

## **Estudio hidroquímico y caracterización de los materiales acuíferos del aluvial del Guadalquivir en el sector Mengíbar-Marmolejo (Provincia de Jaén)**

Leticia Díaz Beltrán, Rosario Jiménez Espinosa, M<sup>a</sup> Carmen Hidalgo Estévez

*Programa de Doctorado "Geología y Recursos Naturales". Departamento de Geología. Universidad de Jaén. Campus Las Lagunillas s/n, 23071, Jaén.*

[ldiazbel@ujaen.es](mailto:ldiazbel@ujaen.es)

### **Resumen**

Las prácticas agrarias que implican la utilización significativa de fertilizantes constituyen el factor principal de alteración de la calidad de las aguas subterráneas, destacando la contaminación por compuestos de nitrógeno. En este trabajo se pretende determinar la influencia de la actividad agrícola sobre la química de las aguas del acuífero aluvial del Guadalquivir en el sector Mengíbar-Marmolejo. Los sistemas de riego aplicados, junto con el abuso en el empleo de fertilizantes, exceden la capacidad de desnitrificación del terreno y originan en amplias zonas de cultivo unos contenidos de nitrato superiores a los establecidos por la normativa vigente.

### **INTRODUCCIÓN**

El nitrato es el contaminante más común encontrado en acuíferos superficiales debido a su aporte por parte de fuentes tanto puntuales como difusas. La afección de la calidad natural de las aguas subterráneas por elevadas concentraciones de nitratos aún no está generalizada en la provincia de Jaén, sin embargo, existen algunos sectores donde las aguas destinadas prioritariamente al riego presentan contenidos por encima de los 50 mg/l (concentración máxima admisible establecida en la Reglamentación Técnico-sanitaria vigente para el abastecimiento y control de la calidad de las aguas potables), atribuyéndose el origen de esta afección a las prácticas agrarias. Con estas premisas la administración autonómica procedió a la designación de tres zonas vulnerables a la contaminación por nitratos, coincidiendo con áreas de gran desarrollo agrícola, en los términos municipales de Andújar, Marmolejo y Villanueva de la Reina (IGME, 2002, *Abastecimientos, Aguas Subterráneas y Nitratos en la Provincia de Jaén* 31).

El acuífero aluvial del río Guadalquivir constituye un elemento primordial en nuestra área de trabajo, en la medida en que representa un pilar básico en el abastecimiento urbano y satisface las necesidades de agua para riego y consumo industrial.

La presión agrícola a la que está sometido este acuífero constituye pues su principal amenaza, tanto por el aumento en la demanda de agua por parte del sector primario, como por el empeoramiento de la calidad del recurso debido al uso abusivo de fertilizantes y a prácticas de riego inadecuadas. Además, las explotaciones ganaderas y la actividad industrial de la zona constituyen, de igual forma, focos de contaminación de carácter local.

## MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

Desde el punto de vista geológico, el acuífero aluvial del río Guadalquivir se enmarca en la unidad geológica desarrollada en la Depresión de dicho río (Fig. 1a). Los materiales de este dominio, que aparecen representados en nuestra zona de trabajo, pertenecen al Mioceno Superior y se hallan discordantes sobre el Carbonífero del Macizo Hercínico, el Triásico de la Cobertera Tabular e incluso sobre las rocas intrusivas de la Meseta. Principalmente se depositaron materiales detríticos como arcillas, limos, arenas y gravas, procedentes de los relieves circundantes y sedimentos carbonatados como margas y calcarenitas. Más hacia el sur estos materiales descansan sobre el Olistostroma del Guadalquivir, constituido por afloramientos de margas y arcillas con importantes intercalaciones de yesos con una disposición caótica. (Marín et al., 2001, *Proedecan y Geología y Gestión* 184)

Desde el punto de vista hidrogeológico, las margas de la Depresión del Guadalquivir presentan un comportamiento acuitardo, siendo los niveles de conglomerados y calcarenitas miocenos y los depósitos de material detrítico cuaternario los que podrían tener cierto interés como acuíferos. Los materiales que conforman el acuífero detrítico objeto de estudio corresponden a recubrimientos de génesis fluvial de edad cuaternaria, que conforman el sistema de terrazas del mismo. Se diferencian cinco niveles de terraza constituidas por tramos conglomeráticos o de gravas con matriz limo-arcillosa y, en menor medida, arenosos, siendo éstos más abundantes hacia la parte alta (Fig. 1b). El espesor oscila entre 5 y 10 m.

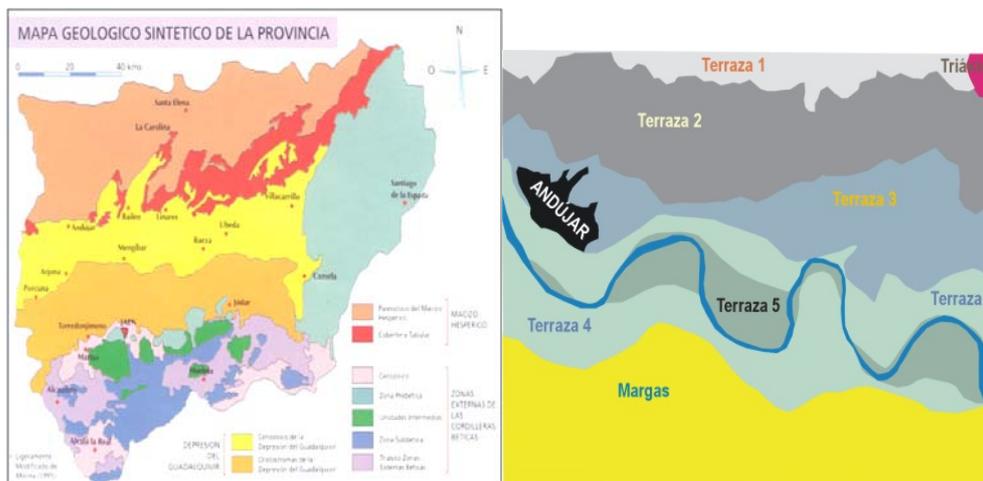


Figura 1: a) Mapa geológico representativo del sector estudiado; b) Mapa geológico de detalle del área de Andujar.

## CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Desde el punto de vista hidrogeológico se distinguen dentro del sistema de terrazas dos grandes conjuntos:

-*Terrazas medias y alta*: los tramos acuíferos encontrados en este sector constituyen niveles de terraza colgados topográficamente respecto del aluvial

actual, situándose por encima del sistema sin conexión hidráulica aparente. Se trata de materiales con un comportamiento acuitardo, por el carácter semipermeable de este grupo de depósitos, condicionado por la existencia de niveles de limos intercalados en los conglomerados y arenas, responsable de las diferencias de captación de agua entre unos puntos y otros. Su potencia puede variar fuertemente de unos sectores a otros, y, además, se encuentran colgados a unos 10-40 m sobre el cauce del río Guadalquivir, drenando a través de manantiales que pueden alcanzar caudales de hasta 10 l/s.

*-Terraza baja y depósitos aluviales cuaternarios de relleno del cauce y llanura de inundación del río Guadalquivir:* constituyen una lámina de materiales detríticos situados sobre los materiales margosos del Mioceno superior. Por su naturaleza, predominantemente conglomerados y arenas, localmente con limos, se catalogan como materiales semipermeables a permeables, dependiendo del predominio de una u otra litología. Presentan un desarrollo continuo en todo el sector estudiado, con una potencia media del orden de 8 a 10 m. Estos materiales constituyen una unidad acuífera, por su carácter permeable, su ubicación en el fondo del valle y su relación con el río Guadalquivir hacen que presente un gran interés desde el punto de vista hidrogeológico

De la información piezométrica obtenida a partir de la campaña de muestreo de puntos de agua realizada, se observa que las isopiezas (Figura 2) se disponen de forma perpendicular a los límites impermeables del sistema (margas miocenas).

El flujo subterráneo presenta una tendencia general de este a oeste, siguiendo el curso del río Guadalquivir. La información del mapa revela que el río en el sector estudiado es ganador. Esta relación río-acuífero puede cambiar espacial y temporalmente, dependiendo de las oscilaciones del nivel freático en el acuífero.

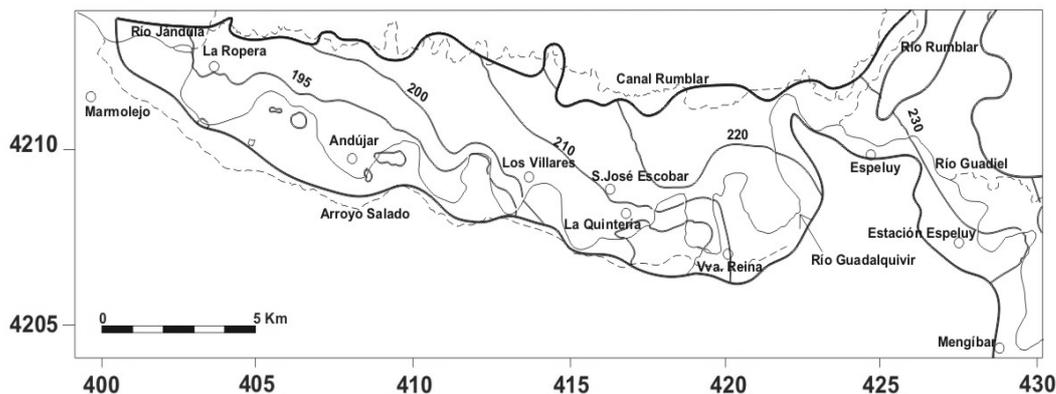


Figura 2. Mapa de isopiezas correspondiente al período Abril-Junio de 2003. Los valores se expresan en m.s.n.m.

## HIDROQUÍMICA

Se han calculado los estadísticos básicos de las variables (Tabla 1), la matriz de correlación de estas variables (Tabla 2), así como el Diagrama de Piper para mostrar las facies hidroquímicas (Figura 4).

	Cond.	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	P	Mg <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
<b>Media</b>	1473	81.2	115.4	0.1	72.8	72.9	14.2	70.9	296.8	0.6
<b>Mediana</b>	1461	68.5	93.5	0.04	64.5	67	7	68	251	0.1
<b>Varianza</b>	324327	2820.2	7596.8	0.05	1410	1636.4	711.9	2330	40672	4.2
<b>D.Típica</b>	569	53.1	87.2	0.2	37.5	40.5	26.7	48.3	201.7	2.1
<b>Mínimo</b>	308	16	18	0.04	16	7	1.9	8	40	0.1
<b>Máximo</b>	3000	269	432	1.6	199	206	180	195	819	13
<b>C.V. (%)</b>	39	65.4	75.6	248.4	51.5	55.5	188	68.1	68	314.7

Tabla 1. Estadísticos básicos de los análisis realizados en la campaña de muestreo. Conductividad expresada en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e iones en  $\text{mg}/\text{l}$ .

A continuación se presentan y comentan los resultados obtenidos para los parámetros más relevantes desde el punto de vista hidroquímico.

**Conductividad:** este parámetro presenta un valor medio de  $1473 \mu\text{S}/\text{cm}$  y una mediana de  $1461 \mu\text{S}/\text{cm}$ ; estos valores son ligeramente diferentes debido a que el valor medio se ve afectado por valores extremos de este parámetro. El máximo se sitúa en  $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que el mínimo no supera los  $308 \mu\text{S}/\text{cm}$ . En general, la conductividad presenta valores más elevados en la margen izquierda del río situándose siempre en torno a los  $2000$  y  $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Este grado elevado de mineralización de las aguas del aluvial del Guadalquivir está condicionado por la presencia de olistolitos triásicos salinos al sur de la zona de estudio, lavados por el río Guadalbullón y otros arroyos de menor entidad que descargan sus agua en el Guadalquivir. Estos valores se suavizan conforme avanzamos tanto hacia el Noreste como hacia el Noroeste. En la margen derecha del río se sitúan los pozos de salinidad más baja ( $800 - 1500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), donde los arroyos discurren por los materiales silicatados del Macizo Ibérico.

**Calcio:** El origen natural de este ión en estas aguas está en la disolución de los cantos de carácter carbonatado que constituyen la matriz del acuífero y en la disolución de las rocas evaporíticas, principalmente yeso y anhidrita. El rango de variación de este catión en la zona de estudio oscila entre  $16-269 \text{ mg}/\text{l}$ . El valor medio es de  $81.2 \text{ mg}/\text{l}$ , bastante alejado de la mediana,  $68.5 \text{ mg}/\text{l}$ . por tanto el coeficiente de variación es elevado,  $65\%$ .

**Magnesio:** este ión presenta un comportamiento geoquímico y una distribución espacial muy similar al calcio. Su contenido medio es de  $72.8 \text{ mg}/\text{l}$ , ligeramente diferente a su mediana,  $64.5$ . Los valores registrados se sitúan entre  $16-199 \text{ mg}/\text{l}$  y su coeficiente de variación es relativamente alto,  $51\%$ . Toda la margen izquierda del río Guadalquivir presenta elevados contenidos en este catión, circunstancia que nos hace pensar en la disolución de materiales carbonatados y evaporíticos del Olistostroma.

**Cloruro:** es uno de los iones más comunes en las aguas y generalmente se encuentra asociado al ión sodio, presentando un elevado índice de correlación ( $r=0.847$ ). Su origen natural en el aluvial del Guadalquivir se debe fundamentalmente al lavado de rocas evaporíticas (halita) asociadas a los yesos de los olistolitos triásicos.

**Sulfato:** el origen de este anión en las aguas del aluvial del Guadalquivir se debe principalmente a la disolución de materiales evaporíticos (yeso, anhidrita) del olistostroma situado al Sur. Señalar la presencia en la margen izquierda del río de elevadas concentraciones de este anión y la estrecha correlación que lo une al

calcio ( $r=0.838$ ), mostrando la relación litológica existente. El contenido de sulfato en las aguas del aluvial oscila entre 40-819 mg/l. El valor medio es de 296.8 mg/l y la mediana de 251 mg/l; ambos valores difieren bastante por lo que el coeficiente de variación para este parámetro es alto, 68%. El empleo en muchas parcelas de cultivo de la zona de sulfato amónico como fertilizante constituye otra importante fuente de origen para este anión.

**Compuestos nitrogenados:** la fijación del nitrógeno atmosférico y los aportes del agua de lluvia constituyen la principal fuente natural de compuestos nitrogenados de las aguas subterráneas. Sin embargo, las actividades humanas, y, entre ellas, la aplicación de fertilizantes nitrogenados para el desarrollo de los cultivos son las proveedoras de la mayor parte del nitrógeno detectado en las aguas subterráneas. La elevada solubilidad de estos compuestos los hace fácilmente lixiviables por el riego o la lluvia, alcanzando éstos las zonas no saturada y saturada de los acuíferos. Otras posibles fuentes antrópicas de nitrógeno los constituyen los lixiviados de residuos sólidos, la reutilización de las aguas residuales para riego o su vertido sin depurar, los residuos ganaderos e industriales. Concretamente en esta zona encontramos alpechines, depositados en balsas excavadas directamente sobre el terreno sin ningún tipo de acondicionamiento, con el consiguiente riesgo de vertido accidental y/o filtración al acuífero. En las aguas subterráneas del acuífero del Guadalquivir los contenidos en nitrato varían entre 5-206 mg/l, siendo el valor medio de 72 mg/l y la mediana 67 mg/l. El coeficiente de variación es del 57%. El 75% de las muestras analizadas superan con creces la concentración máxima admisible establecida por la normativa para el consumo humano (50 mg/l). Para la utilización como agua de riego la normativa no establece ningún límite específico, pero niveles que excedan los 100 mg/l se consideran nocivos para los cultivos de mayor sensibilidad. Las altas concentraciones de este anión se presentan de forma difusa en toda el área de trabajo, lo que implica un empleo generalizado de este tipo de fertilizante en toda la zona de estudio. No obstante, la presencia de niveles altos de nitrato distribuidos por toda el área no impide, a su vez, la existencia de zonas donde los valores registrados son máximos, como los entornos de Villanueva de la Reina y La Quintería. En el primer caso, se ha observado la presencia de cooperativas aceiteras en las proximidades de estos puntos, que podrían originar vertidos de carácter local. Esta contaminación es más acusada por el alto grado de movilidad que presentan los nitratos; en el segundo caso el riego por inundación para el cultivo de remolacha, espárragos, algodón y maíz puede movilizar también a este anión, transportándolo a las capas freáticas.

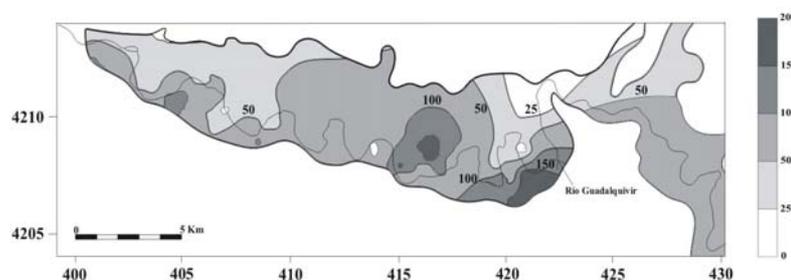


Figura 3. Mapa de isocontenidos en nitratos (mg/l) de las aguas subterráneas (Abril-Junio'03)

De forma general, el contenido de nitratos se muestra ligeramente más elevado en la zona de vega de la margen izquierda del río Guadalquivir. Precisamente en este área se registra un mayor número de extracciones de agua subterránea para la agricultura que en la margen norte (ya que por ésta discurre

el canal del Rumblar, empleándose mayor cantidad de agua superficial para el riego). El mayor empleo de agua subterránea en la margen sur provoca una mayor recirculación de las aguas del acuífero por las extracciones realizadas, lo que explicaría la mayor mineralización de este margen. En cuanto al ión amonio, su distribución es bastante homogénea por toda la zona de estudio (0.1-0.5 mg/l); estas concentraciones se relacionan con la aplicación de fertilizantes amoniacales. No obstante existen tres focos localizados donde se alcanzan mayores contenidos de amonio, entorno a 10-13 mg/l. Uno de ellos está directamente relacionado con la presencia de purines de una ganadería cercana; los otros dos pueden deberse a condiciones reductoras en el agua así como a la fertilización amoniacal.

**Potasio y Fósforo:** Ambos se distribuyen de manera uniforme por toda el área de trabajo, con concentraciones poco elevadas; únicamente se registran valores anómalos en focos localizados en zonas donde el tipo de abono empleado presenta altas dosis de estos compuestos. Para el potasio los valores se sitúan en el rango 1.9-180 mg/l, siendo el valor medio 14.2 mg/l. Por su parte el fósforo oscila entre 0.01-1.6 mg/l. Se aprecia una elevada correlación entre ambos ( $r=0.89$ ) lo que podría indicar un origen común debido a las prácticas de fertilización de cultivos aplicadas en ciertos sectores de la zona de estudio.

### Correlación entre variables

La matriz de correlación entre las variables medidas permite establecer las posibles relaciones iónicas de las aguas subterráneas del acuífero estudiado. Los altos valores del coeficiente de correlación entre conductividad, calcio, sodio, cloruro y sulfato, ponen de manifiesto que la disolución de materiales evaporíticos (yeso y halita) condiciona significativamente el grado de mineralización de las aguas subterráneas, sobre todo en la margen izquierda del río. A esto hay que añadirle la alta correlación existente entre sulfato y calcio, y cloruro y sodio, lo que indica un origen común de esos iones por disolución de yeso y halita, respectivamente. Por último, cabe señalar la asociación detectada entre fósforo y potasio, con un coeficiente de correlación muy elevado. Este hecho, junto con la correlación negativa existente entre estos elementos y el nitrato pone de manifiesto la práctica de abonados diferentes en algunas zonas de la vega del Guadalquivir.

	pH	Conduct.	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	P
PH	1.000										
Conduct.	-0.372	1.000									
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.136	0.315	1.000								
Cl <sup>-</sup>	-0.288	<b>0.899</b>	0.238	1.000							
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.111	0.200	-0.219	0.202	1.000						
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.239	<b>0.840</b>	0.026	0.773	0.282	1.000					
Na <sup>+</sup>	-0.196	<b>0.875</b>	0.289	<b>0.847</b>	-0.081	0.745	1.000				
K <sup>+</sup>	0.100	0.122	0.710	0.050	-0.271	-0.085	0.095	1.000			
Ca <sup>2+</sup>	-0.407	0.796	0.132	0.717	0.109	<b>0.838</b>	0.611	-0.054	1.000		
Mg <sup>2+</sup>	-0.155	0.787	0.299	0.798	0.424	0.784	0.646	0.069	0.522	1.000	
P	-0.200	0.231	0.723	0.082	-0.426	-0.413	0.048	<b>0.89</b>	-0.154	0.151	1.000

Tabla 2. Matriz de correlación para las muestras de aguas subterráneas analizadas en el acuífero aluvial del río Guadalquivir.

### Facies hidroquímicas

Con el fin de sintetizar de forma directa las características hidroquímicas de

las aguas subterráneas analizadas se realizó un Diagrama de Piper en el que se observa el tipo de facies que éstas presentan (Figura 4).

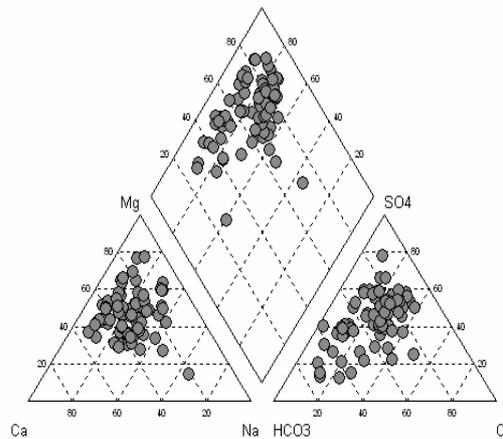


Figura 4. Diagrama de Piper para los puntos de agua muestreados.

La mayor parte de las muestras presenta facies de tipo mixto. Destacan la bicarbonatada-sulfatada cálcico-magnésica presente principalmente en la margen derecha del río, abarcando núcleos de población cercanos a Mengíbar, Espeluy, La Quintería, Los Villares de Andujar, Andujar y La Ropera, y la sulfatada clorurada cálcico-magnésica que se extiende por toda la margen izquierda del Guadalquivir (Villanueva de la reina, Los Cortijuelos, Llanos del Sotillo hasta Marmolejo). El aporte de calcio y magnesio típico en las facies de la zona de estudio se debe a la disolución de los materiales carbonatados que constituyen la matriz del acuífero. La evolución a una facies más sulfatada en la margen izquierda guarda relación con la presencia de materiales evaporíticos próximos a esta zona.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este estudio pone de manifiesto que la composición química de las aguas subterráneas en el aluvial del Guadalquivir están condicionadas por dos factores: las características geológicas del entorno próximo al aluvial del Guadalquivir y las actividades humanas existentes en la zona.

Analizando el entorno geológico, observamos cómo las margas miocenas de la Depresión del Guadalquivir constituyen los bordes impermeables de este acuífero detrítico. En la parte meridional de la zona de estudio, estos materiales presentan emplazamientos de olistolitos triásicos, formados por materiales evaporíticos cuyo lavado origina los contenidos registrados en sulfatos, sodio, cloruro, calcio y magnesio en la margen izquierda del río. Por otro lado, la margen derecha del río corresponde básicamente a materiales paleozoicos de carácter ígneo o metamórfico, poco proclives a contribuir a la mineralización de las aguas del acuífero, de ahí que las concentraciones en las principales sales sean menores.

El análisis hidroquímico realizado indica la existencia de dos posibles prácticas de abonado distintas. Por un lado, las concentraciones elevadas de fósforo y potasio se reflejan en zonas puntuales originadas por la fertilización con abonos potásicos y fosfatados. Por otra parte, el abonado nitrogenado presenta

una mayor difusión en toda el área de estudio (en forma amoniacal, urea y NPK). Esto origina una contaminación difusa en la misma, debido a la gran movilidad de este anión, además de máximos de concentración en focos localizados. De forma local, los purines producidos por las actividades ganaderas del sector estudiado pueden ocasionar valores anormalmente elevados en N, P y K.

La idoneidad de las aguas estudiadas para el consumo humano se define teniendo en cuenta los límites establecidos por la normativa española (Real Decreto 1138/1990 de 14 de septiembre de 1990). Así, la mayor parte de las muestras presentan contenidos en magnesio y nitrato que sobrepasan ampliamente la concentración máxima admisible establecida por la normativa en vigor (50 mg/l). En cuanto a los otros iones (sulfato, potasio y sodio) existe un número considerable de puntos que también sobrepasa los límites. Estos valores excesivamente elevados en varios parámetros analizados indican que las aguas de este acuífero detrítico no son aptas para abastecimiento. Si bien hay que aclarar que dado el carácter general de este estudio hidrogeológico, no se han investigado los posibles componentes tóxicos ni los caracteres microbiológicos que también hay que tener en cuenta a la hora de declarar la potabilidad de un agua.

En cuanto a la calidad para uso agrícola, únicamente ocho muestras presentan una calidad buena para riego según el sistema de clasificación USSLS (U.S. Salinity Laboratory Staff) que tiene en cuenta parámetros como la conductividad y la relación de adsorción de sodio. Éstas se localizan preferentemente en la margen derecha del río Guadalquivir, donde existe una menor mineralización de las aguas. Las aguas relacionadas con aportes más salinos por disolución de materiales evaporíticos, situadas en la margen izquierda, se clasifican como altamente salinas, con escasas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de sodio intercambiable. Las demás muestras se sitúan en una categoría intermedia entre las anteriores. Con este tipo de aguas se requiere un riego con grado medio a alto de lavado, dependiendo del drenaje del sector. Dado que se utilizan para el riego de los cultivos desarrollados sobre la terraza baja y los depósitos aluviales recientes, fundamentalmente, y que se riega por superficie y por aspersión mediante pivotes, con dotaciones de agua elevadas, no existen problemas de salinización relacionados con su uso en las zonas actuales de regadío.

El estudio realizado ha puesto de manifiesto la elevada vulnerabilidad a la contaminación que presenta el acuífero aluvial del Guadalquivir, por su carácter superficial y su elevada permeabilidad, que permite la rápida infiltración de los contaminantes procedentes de la fertilización de los cultivos asentados en sus márgenes.