@igme.es

(3) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga
fcarrasco@uma.es

RESUMEN

Se presenta una propuesta metodológica para la definición de zonas de salvaguarda en aplicación de la política de protección de las aguas subterráneas desde la perspectiva de la Directiva de Marco del Agua (DMA). La propuesta metodológica recoge las peculiaridades de las masas de agua del arco mediterráneo y para ello se ha llevado a cabo en la Cuenca del Guadalquivir situada en el sur de España, zona que ofrece especial relevancia porque presenta la influencia de frentes de lluvias así como características mixtas de los climas mediterráneo y atlántico y porque un porcentaje importante de la población se abastece con aguas subterráneas, especialmente en la zona de cabecera de la cuenca donde este porcentaje puede llegar al 80%.

La definición de las zonas de salvaguarda se basa en la delimitación previa de perímetros de protección de la calidad basados en métodos específicos para medios detríticos o kársticos, la valoración del impacto potencial de las presiones existentes y el análisis de la vulnerabilidad intrínseca mediante el método de DRASTIC Reducido para acuíferos detríticos y el COP para acuíferos carbonatados. El análisis de toda esta información espacial en un Sistema de Información Geográfica ha permitido el ensayo y contraste de la validez de la metodología utilizada así como realizar una primera definición de zonas de salvaguarda en la cuenca.

Palabras clave: aguas subterráneas, cuenca del Guadalquivir, Directiva Marco del Agua, protección, Sistema de Información Geográfica

Strategies for protecting ground water used for human consumption in the Guadalquivir basin

ABSTRACT

We propose a way of defining safeguard zones for groundwater protection according to the requirements of the Water Framework Directive (WFD). Taking into account the peculiarities of the groundwater bodies in the region of the Mediterranean arch, we chose to conduct our study in the Guadalquivir basin in southern Spain, an area of special interest because it combines the influence of rain fronts and the mixed characteristics of both Mediterranean and Atlantic climates, together with the fact that a large percentage of water for human consumption is provided by groundwater, especially at the head of the basin, where this percentage may account for up to 80%.

Safeguard zones are defined by an initial delimitation of quality-protection perimeters using the Reduced DRASTIC and COP methods, designed specifically for detrital and karstic aquifers respectively, to assess the potential impact of the existing pressures upon them and study their intrinsic vulnerability. An analysis of all this spatial information using a geographical information system allowed us to test and validate the method used and to obtain an initial definition of safeguard zones in the basin in question.

Key words: geographical information system, groundwater, Guadalquivir basin, protection, Water Framework Directive

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction and Methods

Groundwater constitutes a basic resource in Europe. With the Water Framework Directive (WFD) coming into effect, water protection has turned into one of the priority environmental targets of European policies. Thus it is necessary to develop specific methods for carbonate aquifers to improve protection against contamination and attain a satisfactory status with regard to both the quantity and quality of groundwater bodies used for human consumption, as required by the WFD.

To establish an effective overall protection measure for groundwater bodies, it is highly advisable to consider specifically the risk of contamination, which should be the conceptual basis of the methods chosen to define safeguard zones in groundwater bodies intended for human consumption, as established in several documents for a common implementation of the WFD in the different European member states.

Before defining the wellhead protection areas in the aquifers we studied points which have previously been identified as important to the supply of groundwater in the Guadalquivir river basin (Fig. 1). We also made a detailed analysis of supply infrastructure, urban demand, the geological and hydrogeology characteristics of the aquifers in question, potential sources of contamination, contamination pressures, intrinsic vulnerability to contamination and the risk of groundwater pollution.

As far as well head protection areas are concerned, we have applied traditional analytical methods to delimit such areas in detrital aquifers in conjunction with detailed hydrogeology studies that would allow us to adjust these methods to carbonate aquifers.

Due to the singularities and particularities of the hydrogeology behaviour of karstic aquifers, the traditional methods used to estimate and define wellhead protection areas do not provide satisfactory results in terms of either function or effect. This is reflected in specific particularities that distinguish karstic aquifers from other types, including their evolution, spatial heterogeneity, dual recharge and infiltration and temporal variability, among others. It is because numerical analytical methods have proved to be of limited value in these environments that hydrogeological analysis is especially important.

Bearing this in mind, we have considered two possible scenarios in our approach to the analysis of karstic environments and the subsequent definition of wellhead protection areas on the basis of whether the extraction takes place in an area of natural discharge or occurs in recharge or circulation areas (Fig. 2).

The assessment of intrinsic vulnerability is a very useful tool when planning preventive or corrective measures with regard to land use and the exploitation of water resources. Its objective is to subdivide the area into categories according to the capacity of the subsurface rocks to protect the groundwater. We chose the COP and Reduced DRASTIC methods to evaluate the vulnerability of carbonate and detrital/mixed aquifers respectively.

An inventory of environmental pressures on water quality is required, including at least the systematic identification of each activity, its geographical location and its characterization. Thus, the inventory will identify the areas where there are activities that may result in the deterioration of water quality or determine the cause of known water-quality degradation. Each pressure should be individually assessed to establish its capacity to alter the status of groundwater.

The establishment of safeguard zones (which are optional according to the WFD) focuses on measures to avoid the deterioration of groundwater quality and reduce the level of purification treatments required for drinking water. This is a highly recommendable option and has been widely used for the delineation of numerous water bodies in various European member states. Our proposed method for defining safeguard zones consists of successive working phases.

Results and Discussion

This section describes the results obtained from the application of the proposed method within the Guadalquivir basin.

Wellhead Protection Areas

The initial results of the application of the method described above are shown in Figure 3. In those areas containing extraction wells for human consumption, each protection area was zoned according to the following structure:

- Zone I: immediate or absolute restrictions (transition time of 1 day)
- Zone II: near or maximum restrictions (transition time of 60 days)
- Zone III: remote or moderate restrictions (transition time of 4 years)

In the Guadalquivir basin a total of 75 wellhead protection areas have been defined for 126 supply-capture points, the justification procedure for each of which is set out in accordance with the criteria described in the method.

Intrinsic Vulnerability

The results obtained from an application of the COP method for karstic and the Reduced DRASTIC method for detrital aquifers are set out Figure 5, in which it can be seen that the intrinsic vulnerability obtained by the Reduced DRASTIC method is very low for about 35% of the groundwater bodies in question and low for about 32% of them. The scheme obtained by the COP method indicates that the vulnerability of 40% of the study area is from moderate to very high.

Pressures

The pressures affecting the groundwater bodies of the Guadalquivir Basin are mainly related to water capture (quantity) and diffuse pollution by nitrates and irrigation (quality). There is little evidence of highly focused pressure; in only a few cases have affects related to the presence of waste dumps in zones of high permeability been found. A synthesis of the inventory of pressures, in which the presence or not of significant pressures is indicated, can be found in Figure 4.

Contamination Risk

The risk of contamination is arrived at by combining the assessment of the hazards deriving from pressure and vulnerability. Most of the cases correspond to levels of low and very low risk, which accounts for about 88.5% of the total area susceptible to pollution, as summarized in Table 1. The types of activities of moderate risk are set out in Table 2.

Safeguard Zones

A combined analysis of the previously described criteria (wellhead protection areas, intrinsic vulnerability to pollution, pressures, hazard and risk of pollution) using the tools of spatial analysis provided by geographical information systems allowed us to arrive at an initial delimitation of safeguard zones (Fig. 6 and Table 3).

We describe here a method that complements the methods used to analyse detrital aquifers with a detailed hydrogeological analysis for application to carbonate aquifers. This ensures increased accuracy in the delimitation of wellhead protection areas and reduces the uncertainties in their specific hydrogeological behaviour. The results obtained by applying our method to the Guadalquivir basin zoning has allowed us to draw wellhead protection areas adapted to the characteristics of the carbonate aquifers, thus improving upon the results obtained with the analytical results alone.

We also present a protection strategy for the groundwater used for human consumption in the Guadalquivir basin in view of the requirements imposed by the Water Framework Directive.

The proposed method may be applied to any type of study zone, as has been proved in this work, since the Guadalquivir basin, where it has been tested, is highly complex both from the hydrogeological point of view and that of existing socio-economic activity.

Introducción

Desde que, en 1987, el concepto de sostenibilidad fue acuñado por la Comisión Mundial de Desarrollo y Medio Ambiente en el informe *Bruntland*, la protección del agua ha sido reconocida como uno de los componentes más importantes a la hora de establecer políticas orientadas a alcanzar el desarrollo sostenible (Loukas *et al.*, 2007).

La importancia del agua subterránea así como su gestión y protección ha sido abordada en diferentes trabajos (Volk *et al.*, 2009). Una recopilación de los mismos se lleva a cabo en Hajkowicz y Collins (2007)

donde se analizan los estudios realizados en 34 países mediante análisis multicriterio, los cuales representan una técnica que mejora la transparencia y rigor analítico para la toma de decisiones (Dunning *et al.*, 2000).

La Directiva Marco del Agua, Directiva 2000/60/CE (DMA), promulgada en Octubre del año 2000 por el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea (Unión Europea, 2000), viene a integrar la legislación europea relativa al agua aprobada previamente, a la vez que la racionaliza mediante la derogación de algunas antiguas directivas (Sánchez, 2010). Su objetivo principal es la consecución o, en su caso, el mantenimiento del buen estado de las aguas superficiales

continentales, las aguas subterráneas, las aguas de transición y las aguas costeras para el año 2015.

La DMA establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas integrando la protección de las mismas y la de los ecosistemas asociados. También promueve la cooperación, a través de la coordinación entre las distintas administraciones competentes, los diferentes niveles de toma de decisión (comunitario, nacional, regional, municipal), los distintos agentes sociales y sociedad en general que constituyen el nivel de usuario (Van Ast y Boot, 2003). La última fase de este proceso integrador debe ser la consideración de las nuevas estrategias de gestión del agua en las políticas con incidencia en el territorio.

Sobre las aguas subterráneas y en cumplimiento del artículo 17 de la DMA, se han propuesto medidas específicas para prevenir y controlar la contaminación de las mismas mediante la aprobación de la Directiva relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro, Directiva 2006/118/CE (Directiva de Aguas Subterráneas).

En relación con lo anteriormente expuesto, hay que mencionar que la protección de las aguas subterráneas utilizadas para el abastecimiento urbano es uno de los objetivos prioritarios de la DMA ya que, entre otros requisitos de obligado cumplimiento para todos los Estados miembros de la Unión Europea, se debe garantizar el suministro de agua subterránea en buen estado.

Sin embargo, según la UNESCO, en la actualidad existe una crisis de gestión de los recursos hídricos a nivel mundial (WWAP, 2006). Desgraciadamente, el excesivo uso sin control y su continua mala gestión han provocado un descenso tanto en su calidad como cantidad así como la degradación de muchos ecosistemas asociados (Clarke, 1994; Falkenmark y Lundqvist, 1997; De Villiers, 2000; Tsakiris, 2004).

La experiencia demuestra que el agua subterránea no es inmune a la contaminación por agentes químicos, biológicos o radiológicos. Los procesos de descontaminación y remediación son largos en el tiempo y muy costosos económicamente (UNESCO, 2006; Wang, 2006). Por todo ello, es necesario establecer estrategias de protección preventivas. No hay ninguna duda que la protección absoluta se alcanzaría con la paralización y prohibición de todas las actividades contaminantes. Sin embargo, esto no es posible debido a las implicaciones técnicas y económicas (Wang, 2006).

Es necesario destacar que con la entrada en vigor de la DMA, las Demarcaciones Hidrográficas y sus cuencas constituyen las unidades básicas de gestión de todas las aguas europeas. Por ello, el objetivo del presente trabajo es la descripción de la estrategia de

protección del agua subterránea empleada para consumo humano en una cuenca del sur de España para poder cumplir con los requisitos impuestos por la DMA. Además, la metodología llevada a cabo puede ser utilizada como referencia para futuras revisiones de los procesos inmersos en la nueva planificación hidrológica impuesta por la DMA.

Área de estudio: cuenca del Guadalquivir

La Cuenca del Guadalquivir se sitúa al sur de España, posee una extensión de 57.527 km² y se extiende por 12 provincias pertenecientes a 4 Comunidades Autónomas, de las que Andalucía representa en torno al 90 % de la superficie de la demarcación. Desde el punto de vista geográfico, la Cuenca del Guadalquivir está delimitada por los bordes escarpados de Sierra Morena al norte, las Cordilleras Béticas al sur y el Océano Atlántico hacia el suroeste. Además, el territorio de la Cuenca pertenece a tres grandes unidades litológicas y estructurales: La Meseta, Cordilleras Béticas y Depresión del Guadalquivir (CHG, 2007).

Los recursos hídricos en régimen natural son aproximadamente de 7.038 hm³. La demanda urbana de los más de cuatro millones de personas que habitan en la Cuenca asciende a unos 445 hm³/año (CHG, 2007).

En la Cuenca del Guadalquivir se han delimitado un total de 73 masas de agua subterránea (Figura 1).

En este contexto, se abordan en este artículo los trabajos realizados para proteger el agua empleada para consumo humano en la Cuenca del Guadalquivir (Figura 1), analizándose la metodología y resultados obtenidos para las masas de agua subterránea detríticas y carbonatadas.

Metodología

La necesidad de hacer compatible la actividad socioeconómica con la protección de la calidad de las aguas subterráneas ha sido abordada históricamente mediante la zonificación del territorio a partir de la caracterización del medio físico. Para ello se ha utilizado la cartografía de vulnerabilidad a la contaminación y se han delimitado perímetros de protección, que son herramientas de gestión complementarias ya que se pueden utilizar de manera simultánea para gestionar un mismo espacio (Martínez Navarrete *et al.*, 2008).

Además, se debe considerar específicamente el riesgo de contaminación como una combinación de las presiones a las que se encuentran sometidas las

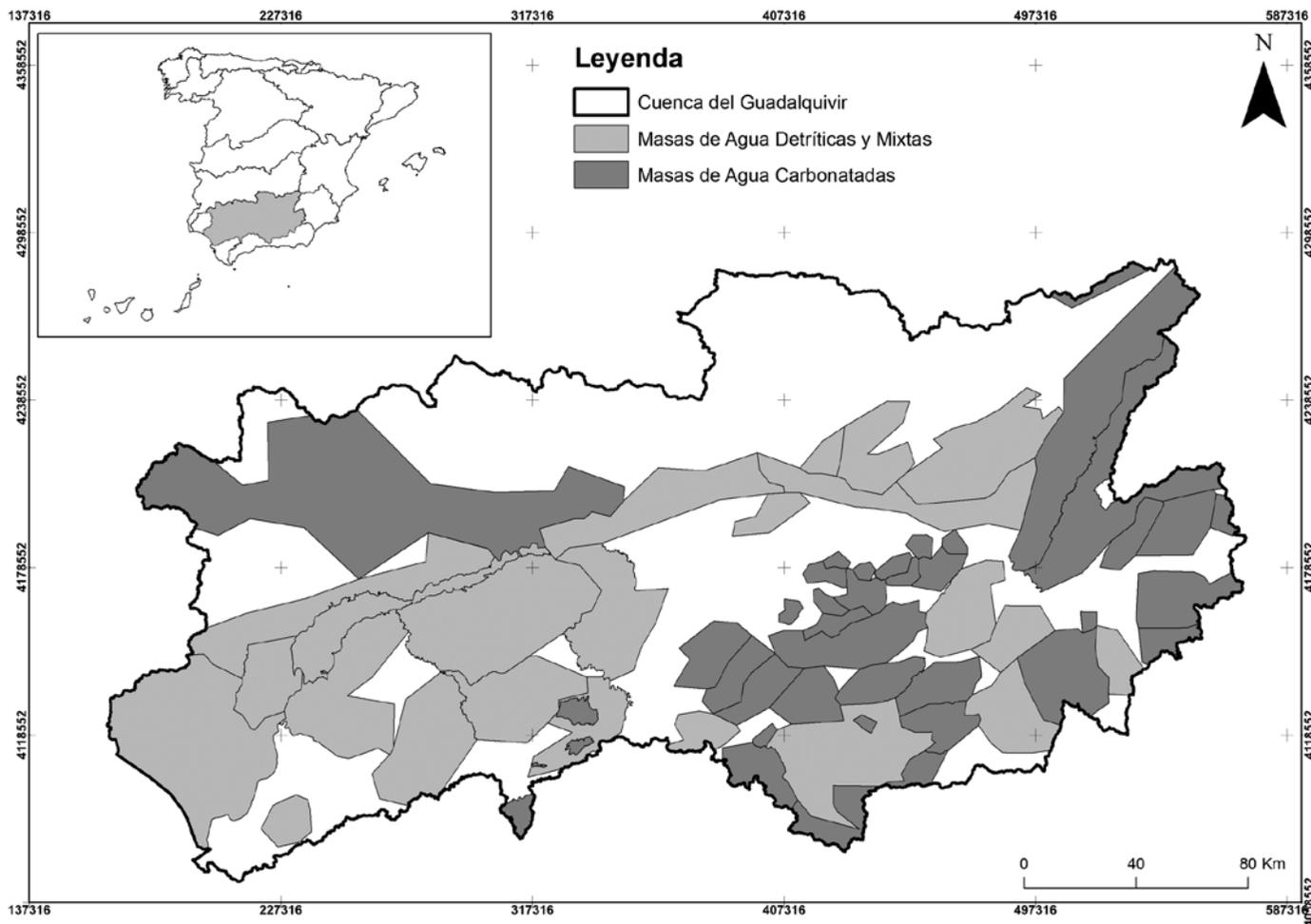


Figura 1. Masas de agua subterránea delimitadas en la Cuenca del Guadalquivir.
Figure 1. Groundwater bodies in the Guadalquivir basin.

masas de agua subterránea y la vulnerabilidad a la contaminación de las mismas así como delimitar las zonas de salvaguarda de las masas de agua subterránea utilizadas para el consumo humano.

La metodología empleada en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir para proteger las aguas destinadas al consumo humano contempla varios criterios que se exponen a continuación.

Delimitación de perímetros de protección

Moreno Merino y Martínez Navarrete (1991) definen un perímetro de protección como un área en torno a una captación en la cual, de forma graduada, se restringe o prohíben las actividades o instalaciones susceptibles de contaminar las aguas subterráneas o que afecten al caudal aprovechado para el abastecimiento de la población.

Para delimitar los perímetros de protección de una captación destinada a consumo humano se necesita,

en primer lugar, analizar el marco geológico evaluando litologías y la estructura geológica, su marco hidrogeológico y balance hídrico de la masa de agua donde se ubica la captación. Este análisis es fundamental para encuadrar y entender adecuadamente los límites y geometría del acuífero captado, parámetros hidrodinámicos característicos de su entorno, piezometría, hidroquímica así como el funcionamiento hidrogeológico detallado y las áreas de alimentación de la captación.

Cuando se delimitan perímetros de protección de la calidad pueden emplearse diferentes criterios. Según el más usual, el tiempo de tránsito (tiempo que tarda una partícula en alcanzar la captación), se distinguen habitualmente tres áreas de restricciones de uso crecientes con la proximidad a la captación (Martínez Navarrete y García García, 2003), denominadas:

- Zona I o de restricciones absolutas (tiempo de tránsito de 1 día para impedir el acceso directo a la captación).

- Zona II o de restricciones máximas (tiempo de tránsito de 60 días para proteger frente a la contaminación bacteriológica).
- Zona III o de restricciones moderadas (tiempo de tránsito de 4 años para proteger frente a contaminantes de larga duración).

Se propone una metodología diferente para la delimitación de los perímetros de protección en acuíferos detríticos y mixtos (combinan parte carbonatada y detrítica) de la que debe aplicarse en acuíferos kársticos.

En acuíferos detríticos y mixtos la metodología empleada se basa habitualmente en la utilización de métodos analíticos entre los que predomina el método de Wyssling (Wyssling, 1979 en Lallemand-Barrés y Roux, 1989), diseñado para el dimensionamiento de perímetros de protección en acuíferos con porosidad intergranular y homogéneos, que requiere datos fácilmente obtenibles en campo (gradiente hidráulico, caudal de bombeo, permeabilidad horizontal, porosidad eficaz y espesor del acuífero).

Este método consiste en el cálculo de la zona de llamada de una captación, es decir, de la parte del área de alimentación en la cual puede apreciarse un descenso piezométrico consecuencia del bombeo y donde las líneas de corriente se dirigen a la captación, y la búsqueda posterior del tiempo de tránsito deseado.

Por otra parte, en los acuíferos kársticos, dada la singularidad y especificidad del funcionamiento hidrogeológico de los mismos, los métodos analíticos empleados en medios no karstificados para la estimación y definición de los perímetros de protección no ofrecen unos resultados que garanticen su funcionalidad y efectividad. Esto obedece a una serie de peculiaridades específicas que los diferencian del resto de tipologías acuíferas, como son la evolución del acuífero, heterogeneidad espacial, dualidad de la recarga e infiltración y variabilidad temporal entre otros (Goldscheider *et al.*, 2004). En este contexto, dada la limitada efectividad de los métodos de cálculo para la definición de perímetros en áreas kársticas, toma especial relevancia el análisis hidrogeológico.

En la metodología propuesta para los acuíferos kársticos se definen dos aproximaciones dependiendo de que la captación esté localizada en la zona de descarga natural, o se trate de una zona de recarga o circulación del agua.

Perímetros para captaciones en zonas de descarga de áreas kársticas

Las diferentes fases empleadas en la metodología utilizada para la definición de perímetros de protección de captaciones en las zonas de descarga de las áreas kársticas son descritas en la Figura 2.

El análisis preliminar de captaciones de la Fase 1 permite contextualizarlos y asignarlos a una o varias zonas de descarga y en ese caso efectuar agrupación considerándolos como un único elemento hidrogeológico en una determinada unidad kárstica. Se efectúa además una estimación de la recarga y descarga en el entorno de esa unidad.

En la Fase 2 se define el área de influencia hidrogeológica sobre la descarga, es decir, el sistema kárstico del que forma para la captación. Para ello se compara la descarga frente a los recursos hídricos disponibles empleando el caudal medio y la lluvia útil.

La interpretación de ambos criterios debe proporcionar resultados coherentes así, por ejemplo, si la superficie estimada en el análisis climático es muy superior a la del análisis hidrogeológico se deben buscar aportaciones al sistema más allá de los límites hidrogeológicos contemplados o extender al sistema otras aportaciones alóctonas.

Debido a la dualidad de la infiltración en los sistemas kársticos, en la Fase 3 se delimitan las zonas que corresponden a una alimentación alóctona concentrada frente a aquellas con infiltración difusa sobre el afloramiento carbonatado.

La recarga concentrada que procede de áreas alóctonas suele corresponderse con una red de drenaje kárstica bien desarrollada y jerarquizada con gran desarrollo al contrario de lo que sucede habitualmente con la recarga difusa.

La eficacia de la red es una de las claves fundamentales que rigen la vulnerabilidad intrínseca del medio y era uno de los principales condicionantes al delimitar los perímetros de protección. El análisis de las características propias de la surgencia a través de la hidroquímica y el estudio de sus hidrogramas es también básico.

Por último, en la Fase 4, se analiza el funcionamiento hidrogeológico y se estima la zonificación hidrodinámica, definiendo la magnitud vertical de la zona saturada y freática, las direcciones de circulación preferencial, el grado de karstificación, haciéndose una ponderación de la recarga alóctona concentrada en la aportación de los recursos totales.

A partir del análisis propuesto, en el cual se está caracterizando la red de drenaje subterránea del sistema, es posible una mayor aproximación al comportamiento de un contaminante incorporado al sistema. Por tanto, se estará en condiciones de establecer perímetros de protección que no estén ligados en exclusiva a la variable "distancia" y que tengan en consideración otra serie de factores característicos de cada acuífero kárstico y que determinarán el comportamiento de un contaminante introducido en el sistema.

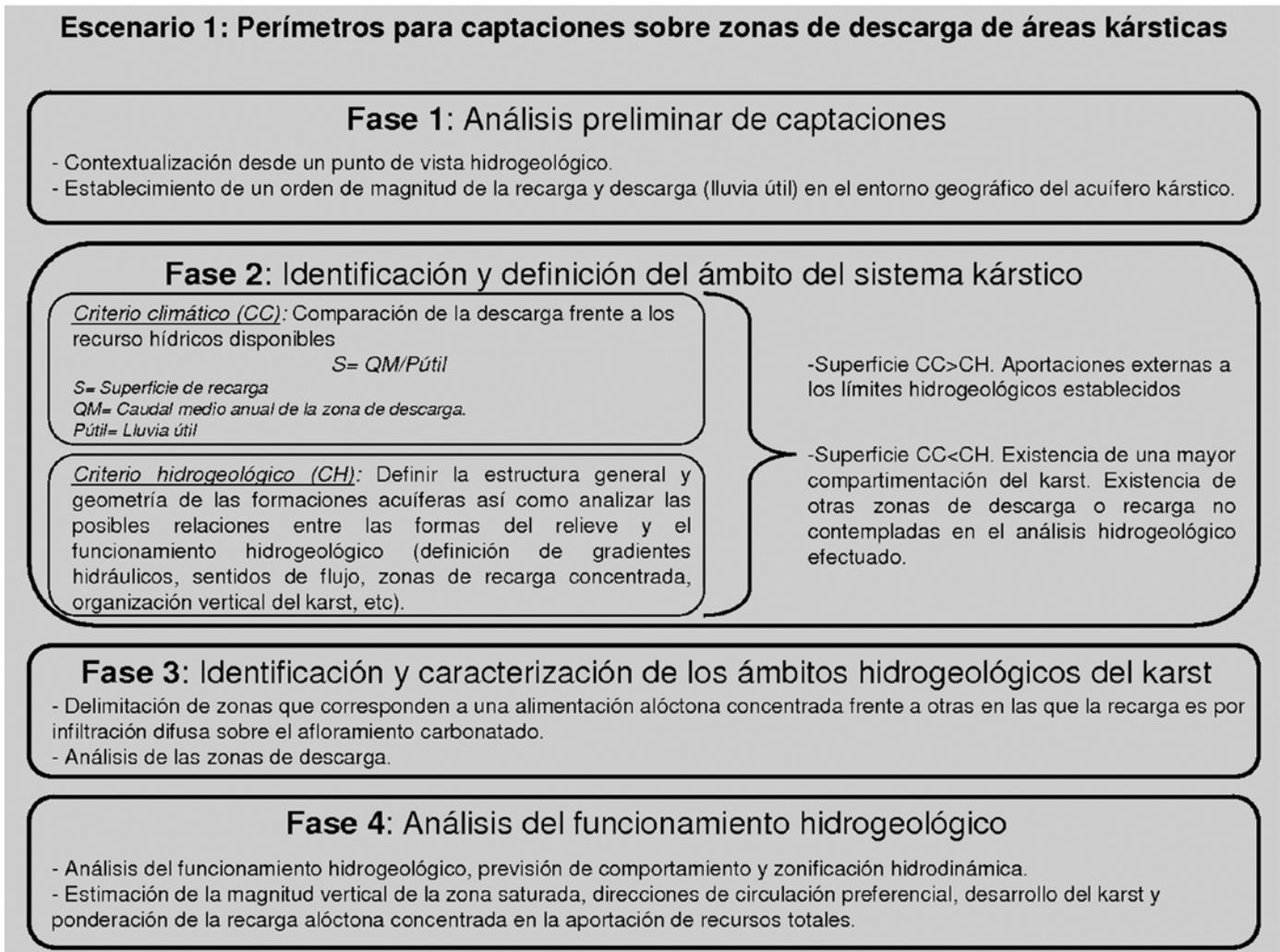


Figura 2. Fases de trabajo en la metodología para delimitar perímetros de protección en escenarios de recarga de áreas kársticas (Jiménez-Madrid et al., 2010a).

Figure 2. Phases involved in the method for defining wellhead protection areas in recharge scenarios in karstic areas (Jiménez-Madrid et al., 2010a).

Perímetros para captaciones extractivas en zonas de recarga o circulación

En el caso de las captaciones localizadas en las zonas de recarga y circulación de sistemas carbonatados, también se identifica, delimita y analiza el funcionamiento del sistema kárstico en el que se encuentran. El objetivo que se busca es contextualizar las extracciones dentro del sistema y definir el ámbito hidrogeológico en el que se desarrollan. A partir de ahí, será posible evaluar tanto su afección al funcionamiento natural del sistema, como estimar los condicionantes de dicha posición hidrogeológica sobre las extracciones.

Una vez conocidos los condicionantes y el emplazamiento hidrogeológico de las extracciones, se recomienda como primera aproximación, la aplicación de

un método numérico como el de Wyssling (op. cit.) para el cálculo del perímetro de protección si bien sus resultados estimativos deben modificarse mediante el análisis hidrogeológico del sistema para corregir desviaciones e incoherencias incompatibles con la configuración y funcionamiento del mismo.

Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación

La vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea es la susceptibilidad de la misma a la contaminación debido al impacto de las actividades humanas (Foster, 1987). Este concepto está basado en la suposición de que el medio físico ofrece una protección natural a las aguas subterráneas (Vrba y Zoporozec, 1994).

Se han desarrollado a lo largo de los años diferentes aproximaciones metodológicas para evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación. Un resumen detallado se muestra en Jiménez Madrid, 2011. Para el presente trabajo se han seleccionado los métodos DRASTIC Reducido para los acuíferos detríticos y COP para el caso de los acuíferos carbonatados.

El método DRASTIC Reducido (DGOHCA e IGME, 2002; DGOHCA y CEDEX, 2002) fue desarrollado en estudios realizados en las Cuencas del Duero y del Guadalquivir para optimizar e implementar la evaluación de la vulnerabilidad en ambas cuencas. Este método propone reducir a cuatro los siete factores originales del método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) para evitar la redundancia derivada de la utilización de información común en la elaboración de los distintos mapas temáticos. En esta línea se manifiestan Foster y Skinner (1995) y Vías (2005) quienes opinan que el método DRASTIC genera un índice de vulnerabilidad de significado poco claro, como consecuencia de la interacción de demasiados parámetros con ponderaciones dudosas.

El método DRASTIC Reducido utiliza solamente cuatro factores, que corresponden a los aspectos básicos a considerar para evaluar la vulnerabilidad intrínseca:

- Suelo vegetal (S)
- Litología de la zona no saturada (L)
- Espesor de la zona no saturada (E)
- Recarga neta (R)

El índice de vulnerabilidad final (V) se calcula mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$V = 3S + 4L + 5E + 4R$$

Estos parámetros se valoran entre 1-10 de menor a mayor vulnerabilidad, excepto la recarga que se valora entre 1 y 9. Los valores del índice pueden estar comprendidos entre 16 y 156 (Jiménez Madrid *et al.*, 2011).

El método COP (Vías *et al.*, 2006) fue diseñado para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos carbonatados a partir de tres factores:

- Concentración de flujo (C)
- Protección del agua subterránea (O)
- Precipitación (P)

El factor O tiene en cuenta la capacidad de atenuación del contaminante ejercida por la zona no saturada en función de la textura y espesor de suelo, la litología, el espesor de la zona no saturada y el grado de confinamiento del acuífero. El factor C es específico de acuíferos carbonatados y considera dos escenarios posibles. Por un lado diferencia las zonas de infiltración preferenciales del acuífero donde la existencia de conductos y velocidades elevadas de flujo provocan un aumento de la vulnerabilidad, y por otro las

áreas donde se produce una infiltración difusa sin una concentración significativa de los flujos del agua de recarga. Finalmente, para evaluar el factor P hay que tener en cuenta tanto la cantidad como la intensidad de las precipitaciones.

El índice COP se calcula mediante el producto de los tres factores. Sus valores varían entre 0 y 15 y se agrupan en cinco clases de vulnerabilidad, de manera que los índices más bajos indican máxima vulnerabilidad.

Con respecto a la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, a la hora de delimitar las zonas de salvaguarda se debe considerar lo siguiente:

- Las zonas de vulnerabilidad alta y muy alta, se incluyen en la zona de salvaguarda si existen captaciones de abastecimiento próximas.
- Principalmente en acuíferos kársticos se ha protegido la totalidad de la zona de alimentación directamente relacionada con la descarga de manantiales de abastecimiento.
- En el caso de acuíferos confinados se han delimitado sus zonas de alimentación como zonas de salvaguarda, aunque estén separadas e incluso alejadas de las captaciones.

Evaluación de presiones y riesgo de contaminación

Según la DMA una presión es toda aquella actividad originada por el hombre que puede tener un efecto medioambiental desfavorable en el agua (tanto en calidad como en cantidad).

En la Cuenca del Guadalquivir se ha realizado humano ten al norte de la regimo solicito por registroEN ALL UN SEGURO QUE CUBRE LOS POSIBLES ACCIDENTEun inventario de presiones tomando como base el catálogo de fuentes de contaminación propuesto por el grupo de trabajo de la Acción Europea COST 620 (De Keteleare *et al.*, 2004). La evaluación de la peligrosidad de cada una de las presiones se ha efectuado según la metodología propuesta en el marco de la citada Acción, basada en tres parámetros: nocividad de la actividad contaminante (H), intensidad de la contaminación (Qn) y probabilidad de ocurrencia de un evento de contaminación (Rf). El valor de H viene definido por el método, puntuación realizada por un comité de expertos europeos, con valores comprendidos entre 10 y 100 para cada actividad. Los otros dos factores Qn y Rf permiten matizar al alza o a la baja la valoración inicial. El factor Qn varía entre 0,8 y 1,2 y en nuestro caso se ha puntuado según la dimensión del peligro a partir de su identificación en el campo, mientras que al factor Rf (cuyo valor varía entre 0 y 1) se le ha dado la mayor puntuación con

objeto de no disminuir la peligrosidad de la actividad, tal como recomienda el método, ya que no existen datos suficientes que demuestren que la probabilidad de contaminación es baja.

El índice de peligrosidad HI se obtiene mediante el producto de los tres factores y puede variar entre un valor mínimo de 0 y un máximo de 120 (De Keteleare *et al.*, 2004):

$$HI = H \cdot Q_n \cdot R_f$$

La evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas ha sido abordada por diferentes autores sin existir consenso en los factores a analizar ni en el método a utilizar (Aller *et al.*, 1987; Foster, 1987; Foster e Hirata, 1988; Civita and de Maio, 1997; Ducci, 1999; Hötzl, 2004).

El riesgo de contaminación, en base a las presiones actuales, se obtiene a partir de la combinación de la peligrosidad obtenida de las actividades ubicadas sobre el acuífero y de la vulnerabilidad de este último. En este estudio, el índice de intensidad del riesgo (RII) se ha calculado a partir del cociente entre el índice de vulnerabilidad obtenido con el método de vulnerabilidad aplicado y el índice de peligrosidad (HI) según la metodología propuesta por Jiménez-Madrid *et al.*, 2010b.

Para delimitar las zonas de salvaguarda, en las áreas donde existen presiones significativas, se ha realizado un análisis que contempla la vulnerabilidad en la zona de alimentación y la existencia o no de presiones significativas en dicha zona según los criterios expuestos en la Tabla 1.

Delimitación de zonas de salvaguarda

Las zonas de salvaguarda son áreas (que la DMA contempla establecer opcionalmente) en cuyo ámbito se centrarán las medidas para proteger las aguas subterráneas con el objetivo de limitar el deterioro de su calidad y reducir el nivel de tratamiento de purificación requerido en el agua de consumo humano. Equivalen por tanto a "perímetros de protección" de masas de agua subterránea destinada al consumo humano según el artículo 7.3 de la DMA (Martínez-Navarrete *et al.*, 2011).

Las zonas de salvaguarda están orientadas a la protección de la masa para uso de abastecimiento. En el presente trabajo se ha tomado como elemento de referencia la localización de las captaciones existentes (bien aisladas o en grupo), de forma que no se definan zonas de salvaguarda en sectores de las masas de agua en los que no existan captaciones actuales, incluso aunque sean zonas de vulnerabilidad alta o muy alta. Su uso con tal fin en el futuro requiere su inclusión en el análisis.

Por otro lado, se ha considerado que las captaciones que no se encuentren dentro de una masa de agua subterránea, no serán objeto de definición de zona de salvaguarda si bien pueden establecerse perímetros de protección de captación específicos para evitar una posible contaminación por actividad antrópica.

Cuando existan perímetros de protección ya definidos (aprobados o propuestos), estos se incluirán en las zonas de salvaguarda, con posibilidad de realizar una envolvente que los agrupe en función de criterios hidrogeológicos.

Para la delimitación de las zonas de salvaguarda se propone una metodología que contempla la realización de tres fases:

Primera fase (construcción de elipses)

La primera fase, únicamente orientativa, ha consistido en la construcción de unas elipses mediante el método de Wyssling (op. cit), para ello se ha necesitado generar una tabla con los datos requeridos por el método. Esto se ha realizado con la ayuda de herramientas de tratamiento espacial de Sistemas de Información Geográfica. La metodología llevada a cabo contempla un apartado de revisión y calibrado de las mismas.

Delimitación de límites hidrogeológicos y zonas de alimentación

Una vez obtenida esa primera aproximación para la delimitación de zonas de salvaguarda (Primera Fase), el siguiente paso ha sido ajustar con una mayor pre-

| Vulnerabilidad en zonas de alimentación | Presiones significativas | Captaciones de consumo humano | Necesidad de incluir en protección de zonas de salvaguarda |
|---|--------------------------|-------------------------------|--|
| Muy Alta – Alta | SÍ | SÍ | SÍ |
| Muy Alta – Alta | SÍ | NO | Solo si era la zona de alimentación de otras captaciones |
| Baja – Muy Baja | NO | NO | NO |

Tabla 1. Criterios considerados en la definición de zonas de salvaguarda según la existencia de presiones en la Cuenca del Guadalquivir.
Table 1. Criteria taken into account when defining safeguard zones according to pressures on the aquifer in the Guadalquivir basin.

cisión estas zonas en función de criterios hidrogeológicos.

En esta etapa se ha realizado un análisis hidrogeológico, teniendo en cuenta los flujos, los límites hidrogeológicos de las zonas de recarga y la transferencia lateral desde unidades anexas contemplando además la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación y las presiones existentes así como su distribución. Se ha delimitado principalmente el área de alimentación de la captación (hasta las divisorias hidrogeológicas o límites hidrogeológicos).

La delimitación de las zonas de salvaguarda en esta segunda fase contempla un ajuste con mayor precisión en base al análisis de:

- Zonas de alimentación o recarga (se identifican las zonas de recarga incluso en acuíferos confinados y de unidades anexas)
- Tipología del acuífero (detritico, mixto y kárstico y libre, confinado y aluviales)
- Unidades Geológicas y límites hidrogeológicos (recarga, descarga, bordes de nivel constante y bordes impermeables)
- Divisorias superficiales de aguas subterráneas y vertientes
- Piezometría y direcciones de flujo
- Zonas con vulnerabilidad muy alta, alta y moderada

Criterio de experto

La delimitación final de la zona de salvaguarda igualmente requiere una revisión por un experto en hidrogeología, que ha analizado las condiciones de funcionamiento hidrogeológico y ha ajustado las zonas de salvaguarda en función de criterios principalmente hidrogeológicos, según el siguiente procedimiento:

El análisis hidrogeológico para el establecimiento de las zonas de salvaguarda se ha basado en las siguientes premisas:

- En las unidades carbonatadas, donde los tiempos de tránsito de los recursos hídricos subterráneos suelen ser muy reducidos en condiciones normales y en episodios de recarga intensa, se ha considerado que las zonas de salvaguarda han de tener una estrecha relación con las áreas de alimentación de los sistemas hidrogeológicos. Por tanto, en la mayoría de los casos, la zona de salvaguarda corresponde con el área de recarga, tanto directa-difusa en el propio afloramiento carbonatado, como alóctona procedente de áreas adyacentes de baja permeabilidad. Se deja, no obstante, al margen de la zona de salvaguarda a los afloramientos carbonatados del sistema

que constituyen sistemas periféricos de drenaje respecto al sistema principal.

- Se ha considerado que la tipología de la captación no es trascendente en este análisis de definición de zonas de salvaguarda y, por tanto, en todos los casos se ha considerado que sondeos, pozos y manantiales constituyen puntos de descarga de la unidad.
- En algunos casos es posible formalizar una agrupación de captaciones, al constituir parte de una misma zona de descarga de una unidad carbonatada.
- En otros casos, la coalescencia de zonas de salvaguarda obtenidas para captaciones o agrupaciones de captaciones distantes, conlleva la unión de las mismas en una sola.

En base a estas premisas básicas establecidas, la delimitación de las zonas de salvaguarda se ha desarrollado según la siguiente metodología y etapas de análisis:

- Análisis preliminar de cada masa de agua subterránea en su totalidad, abordando un examen a escala regional para obtener una visión de conjunto acerca de la extensión, distribución de materiales-permeabilidades, direcciones generales de flujo y localización de las principales zonas de descarga.
- Contextualización hidrogeológica de las captaciones o agrupaciones de captaciones dentro del esquema general previamente estudiado.
- Análisis de los perímetros de protección de captaciones delimitados para su inclusión en las zonas de salvaguarda.
- Funcionamiento hidrogeológico básico de las masas de agua asociadas a las captaciones o agrupaciones, con el objetivo de determinar sus áreas de recarga y, por tanto, ajustar las zonas de salvaguarda a dicho ámbito.

La caracterización del funcionamiento hidrogeológico de las unidades carbonatadas se ha realizado en base a la observación y análisis de los diferentes controles que convergen en la configuración definitiva de los sistemas hidrogeológicos carbonatados. Estos controles se pueden agrupar en tres grandes categorías:

- Control litológico: determina en gran medida la permeabilidad de los materiales y va a constituir el primer criterio para delimitar la unidad carbonatada del sistema estudiado. Además, permite realizar una primera aproximación en la identificación de las zonas de recarga directa-difusa sobre el afloramiento carbonatado y la posible existencia de recargas alóctonas procedentes de materiales adyacentes de baja per-

meabilidad que vierten hacia el macizo carbonatado.

- Control estructural: junto con la localización de las zonas de descarga y la configuración del relieve, va a permitir la predicción de la dirección de los flujos subterráneos principales en el sistema hidrogeológico. En algunos casos, el control estructural del macizo es el que va a imponer condiciones de contorno a la unidad, debido a la existencia de estructuras tectónicas que limitan al conjunto carbonatado.
- Control geográfico o fisiográfico: la configuración del relieve es determinante en el análisis de los sistemas hidrogeológicos carbonatados, ya que este control gobierna en gran medida la distribución y magnitud de los gradientes hidráulicos dentro del sistema, establece el nivel de base local sobre el que se produce la evolución y desarrollo de la karstificación y condiciona de modo substancial la configuración de las zonas

de transferencia vertical y subhorizontal en el karst.

Resultados y discusión

Perímetros de protección

En la Cuenca del Guadalquivir, se han definido un total de 75 perímetros de protección en 126 captaciones de abastecimiento para cada uno de los cuales ha sido descrito un procedimiento para justificar su delimitación (Figura 3) empleando los criterios descritos en la metodología anteriormente expuesta.

La zonificación realizada en el perímetro de protección se ha basado fundamentalmente en criterios hidrogeológicos, apoyándose en cálculos previos preliminares realizados según el método de Wysling (op. cit.) considerándose las tres zonas anteriormente descritas.

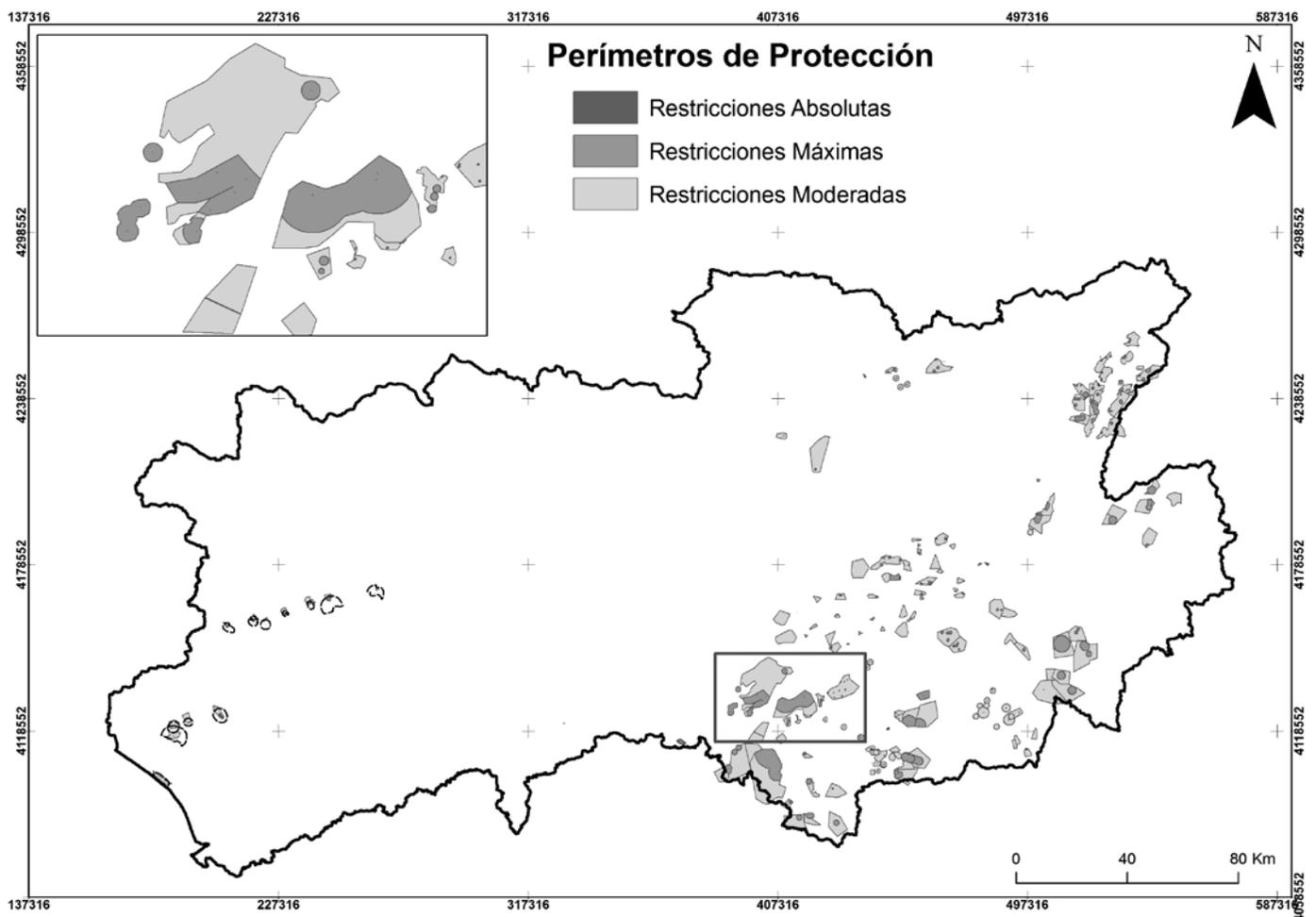


Figura 3. Perímetros de protección existentes y delimitados en este trabajo en la Cuenca del Guadalquivir (Zona zoom con mayor detalle).

Figure 3. Existing wellhead protection areas in the Guadalquivir basin defined in this work (zoom area with greater detail).

Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación

Los resultados obtenidos tras la aplicación de los métodos COP, en el caso de los acuíferos carbonatados, y DRASTIC Reducido, para los acuíferos detríticos y mixtos, se muestran en la Figura 5.

La vulnerabilidad media de las masas de agua subterráneas detríticas y mixtas de la Cuenca del Guadalquivir obtenidas aplicando el método DRASTIC Reducido, es muy baja en torno a un 35% y baja aproximadamente en un 32%.

Las zonas de mayor vulnerabilidad son las áreas de marismas y aluviales, con vulnerabilidad alta alrededor de un 12% y puntualmente (menos del 1%). La vulnerabilidad es muy alta debido a que los niveles de agua en estas zonas son más someros.

Las zonas contiguas a los cauces (18%) tienen vulnerabilidad media. Las masas donde se observa una mayor vulnerabilidad son las 050.046 (Aluvial del Guadalquivir, Curso Medio), 050.069 (Osuna-La

Lentejuela) y 050.073 (Aluvial del Guadalquivir-Sevilla).

La cartografía de vulnerabilidad obtenida aplicando el método COP indica que el 40% del área de estudio presenta vulnerabilidades de clases moderada, alta y muy alta (Figura 5).

Una de las masas de agua subterránea que ha tenido mayor dificultad para determinar su vulnerabilidad ha sido la de Sierra Morena (050.045), dado que está formada por una amplia variedad de litologías y, donde formaciones de calizas marmóreas, típicas de esa región, se disponen de forma discontinua, distantes y, según los análisis hidrogeológicos, independientes entre sí. El mayor afloramiento carbonatado de esta masa de agua subterránea resulta, según el método COP, con vulnerabilidad alta y muy alta.

En la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir todas las masas carbonatadas, excepto la Sierra de las Estancias (050.008), presentan áreas con vulnerabilidad alta y/o muy alta.

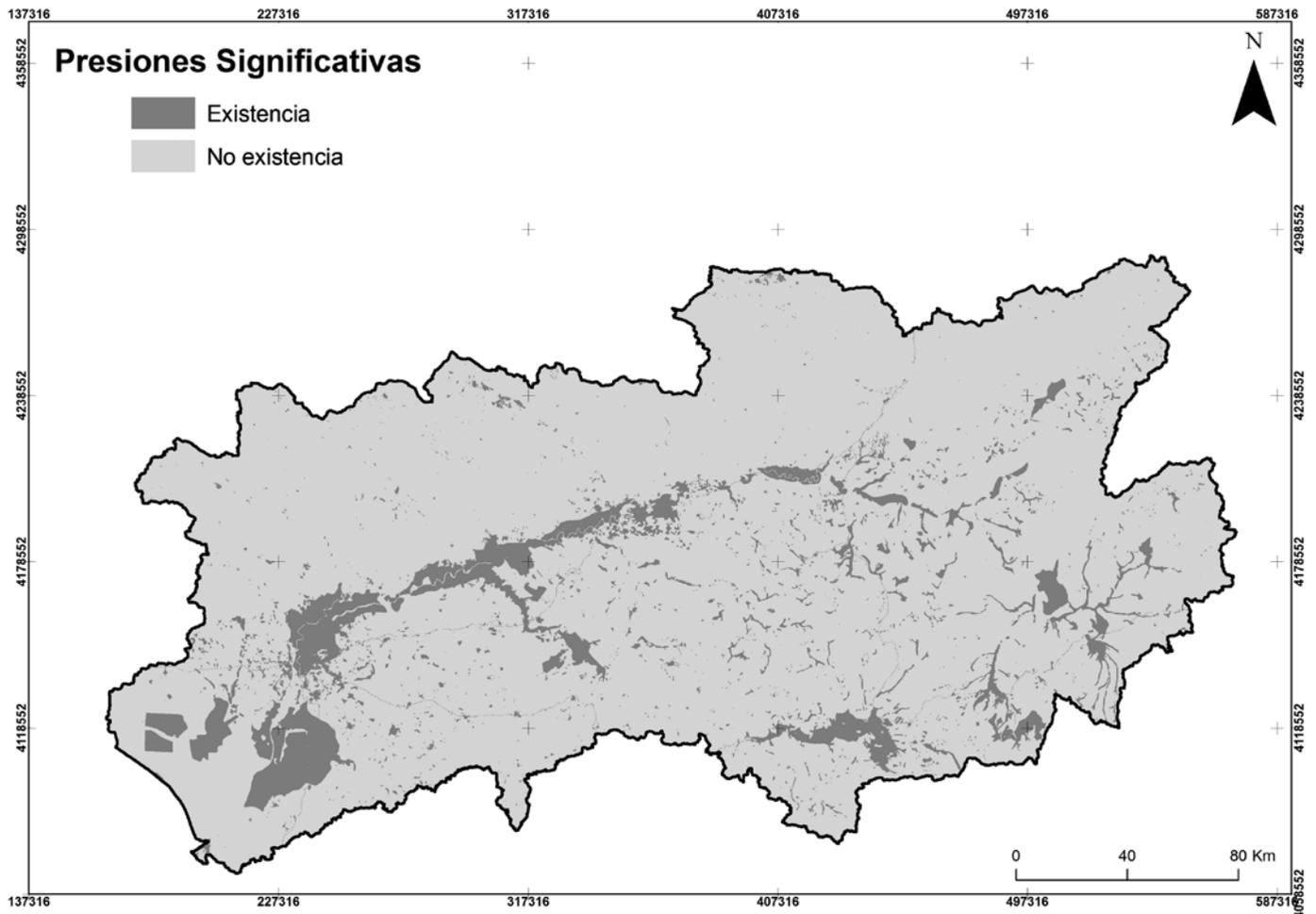


Figura 4. Resumen de existencia de presiones significativas en la Cuenca del Guadalquivir.
Figure 4. Summary of significant pressures on the aquifers in the Guadalquivir basin.

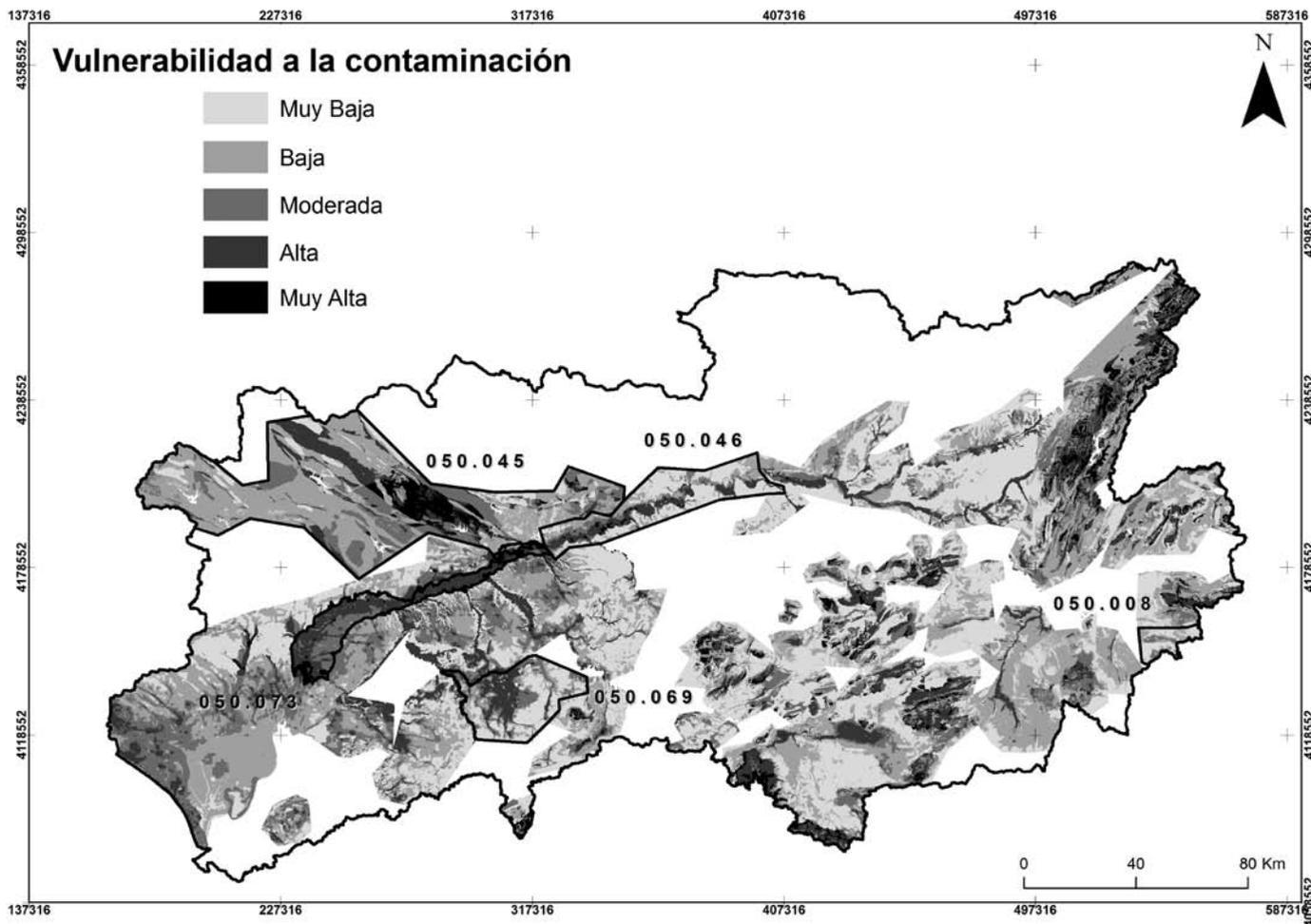


Figura 5. Vulnerabilidad intrínseca de las masas de agua subterránea a la contaminación en la Cuenca del Guadalquivir.
Figure 5. Intrinsic vulnerability of water bodies to contamination in the Guadalquivir basin.

Las clases de vulnerabilidad baja y muy baja se localizan en los bordes de las masas de agua, donde afloran los materiales de baja permeabilidad que definen los límites del acuífero. Además, estas clases de vulnerabilidad se detectan en las zonas donde el acuífero está confinado, en la mayoría de los casos por materiales margosos del Cretácico.

Presiones

Las mayores presiones a las que se encuentran sometidas las masas de agua subterránea de la Cuenca del Guadalquivir están relacionadas con la extracción de agua (cantidad) y la contaminación difusa por nitratos ligada principalmente a los regadíos (calidad). Las presiones puntuales están poco representadas y solo en algunos casos se han encontrado afecciones relacionadas con la presencia de escombreras y vertederos en zonas de permeabilidad alta.

En la Figura 4 se muestra una cartografía de síntesis del inventario de presiones efectuado, donde se indica la presencia o no de presiones significativas. Entre las presiones de carácter puntual destacan las balsas mineras, vertido de aguas de drenaje de minas, graveras, vertederos, industrias IPPC (prevención y control integrado de la contaminación debida a actividades industriales), gasolineras, piscifactorías, puntos de vertido y EDAR. Para su tratamiento homogéneo con otras capas del SIG, a las entidades puntuales se le ha asignado un *buffer* (entidad cartográfica circular) de 150 metros de radio a cada una. Como entidades de carácter lineal se han considerado autovías y líneas ferroviarias. Las fuentes difusas presentes en la Cuenca son las zonas de regadío, núcleos urbanos y todas las áreas relacionadas con infraestructuras urbanas. Como presión difusa significativa no se han considerado en este análisis las zonas de secano primando así, para focalizar en ellas las medidas, el resto de presiones.

Riesgo de contaminación

La mayor parte de los casos corresponde a niveles de riesgo bajo y muy bajo, que en conjunto suponen un 88,5 % del total de focos potenciales de contaminación, como se puede observar en la siguiente tabla resumen (Tabla 2), en la que se contempla el número de presiones existentes para cada tipo de riesgo.

Se han evaluado 29 presiones con un riesgo moderado correspondiendo a las tipologías expuestas en la Tabla 3. El valor del riesgo alto se ha obtenido únicamente en 3 presiones. Corresponden a 2 zonas urbanizadas sin red de alcantarillado y a una zona de cultivos en regadío.

Zonas de salvaguarda

El análisis conjunto de los criterios descritos anteriormente (perímetros de protección, vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, presiones, peligrosidad y riesgo de contaminación) mediante el uso de las herramientas de análisis espacial del SIG nos ha permitido delimitar una primera zonificación de zona de salvaguarda (Figura 6).

Para su delimitación se han tenido en cuenta varios criterios en relación a los resultados obtenidos en los apartados anteriores.

La extensión de las zonas de salvaguarda delimitadas suponen un total de 5.608 km², lo cual representa el 9,74 % del total del territorio de la Cuenca del Guadalquivir.

Respecto a los diferentes tipos de acuíferos, las zonas de salvaguarda tienen una extensión de 2.649 km² en las masas de agua carbonatadas mientras que en los acuíferos detríticos y mixtos representan un área de 1.195 y 1.764 km² respectivamente.

La mayor proporción de zonas de salvaguarda delimitada en masas de agua carbonatadas se debe a la menor protección que posee este tipo de acuíferos frente a la contaminación debido a su heterogeneidad

| Presiones de riesgo moderado | |
|---|---------------------|
| Tipo de presión | Número de presiones |
| Carreteras | 5 |
| Cultivos | 5 |
| Zona urbanizada con red de alcantarillado | 4 |
| Taller mecánico | 4 |
| Escombreras | 3 |
| Granja de animales | 3 |
| Estación de servicio | 2 |
| Vertido de aguas residuales urbanas | 1 |
| Fosa séptica | 1 |
| Mina de minerales metálicos | 1 |

Tabla 3. Presiones de riesgo moderado en la Cuenca del Guadalquivir.

Table 3. Pressures of moderate risk in the Guadalquivir basin.

y anisotropía. Lo anteriormente indicado se manifiesta, por ejemplo, en las proximidades de Granada donde existen bastantes acuíferos carbonatados y de naturaleza kársticas.

En esta zona de la Cuenca del Guadalquivir también existe un número mayor de estudios hidrogeológicos de detalle para la delimitación de perímetros de protección los cuales han sido llevados a cabo por el IGME. Estos perímetros, según la metodología propuesta, han sido incluidos en las zonas de salvaguarda delimitadas.

Por último, es necesario destacar que en la delimitación final de las zonas de salvaguarda de la Cuenca del Guadalquivir se han considerado los criterios que describen el funcionamiento hidrogeológico así como los diferentes controles descritos en el apartado de metodología del presente trabajo.

| Evaluación del riesgo | Número de presiones | Porcentaje |
|-----------------------|---------------------|------------|
| Muy Bajo | 60 | 22,0% |
| Bajo | 182 | 66,5% |
| Moderado | 29 | 10,5% |
| Alto | 3 | 1,0% |
| Total | 274 | 100,0% |

Tabla 2. Riesgo de contaminación en relación al número de presiones en la Cuenca del Guadalquivir.

Table 2. Risk of contamination and numbers of pressure points in the Guadalquivir basin.

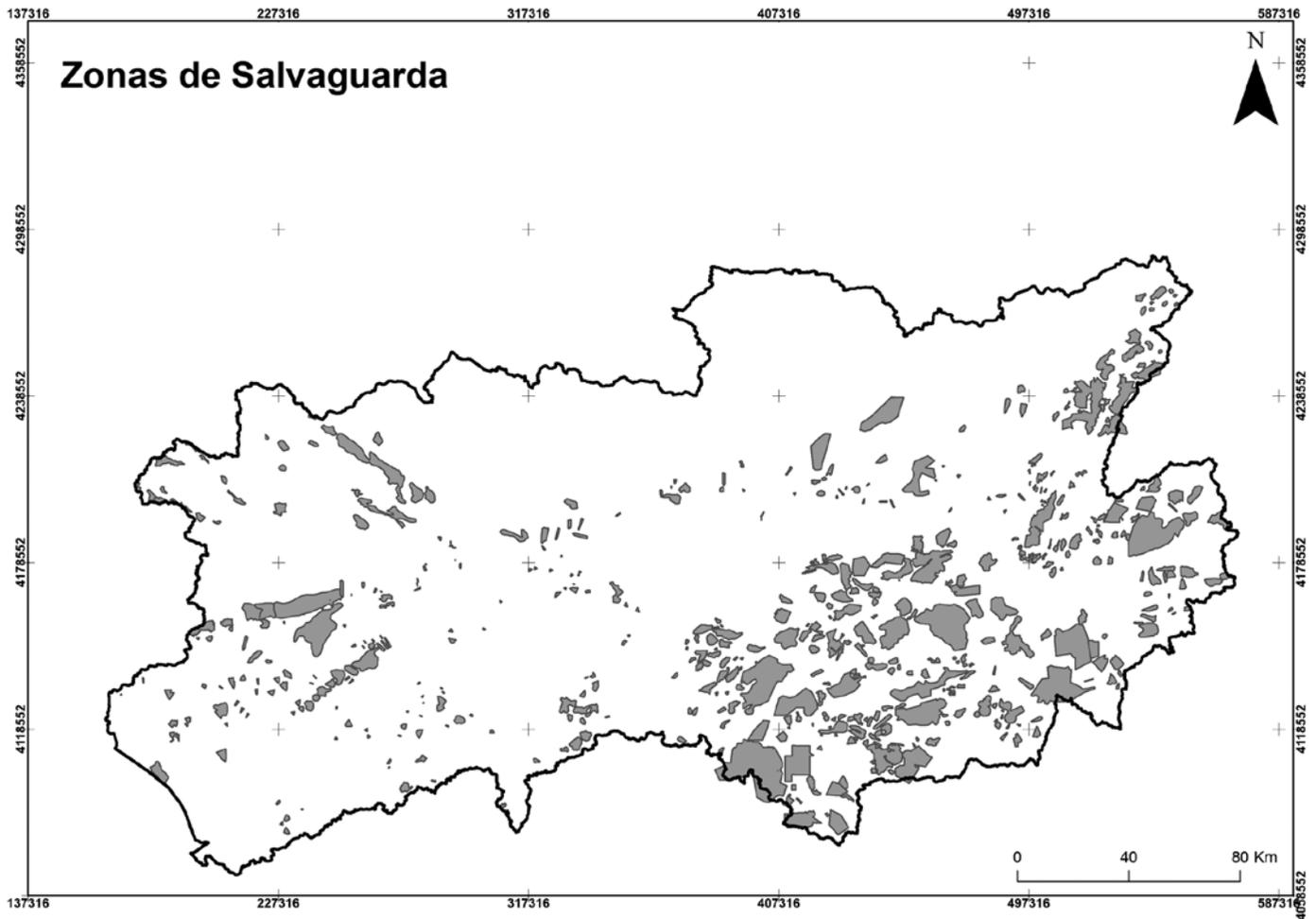


Figura 6. Zonas de salvaguarda delimitadas en la Cuenca del Guadalquivir.
Figure 6. Safeguard zones in the Guadalquivir basin.

Conclusiones

En este trabajo se presenta una estrategia de protección del agua subterránea empleada para consumo humano en la Cuenca del Guadalquivir con objeto de poder cumplir con los requisitos impuestos por la Directiva Marco del Agua. A pesar de la no obligatoriedad de la delimitación de las zonas de salvaguarda, ya que es una opción recomendada en el artículo 7.3 de la DMA, en contextos climáticos como el de la zona de estudio, es importante su delimitación puesto que el factor de dilución y dispersión de posibles contaminantes es, en determinados periodos menos lluviosos, prácticamente despreciable.

Se han definido perímetros de protección, áreas con presión a la contaminación, distribución de la vulnerabilidad y del riesgo a la contaminación.

Las herramientas de análisis espacial que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica han permitido realizar una mejor aproximación a la delimitación

de las zonas de salvaguarda, tanto en las fases de análisis parcial como en la propuesta final de los sectores propuestos. Para ello se han propuesto varias fases de trabajo con objeto de considerar todos los criterios posibles. En este sentido es necesario destacar la importancia de la cartografía de vulnerabilidad junto con la estimación del riesgo de contaminación para la definición de las zonas de salvaguarda.

Los resultados obtenidos para proteger la calidad del agua subterránea empleada para consumo humano en la Cuenca del Guadalquivir así como las zonas de salvaguarda delimitadas representan el 9,74 % de la totalidad de la superficie de la cuenca y son, en general, coherentes con la actividad socioeconómica existente en ella.

Los resultados obtenidos permiten focalizar las medidas de protección en las zonas de salvaguarda. Para ello, es necesario dotarlas de un listado de actividades permitidas y próvidas que permita compatibilizar la salvaguarda de la calidad del agua subterránea des-

tinada al consumo humano con la actividad socioeconómica.

Una vez creadas estas medidas de protección, tienen que integrarse en el programa de medidas e incluirse en el Plan Hidrológico de cada demarcación. El traslado a la normativa urbanística de las restricciones a diversas actividades que conlleven se efectuará a través del Comité de Autoridades Competentes que incluye a las Confederaciones, Comunidades Autónomas y Diputaciones entre otros.

La metodología propuesta y aplicada es completamente extrapolable a cualquier zona de estudio debido a que la Cuenca del Guadalquivir donde se ha aplicado presenta una gran complejidad desde el punto de vista hidrogeológico y de las actividades socioeconómicas existentes.

Referencias

- Aller, L., Bennett, T., Leer, J., Petty, J. and Hackett, G. 1987. *DRASTIC: A standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. US Environmental Protection Agency. Oklahoma, 455 pp.
- Civita, M. and De Maio, M. 1997. *SINTACS Un sistema paramétrico per La valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli all'inquinamento. Metodologia e automazione*. Bologna, 191 pp.
- CHG 2007. *Descripción General de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir*. Estudio Técnico.
- Clarke, R. 1994. "Human Identification in Information Systems: Management Challenges and Public Policy Issues". *Information Technology & People*, 7(4), 6-37.
- De Ketelaere, D., Hötzl, H., Neukum, C., Civita, M. y Sappa, G. 2004. Hazard analysis and mapping. In: Zwahlen, F. (ed.), *COST Action 620 Final report*. Brussels, Luxembourg, 86-105.
- De Villiers, M. 2000. *Water: The Fate of our Most Precious Resource*. Houghton Mifflin Company, New York.
- DGOHCA and IGME 2002. *Evaluación de la vulnerabilidad en la Cuenca del Guadalquivir*. Madrid, IGME.
- DGOHCA and CEDEX 2002. *Evaluación de la vulnerabilidad en la Cuenca del Guadalquivir*. Madrid, CEDEX.
- Ducci, D. 2000. GIS techniques for mapping groundwater contamination risk. *Natural Hazards*, 20, 279-294.
- Dunning, D.J., Ross, Q.E. and Merkhofer, M.W. 2000. Multi-tribute utility analysis; best technology available; adverse environmental impact. Clean Water Act: Section 316 (b). *Environmental Science Policy*, 3, 7-14.
- Falkenmark, M. and Lundqvist, J. 1997. Towards water security: political determination and human adaptation crucial. *Natural Resources Forum*, 21 (1), 37-51.
- Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden, W. and Van Waegeningh, H. (eds.) *Vulnerability of soil and groundwater to pollution*. The Hague, 69-86.
- Foster, S.S.D. and Hirata, R. 1988. *Groundwater pollution risk assessment: a method using available data*. WHO-PAHO/HPE-CEPIS. Technical Manual, Lima, Perú, 81 pp.
- Foster, S.S.D. and Skinner, A.C. 1995. *Groundwater Protection: the science and practice of land surface zoning*. IAHS Publ. no.225.
- Goldscheider, N., Brechenmacher, J., Hötzl, H. and Neukum, C. 2004. Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers. In: *Informe final de la Acción COST 620, EUR 20912, cap. Applications: Engen, Swabian Alb, Germany*, 200-217. European Commission, Directorate General for Research, Luxembourg.
- Hajkovicz, S. and Collins, K. 2007. A review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management. *Water Resources Management*, 21, 1553-1566.
- Hötzl, H., Delporte, C., Liesch, T., Malik, P., Neukum, C. and Svasta, J. 2004. Risk mapping. Hazard analysis and mapping. In: Zwahlen, F. (ed.), *COST Action 620. Final report*. Brussels, Luxembourg.
- Jiménez-Madrid, A., Martínez, C., Luque, J.A., Zuazo, J.A. y Jiménez, P. 2010a. *Wellhead protection areas delimitation in karstic aquifers. Application in Guadalquivir river basin (Spain)*. Páginas 305-310. In: Andreo, B.; Carrasco, F.; Durán, J.J. and Lamoreaux, J.W. (eds.), *Advances in research in karst media*. Springer.
- Jiménez-Madrid, A., Martínez-Navarrete, C. and Carrasco-Cantos, F. 2010b. Groundwater risk intensity assessment. Application to carbonate aquifers of the western Mediterranean (Southern Spain). *Geodinamica Acta*, 23(1-3), 101-111.
- Jiménez-Madrid, A., Martínez-Navarrete, C., Carrasco-Cantos, F. and Vernoux, J.F. 2011. Comparative analysis of intrinsic groundwater vulnerability assessment methods for carbonate aquifers. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 44, 361-371.
- Lallemand-Barrès, A. and Roux, J.C. 1999. *Périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée a la consommation humaine*. BRGM. France, 334 pp.
- Loukas, A., Mylopoulos, N. and Vasiliades, L. 2007. A modeling system for the evaluation of water resources management strategies in Thessaly, Greece. *Water Resources Management*, 21 (10), 1673-1702.
- Martínez Navarrete, C. and García García, A. 2003. *Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano: metodología y aplicación al territorio*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 276 pp.
- Martínez Navarrete, C., Grima Olmedo, J., Durán Valsero, J.J., Gómez Gómez, J.D., Luque Espinar, J.A. and de la Orden Gómez, J.A. 2008. Groundwater protection in Mediterranean countries after the European Water Framework directive. *Environmental Geology*, 54, 537-549.
- Martínez-Navarrete, C., Jiménez-Madrid, A., Sánchez-Navarro, I., Carrasco-Cantos, F. and Moreno-Merino, L. 2011. Conceptual framework for protecting groundwater quality. *International Journal of Water Resources Development*, 27 (1), 227-243.
- Moreno Merino, L. and Martínez Navarrete, C. 1991. *Guía metodológica para La elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. Ins-

- tituto Tecnológico Geominero de España. Madrid, 290 pp.
- Sánchez, D. 2010. *Aplicación de la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE en la cuenca hidrográfica del río Guadalhorce (Málaga). Caracterización Inicial*. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga, 493 pp.
- Tsakiris, G. 2004. *Meteorological Drought Assessment. Report for the European Research Project MEDROPLAN (Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning)*, Zaragoza, Spain.
- UNESCO 2006. *Water a shared responsibility. 2º Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo*. ONU-Agua/WWAP/2006/3. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, París.
- Unión Europea 2000. *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de Octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas*. DO L 327 de 22-12-2000.
- Van Ast, J.A and Boot, B. 2003. Participation in European water policy. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 555-562.
- Vías, J.M. 2005. *Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del Sur de España*. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga, 421 pp.
- Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I. and Jiménez P. 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 14, 912-925.
- Vrba, J. and Zoporozec, A. 1994. *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. Hannover, 131 pp.
- Volk, M., Liersch, S. and Schmidt, G. 2009. Towards the implementation of the European Water Framework Directive. Lessons learned from water quality simulations in an agricultural watershed. *Land Use Policy*, 26 (3), 580-588.
- Wang, W. 2006. Optimal environmental Management strategy and implementation for groundwater contamination, prevention and restoration. *Environmental Management*, 37, 553-566.
- WWAP 2006. *The State of the Resource. World Water Development Report 2, Chapter 4. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos*, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, París.

Recibido: enero 2012

Revisado: abril 2012

Aceptado: abril 2012

Publicado: enero 2013