



-Cada comunicación escrita tendrá una extensión mínima de 5 páginas y máxima de 30, y un tamaño máximo de 5 Mb.

-Tipo de letra: Arial 11 p.

-Interlineado: sencillo.

-Márgenes: superior 3,5; inferior 3; izquierdo 3; derecho 2,5.

-Alineación: justificada.

Eje 4: DESARROLLO RURAL

ST-15.- Agricultura, suelos y cambio climático.

Análisis del efecto de la extracción de agua para riego de un acuífero aluvial. Caso de estudio: Masa de Agua Subterránea (030.007) "Aluviales: Jarama-Tajuña" y Finca Experimental "La Isla" (IMIDRA, Arganda del Rey - Madrid)

Mostaza Colado, David (Universidad Rey Juan Carlos, IMDEA Agua); Carreño Conde, Francisco (Universidad Rey Juan Carlos, IMDEA Agua); Iepure, Sanda (IMDEA Agua)

1. Resumen / Abstract

La agricultura es uno de los sectores que más agua consume. Se estima que un tercio de las reservas de agua de Europa se destinan para abastecer estas necesidades. España es un país que cuenta con zonas con condiciones áridas o semiáridas; lo que obliga en muchas ocasiones al uso de sistemas de irrigación, pues de lo contrario la producción agrícola no sería viable. El agua necesaria para abastecer estos cultivos se obtiene generalmente a través de redes de transporte de agua (que conducen el recurso desde un punto donde es excedente a otro donde es deficitario) y necesitan de mantenimiento para evitar y/o minimizar las pérdidas, o mediante la extracción directa desde la fuente, como pueden ser una masa de agua subterránea (MAS), río, lago o embalse. Esto hace que el principal problema al que se enfrenta la gestión de los recursos hídricos sea la búsqueda de un nivel de consumo sostenible que permita el mantenimiento de la calidad tanto cuantitativa como cualitativamente y que no suponga un impacto sobre los ecosistemas asociados o el medioambiente. Las nuevas técnicas de irrigación y el empleo de sustancias fitosanitarias menos contaminantes, junto con políticas de gestión sostenible parece que están siendo eficaces en lo referente a la conservación de los recursos hídricos, logrando minimizar cada vez más los impactos.

Con el fin de estudiar el efecto que tiene la extracción de agua subterránea para riego en la relación existente entre las aguas superficiales y subterráneas en una zona de la MAS 030.007 "Aluviales: Jarama-Tajuña", y cómo se ve afectada la calidad química y las reservas de agua por factores externos, se ha llevado a cabo un seguimiento a lo largo de un año hidrológico en los pozos de una finca situada en el municipio de Arganda del Rey, Madrid.

En concreto, se ha analizado la evolución de la piezometría de la MAS y de la variación de los niveles del río Jarama y de la Laguna de El Campillo (Rivas-Vaciamadrid, Madrid);



las variables climáticas como las precipitaciones y temperatura; la variación de la calidad mediante el análisis químico de muestras de agua subterránea y superficial; y un muestreo estacional de la fauna de invertebrados en las aguas subterráneas del acuífero aluvial.

Los resultados ponen de manifiesto que el sentido del flujo entre la MAS y la superficie varía en función de la época del año y que los bombeos (puntuales y continuos) para la extracción de agua de riego generan un notable impacto sobre la MAS y las comunidades de invertebrados asociadas a ella.

Agriculture is one of the sectors that most water consumes. It is estimated that one third of the water reserves in Europe are intended to supply these needs. Spain is a country with several arid or semi-arid condition areas; often forcing the use of irrigation systems, otherwise the production would not be viable. The water needed to supply these crops is generally obtained through water networks (leading the resource from a point where it is surplus to another where it is weak), which requires maintenance to avoid and/or minimize losses; or by direct extraction from the source, as a groundwater body (GWB), river, lake or reservoir. The main problem that water resources management faces is finding a sustainable level of consumption that allows the maintenance of both quantitative and qualitatively quality, and doesn't involve an impact on associated ecosystems nor the environment. The new irrigation techniques and the use of less polluting plant protecting products, along with sustainable management policies seems to be effective in terms of conserving water resources and achieving a progressive impact minimization.

We have monitored a full hydrological year through the wells of a plantation located at Arganda del Rey (Madrid), coincident with an area of the GWB 030.007 "Aluviales: Jarama-Tajuña", to study the effects of the extraction of groundwater for irrigation in the connection between surface water and groundwater and how it affects the chemical quality and water reserves. We have analysed the evolution of the piezometric levels of the GWB and the variation of the Jarama River and the Laguna de El Campillo (Rivas-Vaciamadrid, Madrid) water tables; climate variables such as rainfall and temperature; the variation in quality through chemical analysis of groundwater and surface water samples; and seasonal sampling of invertebrate fauna in groundwater.

The results show that the water flow between the GWB and the surface varies depending on the time of year; also water pumping (timely and continuous) for irrigation generates a significant impact on the GWB and invertebrates communities associated to it. An integrated analysis of groundwater, coupling the assessment of hydrogeological features and biota, allows the decision-makers to set the appropriate measurements of management and protection of both waters and the living forms.



2. Introducción

El agua es un recurso valioso, con una alta demanda y fundamental para la vida y economía de todo tipo de sociedades. La disponibilidad de agua en cantidad y calidad suficientes al uso al que va a destinarse es uno de los pilares fundamentales para avanzar en el progreso y desarrollo humano. Es cierto que los recursos hidrológicos del planeta son renovables, pero también son cada vez más escasos y están más contaminados; por lo que se hace necesario poner el énfasis en su gestión, de manera que se favorezca el consumo sostenible de los mismos.

El sector agrícola, a su vez, demanda una elevada cantidad de agua para su mantenimiento. Según datos de la FAO, al final del siglo XXI el sector agrícola hacia uso del 70% de toda el agua empleada en el mundo, y estima que para 2030 el uso habrá aumentado un 14% adicional. En Europa, de media, esto supone un tercio de las reservas de agua (EEA, 2012). A este hecho se une que las áreas de superficie cultivable incrementan año tras año para la producción de alimento, lo que implica el uso de cada vez un mayor volumen de agua para el cultivo.

En la agricultura tradicional la elección de un cultivo venía determinada por la adaptación que este tuviese a las condiciones de humedad, precipitación, insolación, época del año, etc. del terreno o zona de la plantación. Mientras que la disponibilidad de agua para el cultivo venía determinada por las precipitaciones, zonas inundables o cercanía a fuentes de agua abundante como ríos, estanques o manantiales. Con la llegada de la revolución industrial, el incremento del uso de maquinaria, el desarrollo y mejora de la obra civil así como del transporte y almacenamiento de agua se hicieron cada vez más notable. Estos factores ya no suponían un límite al crecimiento de la agricultura y pasaron a ser los impulsores de su desarrollo. La disponibilidad de un terreno era ya el único requisito, puesto que el agua necesaria podía obtenerse mediante la extracción desde masas subterráneas, ríos, canales, trasvases o embalses, entre otros; y el resto de factores como la temperatura o insolación se podían controlar con el uso de invernaderos, por ejemplo. El desarrollo de la industria química mejoraría aun más el rendimiento de los cultivos gracias a la disponibilidad de fitosanitarios para reducir y/o evitar plagas de organismos e infecciones de microorganismos y al uso de fertilizantes para mejorar el crecimiento vegetal.

En resumen, el riego de un cultivo es un ciclo cerrado que implica la extracción de un volumen de agua con unas características físico-químicas y de calidad determinadas desde el acuífero o reservorio (embalse, lago o río); el empleo de este agua para el riego; y el retorno del excedente de agua de riego con las características físico-químicas y de calidad originales modificadas al subsuelo o cauces por infiltración o escorrentía. En la agricultura se emplean suplementos y/o fertilizantes naturales o de síntesis para mejorar el crecimiento vegetal junto a fitosanitarios para prevenir o eliminar plagas; estos compuestos químicos, algunos de ellos muy persistentes en el medio ambiente, son arrastrados por el excedente de agua de riego y se acumulan en los ecosistemas y en la fauna asociada a éstos. Por ello es importante conocer el estado ambiental y ecológico de una zona de cultivo, para poder determinar si las actividades que en ella se desarrollan tienen algún impacto significativo sobre la misma y/o sobre los ecosistemas acuáticos.

España, pese a ser uno de los países más áridos de la Unión Europea, cuenta con un gran potencial hidrogeológico. Posee una superficie permeable de unos 176.000 Km² de la que se ha estimado que recibe una recarga natural media de casi 21.000 Hm³ al año (Fernández, 2012). Actualmente existe legislación al respecto que protege a las MAS contra la degradación y contaminación. En concreto, el Real Decreto 1514/2009 (BOE,



2009) establece que las aguas subterráneas constituyen un recurso natural dotado de un significativo valor estratégico, cuya protección reviste especial interés para el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos de ellas dependientes y para el abastecimiento de agua potable. Es por ello que las masas de agua subterránea utilizadas para la extracción de agua potable, o que se pretendan utilizar con esa finalidad en el futuro, deben ser objeto de especial protección de modo que se evite el deterioro de su calidad, con objeto de reducir el nivel de tratamiento de purificación necesario para tal fin. Puesto que la legislación sólo contempla el uso de las MAS para abastecimiento de agua potable como elementos a proteger, se hace patente la necesidad de ampliar el inventario de MAS a aquellas que no cumplen con esta función pero que sí generan funciones o servicios ecológicos importantes. De igual modo, debería de incluirse el seguimiento de la calidad de aquellas MAS degradadas que puedan actuar como vectores de transporte de contaminación (por proximidad o conexión) hacia otras MAS en mejor estado, hacia masas de agua dependientes (humedales, lagos, ríos, etc.) o hacia ecosistemas de aguas subterránea o superficiales.

En este contexto surge el proyecto Smart-Hydro, que plantea un nuevo enfoque en el campo de la investigación TIC (Tecnologías de la Información y Comunicación) para la gestión eficiente de recursos hídricos. España no puede permanecer indiferente a la problemática y retos existentes en la gestión de los recursos naturales y el cambio climático. Smart-Hydro, se basa en la Directiva Europea del Agua y combina la experiencia de las TICs y de la investigación en el sector del agua (industria y ciencia) para la modernización de la tecnología en la gestión de recursos naturales.

Smart-Hydro hará hincapié en las soluciones TIC en relación con el manejo flujo masivo de datos, para fomentar soluciones informáticas avanzadas entre los diferentes actores y fases del consumo de agua (Figura 1). A través de infraestructuras realistas y seguras, las entidades de agua serán capaces de monitorizar en tiempo real los parámetros necesarios para optimizar el consumo y la distribución de agua. Smart-Hydro estima que con las mejoras realizadas en la recuperación de datos, se podrían desplegar nuevos planes para gestión del agua. Es decir, se promoverán soluciones inteligentes que faciliten los procesos de negocio actuales de los gestores del agua, optimización de la huella, actividades de concienciación e intercambio de información entre organismos científicos, los ciudadanos y los profesionales del agua.

Smart-Hydro ha sido planeado como un procedimiento de ingeniería en el que se desplegarán en un piloto de validación iterativa. A través de tales demostraciones en un ambiente real de ejecución, Smart-Hydro obtendrá retroalimentación de los resultados que permitirán mejorar el sistema y, en consecuencia, maximizar el impacto en los modelos de negocio actuales para la gestión del agua.

Además, entre las labores del proyecto se encuentra el caracterizar la zona de estudio en cuanto a calidad cuantitativa y cualitativa de los recursos hídricos y a la fauna que habita los ecosistemas asociados a la masa de agua subterránea (MAS) adyacente, puesto que sirven como bioindicadores del estado de conservación del ecosistema. A través del seguimiento de la evolución de las condiciones iniciales del sistema se podrá determinar si se ve afectado significativamente por los cultivos que se desarrollan en superficie. Aquí es donde radica la importancia de la caracterización y seguimiento del estado de las masas de agua, de modo que se puede plantear una gestión sostenible del recurso hídrico y ajustada a las necesidades reales del cultivo.

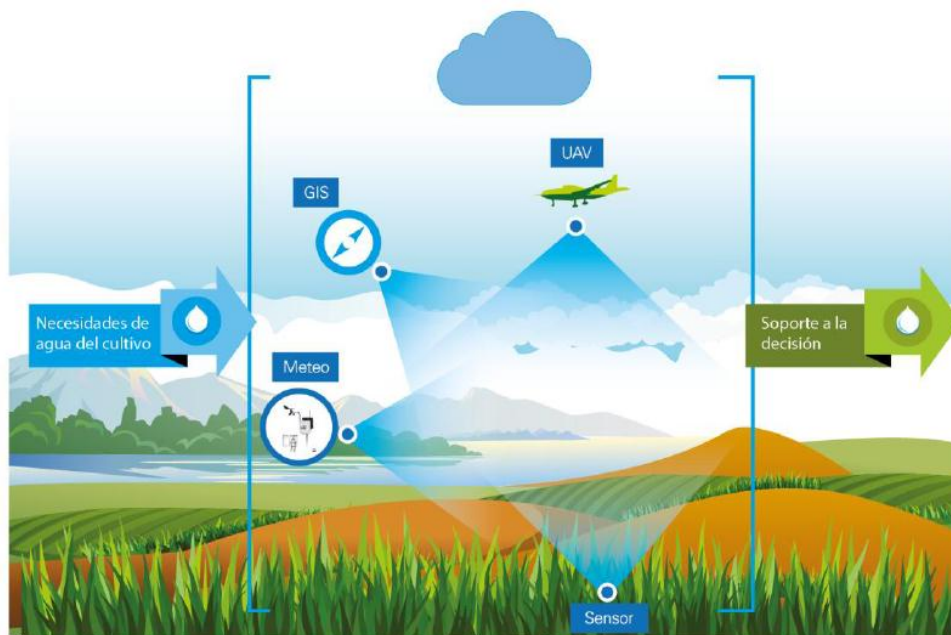


Figura 1. Visión general del proyecto Smart-Hydro

Por ello, en Smart-Hydro se está realizando el estudio hidrogeoquímico de parte de la MAS "Aluviales: Jarama-Tajuña" (clasificada con el código 030.007 por la Confederación Hidrográfica del Tajo). Esta MAS se caracteriza por sufrir un gran impacto debido a la alta concentración urbana y actividad industrial que se desarrolla a lo largo de las llanuras y terrazas (Martínez-Bastida et al., 2009) así como de numerosas graveras en activo y otras abandonadas que se han convertido en lagunas; además de contar con una extensa zona de vegas dedicada al cultivo de todo tipo de variedades vegetales (con menores y mayores demandas de agua) (Arauzo et al., 2008).

3. Materiales y métodos

Localización y caracterización de la zona de estudio:

La zona de estudio se ubica en España, al sureste de la Comunidad de Madrid; a 20 Km de la capital. Comprende parte de los municipios de Arganda del Rey y Rivas-Vaciamadrid, siendo su extensión de aproximadamente 2,25Km² (Figura 2). Abarca una parte del río Jarama, su valle y terrazas, así como de la Laguna de El Campillo. Estos elementos del paisaje se incluyen a su vez dentro del Parque Regional del Sureste de la Comunidad de Madrid; y se encuentran clasificados como Zona D, de explotación ordenada de los recursos naturales.

La región centro de la Península Ibérica (donde se sitúan los municipios de Arganda del Rey y Rivas-Vaciamadrid), pertenece al dominio de clima Mediterráneo Templado con características de Mediterráneo Continental. De acuerdo a la clasificación climática de Köppen este clima se tipifica como Csa. Se caracteriza por inviernos templados y veranos secos y cálidos, donde la mayor parte de las lluvias caen en invierno o en las estaciones intermedias. La temperatura media es de 13,8°C y la precipitación media asciende a 440 mm/año.

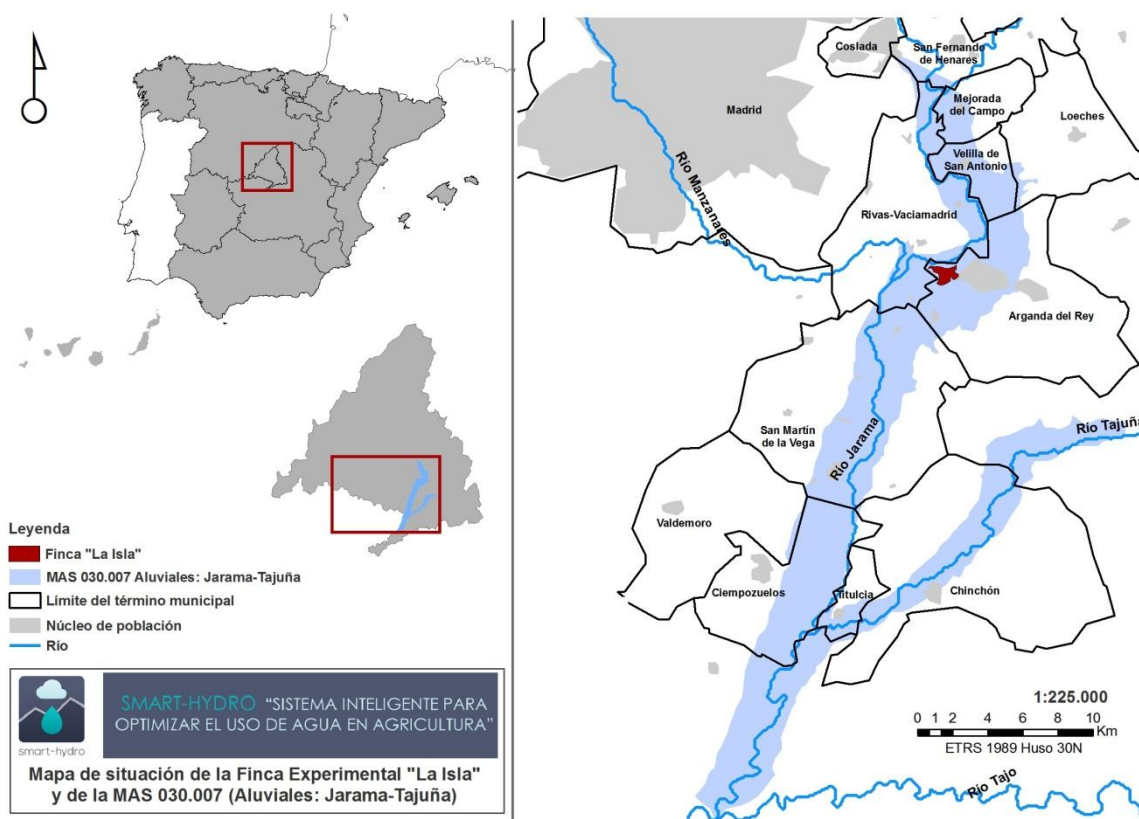


Figura 2. Localización de la zona de estudio.

Geológicamente la zona de estudio se encuentra en la cuenca continental Terciaria del río Tajo, en la zona de transición entre las facies detríticas intermedias y las facies centrales (de carbonatos y evaporíticas) (Urribelarrea et al., 2003). En su parte superficial esta cuenca está atravesada por el río Jarama, que la cruza de norte a sur. La geología está definida por el relleno de materiales terciarios de la Cuenca de Madrid, de origen continental y formado a partir de sucesiones de sedimentación con potencias de hasta 3500m (Racero, 1998 en Blanco García et al., 2007); sobre los que están situadas las formaciones cuaternarias asociadas a la dinámica fluvial del río. Estos materiales terciarios afloran a ambos lados del acuífero en cuatro unidades características (Blanco García et al., 2007):

- Yesos: conjunto más inferior consistente en paquetes gruesos de yesos y margas yesíferas.
- Margas: cubriendo el conjunto yesífero y de estratificación horizontal.
- Conglomerados: de gravas y arenas, pero con representación casi nula.
- Calizas: de carácter lacustre y con espesores inferiores a los 40m.

De manera general la zona está definida por dos unidades fisiográficas: Vegas y Vertientes. La primera ocupa toda la zona del valle, la otra se sitúa en los bordes de éste otorgando a la zona un relieve suave y alomado, donde los únicos accidentes topográficos se deben a los escarpes que marcan el límite entre unidades.

Los depósitos cuaternarios sobre los que circula el río están compuestos por sedimentos de origen fluvial principalmente (materiales detríticos de diferentes tamaños), aunque también los hay de origen eluvial y coluvial, pero de menor importancia. Bardají et al.



(1990) agrupan estos depósitos en tres conjuntos diferenciados, cada uno con una disposición concreta respecto a los niveles freáticos y los denominan inferior, medio y superior, en función de su posición física respecto al cauce del río. El conjunto inferior abarca los sedimentos actuales ubicados en el cauce del río, sedimentos de fondo de valle, llanuras de inundación y terrazas del río Jarama. La zona de terrazas distribuidas paralelamente a lo largo del cauce pueden llegar a espesores del orden de entre 3m y 10m (Panera et al., 2011) y están formadas por gravas de cuarcita y cuarzo, con algunos niveles de arenas y limos areno-arcillosos al techo, relacionados con la llanura de inundación, que pueden llegar a potencias de hasta 2m (Bardají et al., 1990). Se trata de terrazas de poco espesor pero de gran extensión, que se aprovechan para el cultivo agrícola en su mayoría. El conjunto medio incluye los niveles de terraza situados entre 15m y 30m por encima del cauce actual. Litológicamente este nivel es igual al inferior, pero los limos procedentes de la llanura de inundación presentan menor potencia (Bardají et al., 1990). El conjunto superior abarca los niveles de terrazas más altos (desde 40m hasta 120m) sobre el cauce del río. Son terrazas que han quedado colgadas y se encuentran separadas entre sí por materiales terciarios.

Por sus características geológicas las llanuras aluviales son zonas de gran interés para el sector de la minería extractiva (áridos, arenas y finos para construcción sobre todo). Históricamente esta zona se ha caracterizado por una elevada actividad extractiva, que ha generado un impacto considerable sobre el acuífero adyacente. La remoción de materiales ha supuesto la eliminación en diversas zonas de la zona no saturada de la Masa de Agua Subterránea (MAS) presente en la zona: "Aluviales: Jarama-Tajuña" (codificada por la Confederación Hidrográfica del Tajo con el código 030.007); dejando expuesta la capa freática. Ejemplo de ello son las lagunas de El Campillo, Las Madres, La Cigüeña o El Porcal; todas ellas en los alrededores de la zona de estudio.

De acuerdo a Bardají et al. (1990), el nivel freático en el acuífero oscila entre los 0,25m y 6m de profundidad en función de la zona. La descarga es directa hacia los ríos, debida en gran parte al flujo local de la zona de terrazas, aunque existe también un cierto flujo regional, mucho más lento procedente de las zonas de recarga, ubicadas en las zonas de interfluvio del río (Navarro Alvargonzález, 1993). Existen también masas de agua de menor entidad, situadas en las terrazas medias, que según Arauzo et al. (2008), no están conectadas con el acuífero aluvial principal. Se conocen algunos de los parámetros hidráulicos del acuífero en la zona de estudio gracias a ensayos de bombeo realizados en otros estudios. Bardají et al. (1990) estiman que los valores de transmisividad oscilan entre $632\text{m}^2/\text{día}$ y $3.500\text{m}^2/\text{día}$ y el coeficiente de almacenamiento es de 0,7. Carreño et al. (2013) realizan un modelo 3D de la zona de estudio y estiman su volumen total en $9,250\text{Hm}^3$, lo que teniendo en cuenta la porosidad del sistema representa unas reservas de aguas subterráneas de $1,250\text{Hm}^3$. Sandino Ramírez (2015) estima que la recarga total en el periodo comprendido de mayo de 2013 a mayo de 2015 asciende a $27,32\text{Hm}^3/\text{año}$; mientras que Boza Chappuis (2016) estima que la recarga oscila entre los $53,9\text{Hm}^3/\text{año}$ del año 2010 a los $28,2\text{Hm}^3/\text{año}$ del año 2015, estimando la recarga anual promedia en $41,8\text{Hm}^3/\text{año}$. Las diferencias en cuanto a volumen estimado de recarga y la capacidad del acuífero se deben a la alta conectividad hidráulica que existe entre este, el río y las terrazas.

Las aguas del acuífero se caracterizan, en general, por una deficiente calidad química; pudiendo presentar en algunos casos problemas bacteriológicos (en función de la zona). Son de escaso interés para el abastecimiento humano fuera de soluciones de emergencia (López-Camacho e Iglesias, 2000) empleándose en su mayoría para riego y usos industriales a través de captaciones particulares. El acuífero aluvial del Jarama es altamente susceptible a la contaminación y se clasifica como RQ-D (químico-difuso) y



RC-E (cuantitativo-extracción). La totalidad del acuífero no logra el buen estado químico requerido por la Directiva 2006/118/CE relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro (CHT, 2012); debido particularmente a la intensa actividad urbana, industrial, agrícola que se desarrolla en la superficie. Lo que genera una elevada cifra de vertidos directos y difuso tanto depurados como sin depurar.

En lo referente al movimiento de agua entre la zona subterránea y superficial, en esta zona la MAS 030.007 se caracteriza por una dinámica perdedora (Mostaza, 2013). El río Jarama estaría recibiendo aporte de las aguas subterráneas y de la Laguna de El Campillo.

En el centro de la zona de estudio se encuentra la Finca Experimental “La Isla” (Figura 3) que pertenece al IMIDRA (Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario). En ella se llevan a cabo proyectos de investigación y ensayos demostrativos para su posterior transferencia a los agricultores. Repartidos por la extensión de la finca existen una serie de pozos excavados: 9 en total. Se caracterizan por tener un gran diámetro (entre 0,5m y 1m aproximadamente) y poseer profundidades de hasta 10 metros, con un espesor de agua de hasta 4 metros. Algunos de ellos se emplean para la extracción de agua de riego (puntos 004, 008, 009 y 001) (Tabla I), mientras que otros permanecen abandonados y/o sin bomba instalada. Estos puntos se emplearon para la toma de muestras de agua (para análisis físico-químico en laboratorio e *in-situ*), muestras de invertebrados acuáticos (comunidades bióticas que habitan las aguas subterráneas) y para el estudio de la evolución la superficie freática de la MAS 030.007 (Aluviales: Jarama-Tajuña) de la que se abastece la finca para el riego de los cultivos.

Cercana a esta finca se encuentra el río Jarama, la Laguna de El Campillo y el Centro de educación ambiental El Campillo (Comunidad de Madrid); todos ellos forman el conjunto de zonas de muestreo.

En total se llevaron a cabo tres campañas de campo, en las siguientes fechas: septiembre de 2015, enero de 2016 y mayo de 2016.

Medida de los niveles piezométricos de la MAS:

El estudio de la variación de los niveles piezométricos de la MAS 030.007 en la zona de estudio se ejecutó de manera periódica (quincenalmente) mediante la estimación de los niveles con sonda eléctrica a través de los pozos seleccionados de la finca “La Isla”. Se procuró que la frecuencia de las mediciones no fuera superior a 2 semanas.

Toma de muestras de agua y biológicas:

El muestreo de agua subterránea y superficial se realizó a lo largo de toda la extensión de la zona de estudio (Figura 3). En cada una de las campañas de campo se tomaron 11 muestras (Tabla I): nueve (9) de ellas correspondientes a aguas subterráneas (pozos de la Finca Experimental “La Isla” en Arganda del rey), una (1) correspondiente a agua superficial de laguna (Laguna de El Campillo, Rivas-Vaciamadrid) y una (1) correspondiente a agua superficial de río (río Jarama, Rivas-Vaciamadrid).

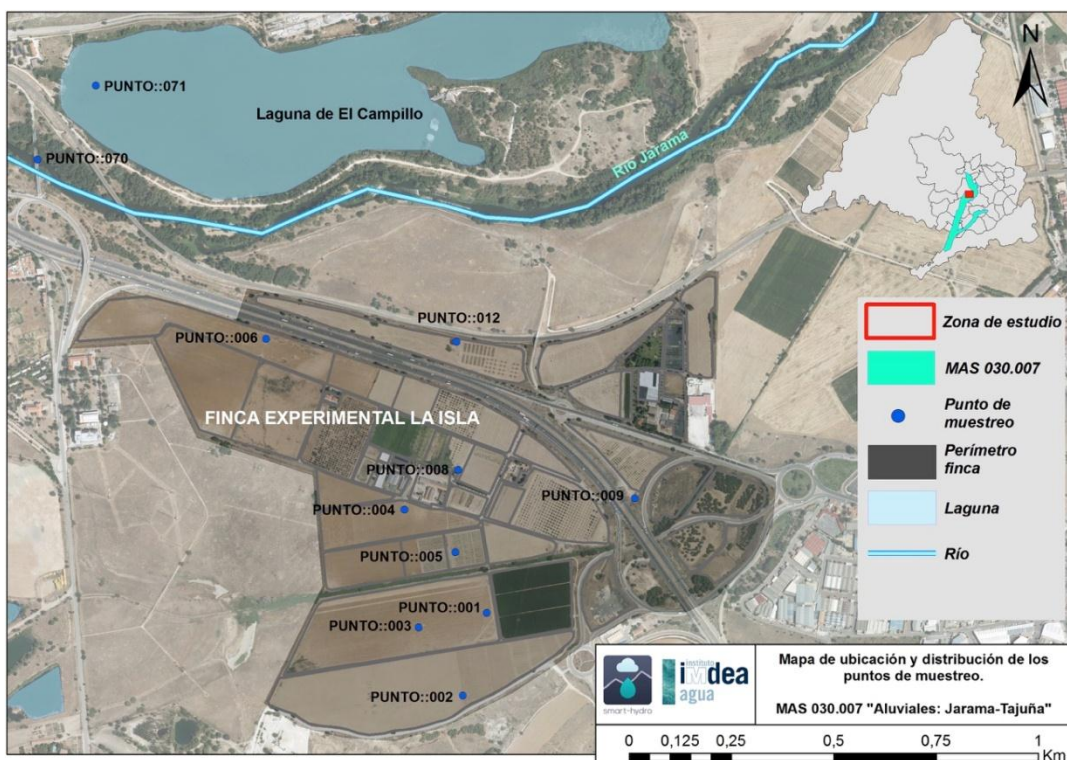


Figura 3. Ubicación en detalle de la zona de estudio y los puntos de muestreo de agua subterránea y superficial.

Las muestras de agua se tomaron mediante *bailer* directamente desde los pozos, río o laguna. Se llenó una botella de 1L de capacidad con cada muestra y se almacenó en una nevera portátil hasta su llegada al laboratorio; donde se mantuvo a 4°C hasta el momento de su análisis. Para poder valorar ciertos parámetros físico-químicos del agua en el momento de la recogida (temperatura, conductividad eléctrica, pH, sólidos disueltos totales y oxígeno disuelto) se analizó una alícuota de cada muestra con la sonda portátil multiparamétrica modelo Hanna HI9828.

Ya en laboratorio se llevó a cabo el análisis de los principales iones presentes en las muestras con el Cromatógrafo Iónico de doble canal Modelo 861 Advanced Compact IC (Metrohm Advanced Compact IC) y la alcalinidad y dureza con el Valorador Titrande. Modelo 809 (Metrohm).

Tabla I. Relación de puntos de muestreo.

NOMENCLATURA	TIPO DE AGUA	MUESTRA DE BIOTA	BOMBA INSTALADA	X*	Y*
PUNTO::001	Subterránea (pozo)	SÍ	SÍ	457.694	4.462.197
PUNTO::002	Subterránea (pozo)	SÍ	No	457.636	4.461.995
PUNTO::003	Subterránea (pozo)	SÍ	No	457.527	4.462.162
PUNTO::004	Subterránea (pozo)	SÍ	SÍ	457.493	4.462.450
PUNTO::005	Subterránea (pozo)	SÍ	No	457.618	4.462.345
PUNTO::006	Subterránea (pozo)	SÍ	No	457.154	4.462.867
PUNTO::008	Subterránea (pozo)	SÍ	SÍ	457.624	4.462.547
PUNTO::009	Subterránea (pozo)	SÍ	SÍ	458.056	4.462.477
PUNTO::012	Subterránea (pozo)	SÍ	No	457.620	4.462.860
PUNTO::070	Superficial (río)	No	--	456.595	4.463.305
PUNTO::071	Superficial (laguna)	No	--	456.738	4.463.486

*Coordenadas UTM ETRS 1989 Huso 30N



Para verificar la coherencia y consistencia de los datos facilitados por el laboratorio se verificó la condición de electro-neutralidad de cada una de las muestras. Debe cumplirse que la suma de las cargas de todos los cationes sea igual a la suma de las cargas de todos los aniones; esto es, prácticamente neutras (Fitts, 2002 en Peña Hernández et al., 2012). El rango de variación permitido (%BE) para asegurar la validez de una muestra se sitúa en el $\pm 5\%$, aunque se puede permitir una amplitud de hasta $\pm 10\%$ (Freeze y Cherry, 1979 en Peña Hernández et al., 2012). Los datos de este estudio oscilan entre valores de 3,60% y -5,21% (Figura 4) lo que asegura la validez de las muestras y del protocolo seguido en el laboratorio.

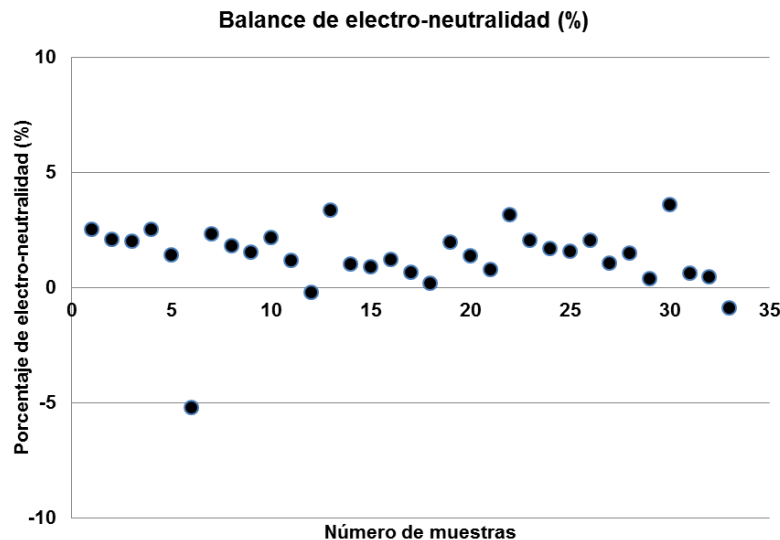


Figura 4. Balance de electro neutralidad de las muestras de agua superficial y subterránea tomadas en la zona de estudio.

El muestreo biológico de los 9 pozos se llevó a cabo siguiendo el protocolo para la evaluación de las comunidades bióticas en ecosistemas de aguas subterráneas (Malard et al., 2005; Hose y Lategan, 2012) mediante muestreo con red. La toma de muestras de fauna de aguas subterráneas se hizo de forma manual con una red planctónica de 63 μm de red de malla (Figura 5). Ésta se dejó caer hasta que tocase el fondo del pozo para moverla repetidamente arriba y abajo varias veces a través de la columna de agua. Se repitió el procedimiento entre 3 y 5 veces para recoger la suficiente cantidad de organismos. Cuando fue posible, el muestreo se hizo en diferentes partes del pozo y centrándose en las paredes o laterales. La conservación de las muestras biológicas se hizo mediante etanol de 96°, a una proporción de 1 parte de alcohol por cada 3 partes de agua. Las muestras se conservaron en neveras portátiles hasta su traslado al laboratorio, donde se mantuvieron a 4°C hasta el análisis en microscopio.

Las muestras biológicas se procesaron en el laboratorio mediante el procedimiento operativo estándar para invertebrados de agua subterránea (Malard et al., 2005), utilizando el microscopio estereoscópico (Olympus SZX-7) y la identificación de los especímenes se llevó a cabo usando las claves dicotómicas. Los especímenes seleccionados de cada muestra se agruparon en grupos taxonómicos y se contó la abundancia de cada grupo.



Figura 5. Izquierda: dos de los pozos usados como puntos de muestreo, puede observarse la bomba instalada (abajo) que dificulta el proceso de muestreo. Derecha: red de malla filtrante con tamaño de poro de 63 μm usada para el muestreo de fauna.

Determinación de la tipología de las aguas:

La clasificación de la tipología de aguas para cada una de las campañas de muestreo se realizó mediante el diagrama de Piper (Figura 6). Esta herramienta permite reflejar las variaciones causadas por mezclas de aguas, precipitaciones-disoluciones, procesos de intercambio iónico y establecer la evolución hidroquímica de las aguas.

También se obtuvieron diagramas de Stiff (Figura 10, Figura 11 y Figura 12), de forma que sea posible visualizar los diferentes tipos de agua y comparar el grado de mineralización de éstas en función de la ubicación y campaña de muestreo.

Ambos modelos de diagramas se obtuvieron mediante el software AquaChem 2014.2 (Build 14.297.1147). Se agruparon los datos por campañas (septiembre de 2015, enero de 2016 y mayo de 2016).

Por otro lado, para determinar qué factores determinan la composición de las aguas subterráneas y superficiales se empleó el diagrama de Gibbs. La química de las aguas está determinada por tres factores: lluvia (en el dominio de precipitación); reacciones de intemperismo o meteorización (dominio de roca); y evaporación-cristalización (Figura 7). Mediante este diagrama se puede visualizar qué factor predomina en cada muestra.

Clasificación de las aguas para uso agrícola:

El diagrama de salinidad de los Estados Unidos de América o de Wilcox considera los valores de la conductividad eléctrica del agua y la relación de adsorción de sodio (RAS).



El diagrama de Wilcox (1955) relaciona el porcentaje de sodio y la conductividad eléctrica (Figura 8) (Peinado-Guevara et al., 2011). El peligro de la sodificación que entraña el uso del agua de riego se determina por las concentraciones absoluta y relativa de los cationes. Si la proporción de sodio (Na^+) es alta, será mayor el peligro de sodificación; por el contrario, si predominan el calcio (Ca^{2+}) y el magnesio (Mg^{2+}), el peligro es menor (Peinado-Guevara et al., 2011)

Mediante el software AquaChem 2014.2 (Build 14.297.1147) se obtuvo el diagrama de Wilcox para la totalidad de las muestras de agua recogidas en el campo. Dados los resultados obtenidos se optó por representar la totalidad de muestras y campañas en un mismo gráfico.

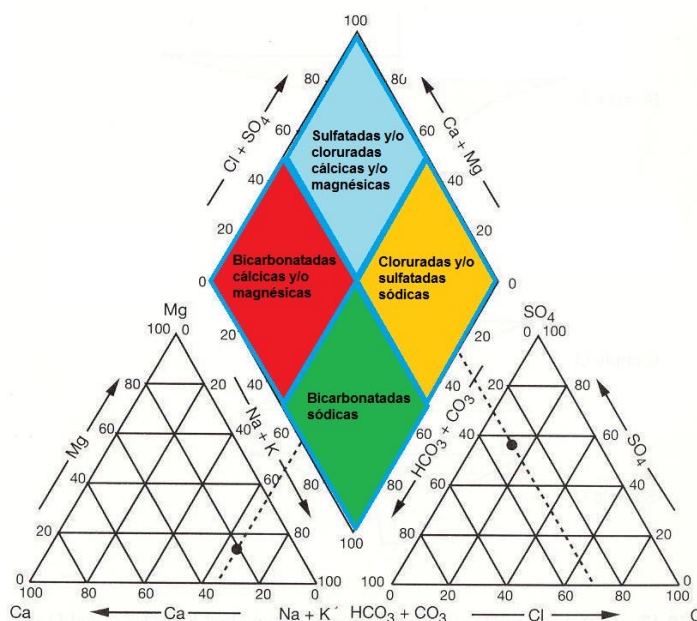


Figura 6. Ejemplo de diagrama Piper-Hill-Langelier, con la clasificación de cada familia de aguas.

Análisis de variables meteorológicas:

Para conocer la evolución de las diferentes variables climáticas que se dan en la zona de estudio se han empleado los datos medidos por la estación “M02 Arganda” del SIAR (Sistema de Información Agroclimático para el Regadío, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente); ubicada en las mismas instalaciones de la Finca Experimental “La Isla”. Esta estación dispone de termohigrómetro, anemoveleta, piranómetro, pluviómetro y sensor de temperatura del suelo. Sus coordenadas UTM son X: 457.693, Y: 4.462.410 (Huso 30N), su cota es 537m.s.n.m y recoge datos desde diciembre de 2003.

Se ha analizado la serie de datos correspondiente a la temperatura y precipitaciones desde el mes de septiembre de 2015 a mayo de 2016; puesto que es la que coincide con el periodo de muestreo de agua y fauna en la zona de estudio.

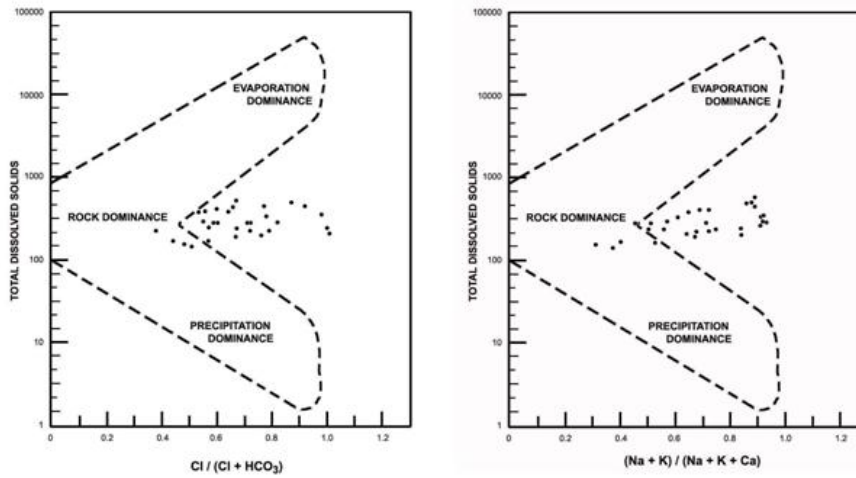


Figura 7. Ejemplo de Diagrama de Gibbs (Tomado de Najjaraju et al., 2014).

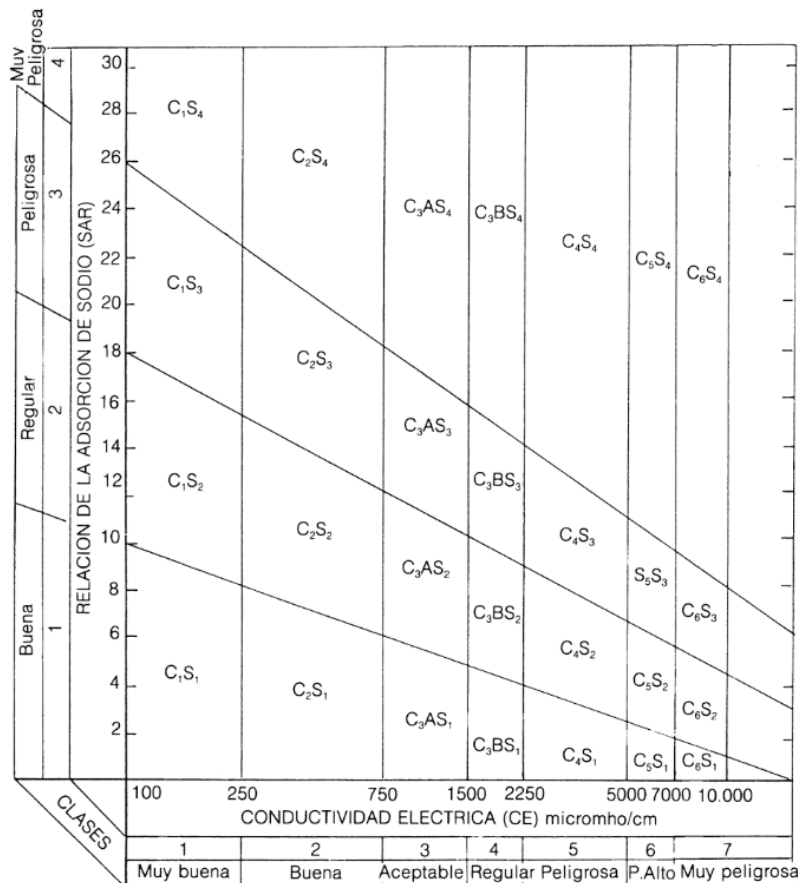


Figura 8. Diagrama para clasificar las aguas de riego según Blasco y de la Rubia (Laboratorio de Suelos del Iryda, 1973). Tomada de: Urbano Terrón, 2010.



4. Resultados y discusión

Análisis de datos hidroquímicos

Los datos hidroquímicos analizados corresponden a un total de 33 muestras, recogidas en 3 muestreos espaciados temporalmente. El primero de los muestreos tuvo lugar a finales de septiembre de 2015, para tenerlo como referencia del comienzo del año hidrológico (que empieza el 1 de octubre y acaba el 30 de septiembre); los siguientes muestreos se realizaron con una periodicidad trimestral: el segundo en enero de 2016 y el tercero en mayo de 2016. Las aguas muestreadas se emplean únicamente para usos industriales (como agua de riego en la Finca Experimental “La Isla”) o recreativos/educacionales (Centro de educación ambiental El Campillo) y en ningún caso tienen como objeto el abastecimiento para agua potable. Puesto que la validación de los datos es correcta y ninguna de las muestras supera el intervalo de $\pm 10\%$ de electro-neutralidad (Figura 4), consideramos que se han analizado correctamente y que son representativas de la masa de agua de la que se extrajeron.

Los resultados obtenidos del análisis de las familias de aguas (Figura 9) exponen que la variabilidad entre campañas es poco significativa. En los tres episodios en los que se tomaron muestras de agua subterránea y superficial, éstas se clasifican como “sulfatadas cálcicas magnésicas”.

En cuanto a la mineralización de las aguas de la zona de estudio, los Diagramas de Stiff (Figura 10: campaña de septiembre de 2015; Figura 11: campaña de enero de 2016; Figura 12: campaña de mayo de 2015) muestran que el grado de mineralización de las aguas subterráneas y superficiales permanece prácticamente invariable a lo largo de los tres periodos de muestreo. En las aguas subterráneas los principales iones son el sulfato y carbonato, predominando sobre el resto; mientras que el agua del río tiene una mineralización menor en comparación con el resto de muestras. Dado que la base y límites del acuífero están formados por el conjunto de yesos, margas y calizas del Terciario, son éstos los que predominan en la determinación de la hidroquímica de la MAS.

La dinámica perdedora de la MAS se refleja en la mineralización de las muestras del punto 070 (río Jarama) en las campañas de septiembre de 2015 y enero de 2016 (Figura 10 y Figura 11). Puesto que la MAS aporta agua al río, la mineralización de éste se asemeja en cuanto a composición a la de las aguas subterráneas, pero no llega a alcanzar los mismos niveles debido a la dilución generada por el agua que circula por el cauce. En mayo de 2016, tras el periodo de lluvias del invierno y primavera (Figura 15) el caudal del río es mayor y las aguas que circulan por éste diluyen en mayor proporción a las que aporta el acuífero (Figura 12).

La Laguna de El Campillo (punto 071), de origen antrópico, se generó debido a la remoción de materiales detríticos para usos comerciales. La lámina de agua es la propia superficie freática del acuífero. La mineralización de sus aguas se asemeja, como cabría esperar, a las del resto de la MAS, salvo por el menor contenido en carbonatos. La evolución de la mineralización desde septiembre de 2015 a mayo de 2016 muestra que hubo una ligera dilución de los sulfatos, provocada por las precipitaciones de invierno y primavera comentadas anteriormente.

Para continuar con el análisis de las propiedades químicas de las aguas de la zona de estudio se cuenta con los resultados del Diagrama de Gibbs. Éste (Figura 7) clasifica a las aguas en tres grupos:



- Las situadas en la zona superior corresponden a aguas donde predomina la evaporación, que genera un incremento de los sólidos totales disueltos (SST); además los retornos de riego favorecen la evaporación de agua desde el suelo y con ello el incremento de la salinidad de éste (Wu et al., 2015). En esta zona se sitúan generalmente las aguas de acuíferos aluviales.
- Las situadas en la zona central, donde predomina la meteorización de la roca. Las aguas de acuíferos confinados aparecerán en esta zona por norma general.
- Las situadas en la parte inferior de la figura, que corresponden a aguas poco mineralizadas donde la precipitación es dominante.

La muestra del punto 070 (río Jarama) correspondiente al mes de mayo de 2016 (Figura 13) se ubica en la zona de dominancia de la precipitación, puesto que se tomó tras el periodo de lluvias de invierno y primavera (Figura 15). Las otras dos muestras de agua de río restantes, tomadas en septiembre de 2015 y enero de 2016 escalan hasta la zona de dominancia de evaporación. Lo que confirma el aporte de agua subterránea desde la MAS hacia el río. El resto de muestras (Figura 13) se agrupan por encima de la línea de color rojo que describe a las aguas con dominancia en evaporación. La recarga de la MAS 030.007 en la zona adyacente a “La Isla” se produce por la infiltración del agua de lluvia en su mayoría y por retornos de riego en menor medida. Esto genera un proceso de lavado de suelo en época de lluvias y de riego junto a procesos de evaporación en épocas de mayores temperaturas, que explicaría también la situación de las muestras en el Diagrama de Gibbs.

Dado que el agua extraída de la MAS 030.007 en esta zona en concreto se emplea para riego de cultivos, se ha analizado la salinidad de las aguas mediante el diagrama de Wilcox (Figura 8). La totalidad de las muestras se sitúan en el cuadrante S1-C3 (Figura 14), pudiendo clasificarse de la siguiente manera:

- S₁: agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
- C₃: agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.

Se aprecian dos grupos de aguas. Uno formado por las procedentes del río Jarama (punto 070) y del punto 006 (ubicado al norte de “La Isla” y el más cercano al río Jarama); y otro por el resto de muestras. Las primeras estarían dentro del intervalo de conductividades entre 750 μ S/cm y 1500 μ S/cm (clasificables como C₃A); mientras que las segundas se sitúan en el intervalo entre 1500 μ S/cm y 2250 μ S/cm (clasificables como C₃B) (Figura 8). En principio todas las aguas son aptas para el riego de cultivos, si bien es verdad que habría que considerar la salinidad al utilizar cultivos menos tolerantes. La similitud del punto 006 con las aguas del río Jarama podría explicarse por los antecedentes de cultivos en la parcela situada alrededor del pozo: cereales de secano o barbecho. Este tipo de labores no requiere de riego, por lo que el lavado de sales puede haber sido menor en comparación con las del resto de parcelas en las que se ha tenido regadío.

Análisis de las componentes climáticas

Las componentes climáticas (precipitación y temperatura mayoritariamente) tienen efectos directos sobre la recarga de las MAS. A medida que incrementa la precipitación, también lo hace la cantidad de agua que se infiltra en el terreno. De igual manera, cuanto



mayor sea la temperatura mayor será la evaporación y disminuirá el agua contenida en el suelo.

La MAS 030.007 en la zona adyacente a “La Isla” es un acuífero somero, en el que predominan los suelos francos con buen drenaje. Por ello el efecto de las precipitaciones es notable en los niveles del acuífero.

El clima del periodo de estudio se ha caracterizado por un otoño algo seco, un invierno húmedo pero bastante benigno en cuanto a temperatura, seguido de una primavera lluviosa (Figura 15).

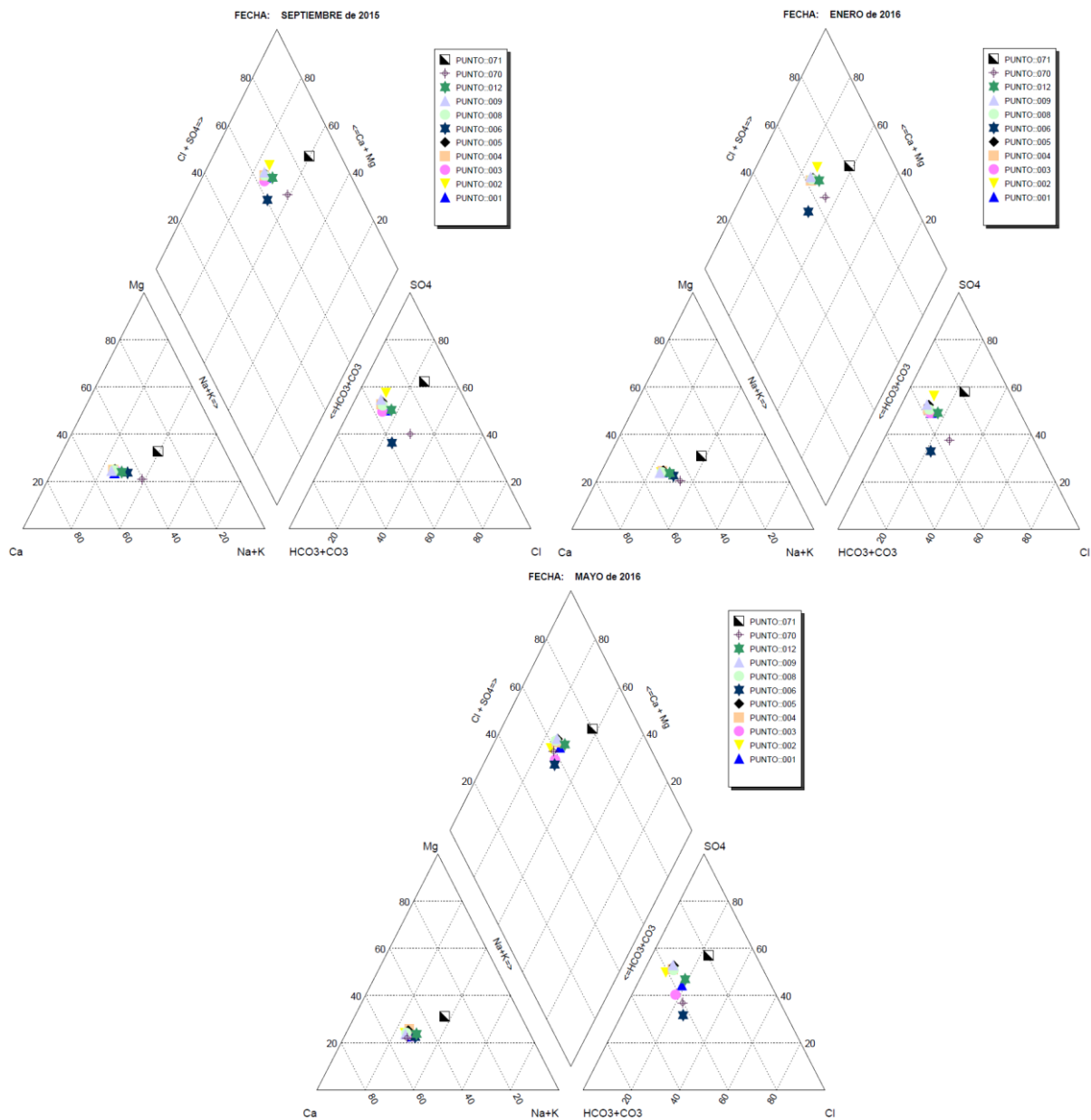


Figura 9. Diagrama Piper para la totalidad de las muestras. De arriba a abajo y de izquierda a derecha: muestra de septiembre de 2015; muestra de enero de 2016; muestra de mayo de 2016.

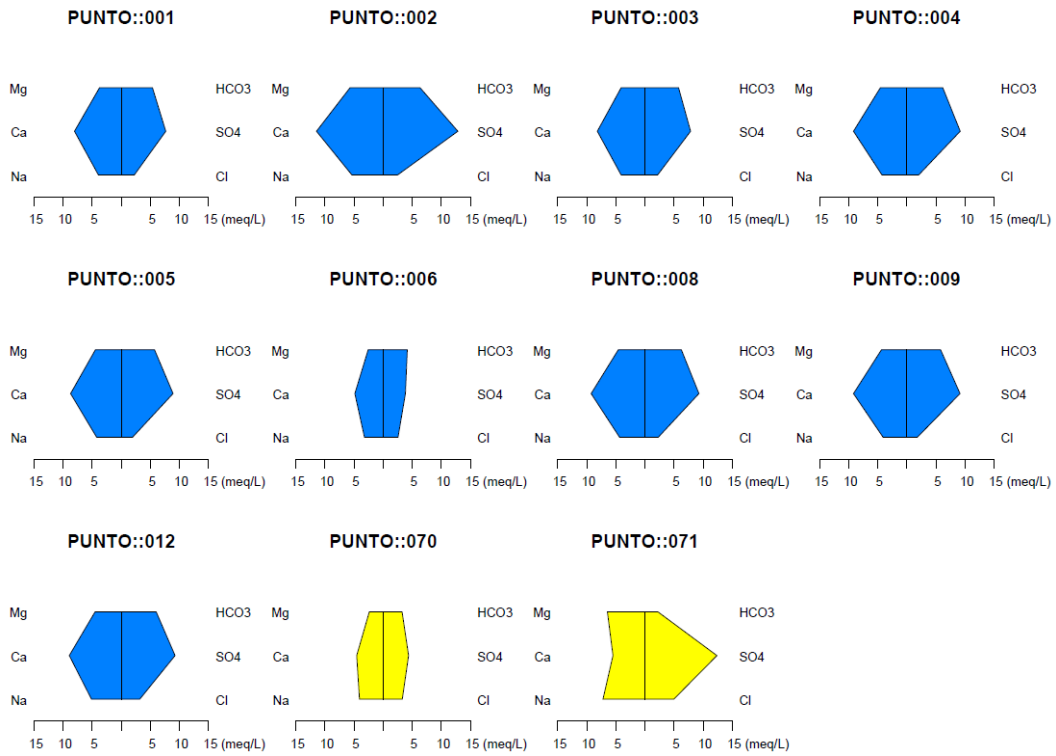


Figura 10. Diagramas de Stiff para las muestras tomadas en septiembre de 2015. En azul las aguas subterráneas y en amarillo las aguas superficiales de (río y laguna).

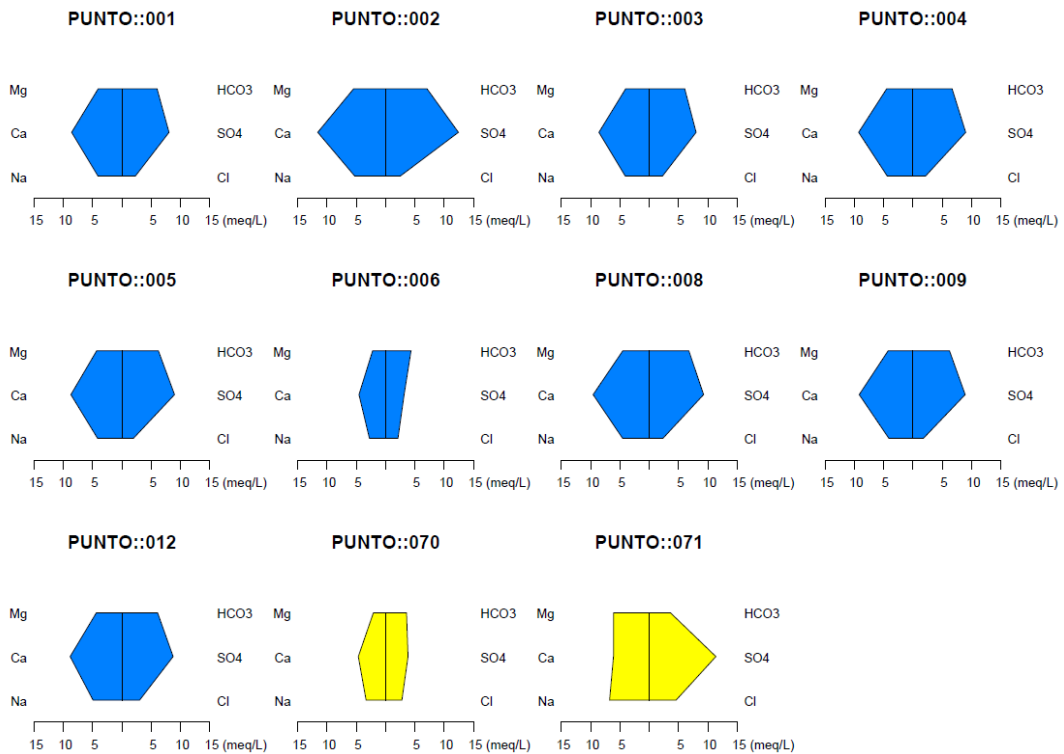


Figura 11. Diagramas de Stiff para las muestras tomadas en enero de 2016. En azul las aguas subterráneas y en amarillo las aguas superficiales de (río y laguna).

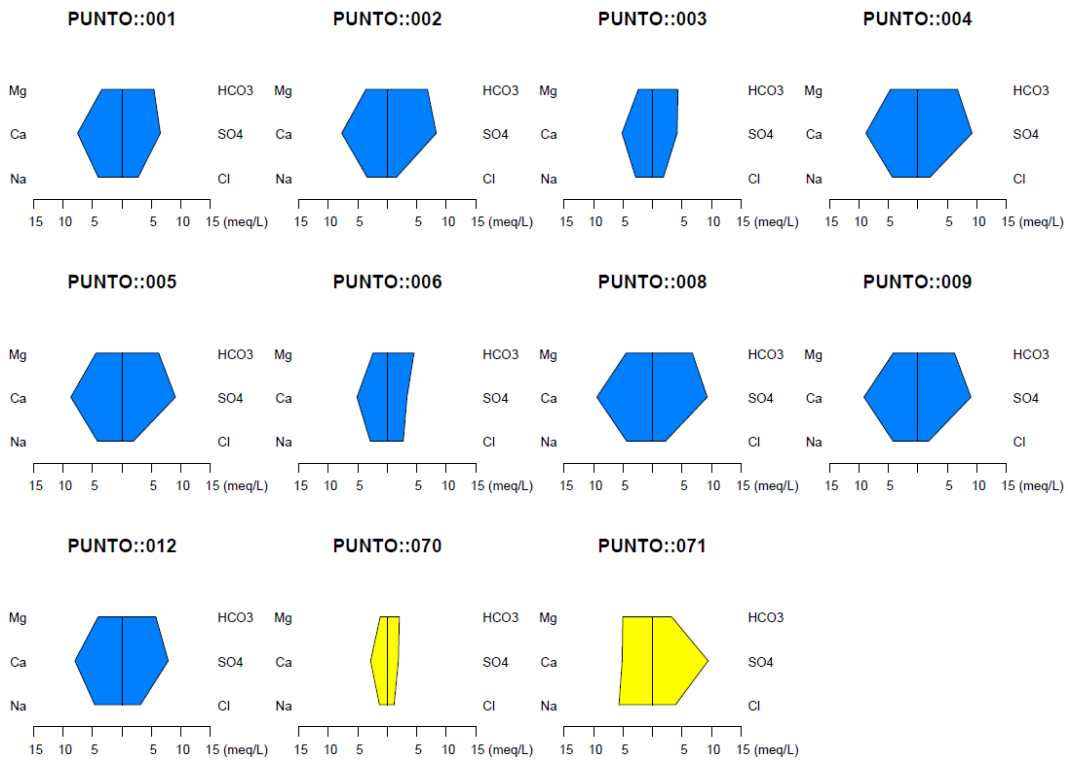


Figura 12. Diagramas de Stiff para las muestras tomadas en mayo de 2016. En azul las aguas subterráneas y en amarillo las aguas superficiales de (río y laguna).

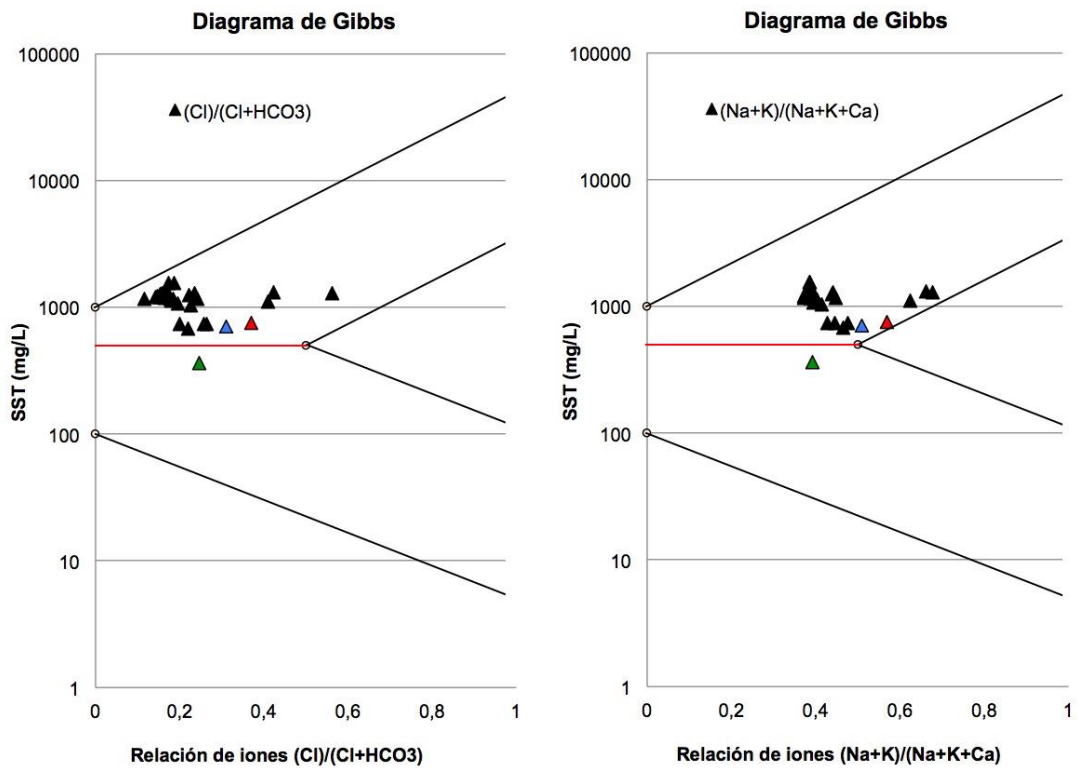


Figura 13. Diagrama de Gibbs para la totalidad de las muestras. En color las muestras del punto 070 (río Jarama) para el mes de mayo de 2016 (verde); enero de 2016 (azul); y septiembre de 2015 (rojo).

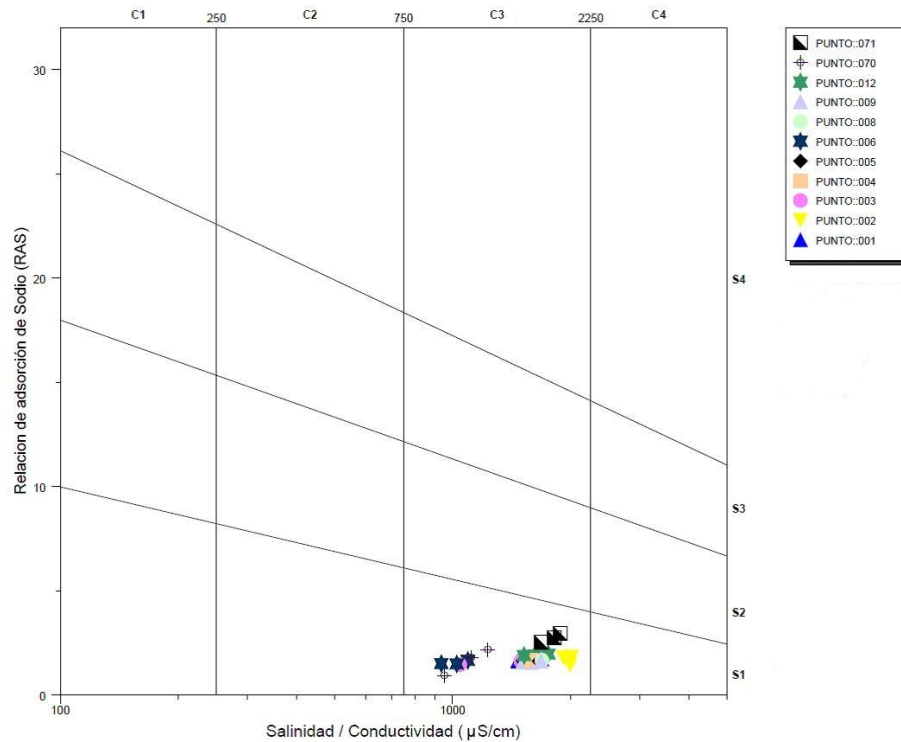


Figura 14. Diagrama de Wilcox –Salinidad.
Clasificación de las aguas según la salinidad (Conductividad eléctrica en $\mu\text{S/cm}$) y Relación de Adsorción de Sodio (RAS ó SAR) del agua de riego.

Análisis de la variación de los niveles piezométricos

El análisis de la variación de los niveles piezométricos en esta zona concreta de la MAS 030.007 se inicia a finales del mes de septiembre de 2015, coincidiendo con el incipiente comienzo del año hidrológico 2015/2016. El comienzo del año hidrológico en el hemisferio norte y en este tipo de climas coincide con el momento en el que las reservas hídricas están al mínimo. Tras el verano, que se caracteriza por precipitaciones nulas o escasas y temperaturas elevadas, las reservas de agua en las MAS se encuentran en su punto más bajo. Lo mismo ocurre con los ríos o lagunas, en los que el caudal de agua circulante o de agua almacenada es mínimo.

Como se ha puesto de manifiesto con anterioridad, la dinámica de la MAS 030.007 en la zona de estudio es perdedora. Las aguas subterráneas fluyen hacia el río Jarama, donde son recogidas y drenadas. El agua se infiltra a lo largo de la zona de terrazas y llanura aluvial y fluye hasta el río. Este proceso de infiltración es rápido y las precipitaciones tienen efecto inmediato en la cantidad de agua almacenada en el acuífero.

Desde septiembre de 2015 hasta mayo de 2016 se han tomado datos de piezometría de manera puntual (quincenalmente) (Figura 16). Se ha observado que en esta zona las variaciones del nivel freático ascienden hasta un metro. El momento en el que el incremento se hace más notable corresponde al momento del final del invierno y principio de primavera, donde las lluvias son más abundantes y frecuentes (Figura 15).

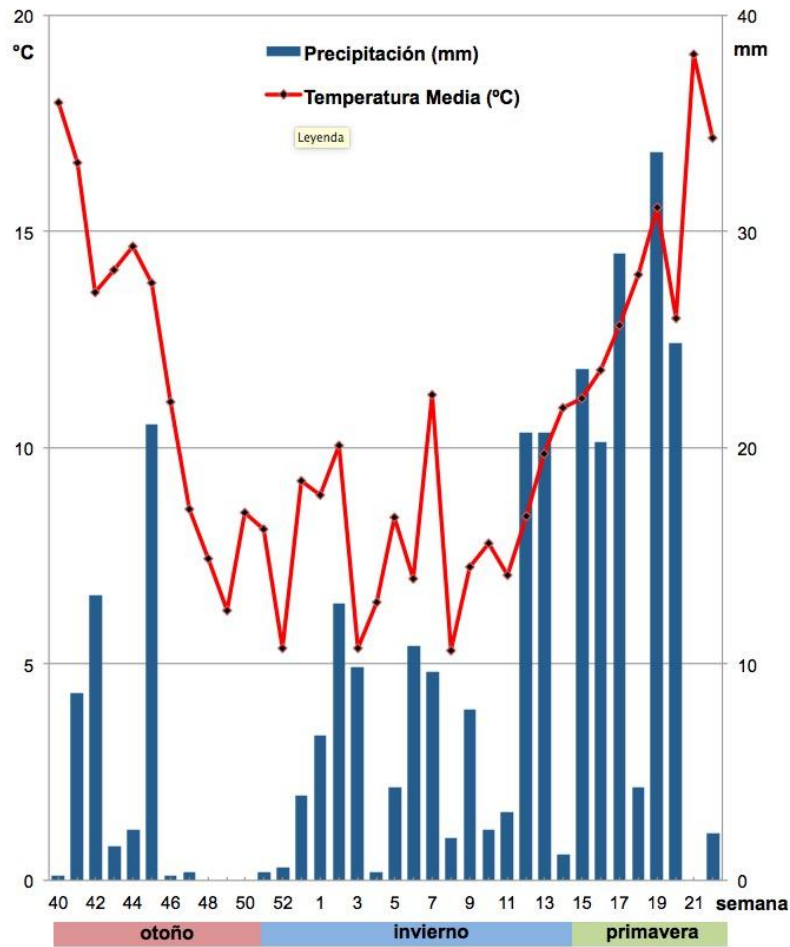


Figura 15. Temperaturas y precipitaciones medias semanales desde octubre de 2015 (semana 40) a mayo de 2016 (semana 22) para la estación M02 del SIAR (Arganda del Rey, Madrid). La precipitación total en este periodo fue de 302,95 mm. La temperatura media en este periodo fue de 10,65°C.

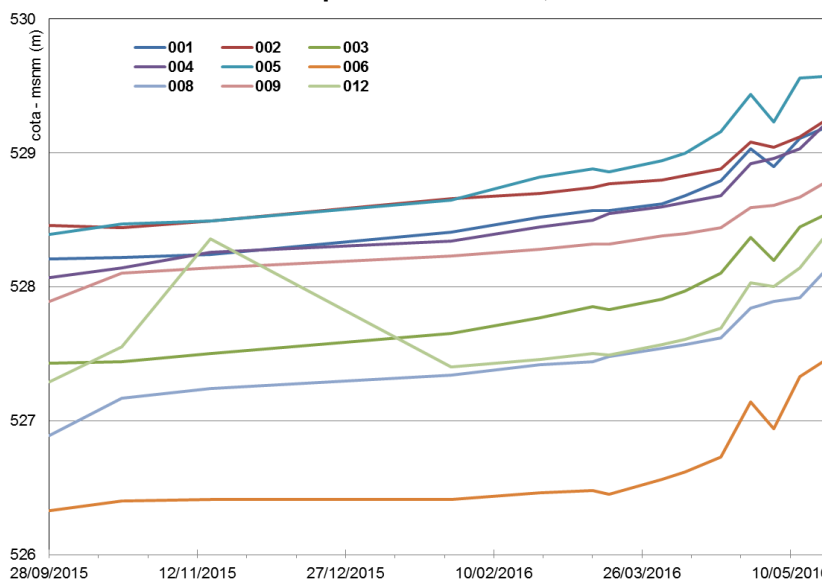


Figura 16. Evolución piezométrica de la MAS 030.007 en la zona de la Finca Experimental “La Isla” (Arganda del Rey, Madrid) entre el 28/09/2015 y el 23/05/2016.



Análisis de la fauna de agua subterránea

La presencia de fauna de aguas subterráneas en un acuífero depende en gran medida de la permeabilidad y porosidad de éste, de las características del agua y del grado de conexión con la superficie; puesto que influyen en la entrada de nutrientes hacia los ecosistemas subterráneos. Si la porosidad es la adecuada, existirán espacios intergranulares que facilitarán el desarrollo de poblaciones de distintos grupos de organismos específicos de aguas subterráneas o provenientes de la superficie. Las características químicas de las aguas subterráneas también influyen en la presencia de las especies. Por ejemplo, las aguas carbonatadas favorecen el desarrollo de una diversidad mayor de especies de crustáceos.

La conexión del acuífero con la superficie es fundamental para el establecimiento y desarrollo de las comunidades bióticas subterráneas. Un flujo constante de entrada de nutrientes desde la superficie hacia los acuíferos someros resulta en el desarrollo de poblaciones con ecología mixta: especies provenientes de la superficie (stygoxenos o stygophilos). Mientras que un acuífero más profundo, con menor conexión con la superficie se caracteriza por la presencia de especies estrictamente subterráneas (estigobiontes), mas restrictivas en términos de la calidad de las aguas y de las fluctuaciones del nivel piezométrico (Griebler et al., 2011).

Las comunidades bióticas subterráneas de la MAS 030.007 adyacente a la Finca Experimental “La Isla” está influenciada por un conjunto de factores que incluyen: la estructura del hábitat, la calidad del agua (factores químicos), el clima local y los impactos antropogénicos. Es sabido que todos estos factores tienen influencia sobre la fauna acuática subterránea, los resultados obtenidos por este estudio indican que los invertebrados acuáticos subterráneos responden de una manera diferente a estos factores.

El acuífero aluvial del Jarama está formado por sedimentos detríticos cuaternarios con una alta permeabilidad y porosidad de entre el 25% y 45%, característica de los depósitos de gravas y arenas. Los espacios intergranulares del acuífero en la zona de la Finca Experimental “La Isla” permiten un flujo de agua entre bajo y medio, pero que asegura el transporte de materia y energía dentro del acuífero, y en consecuencia permite el desarrollo de grandes poblaciones de grupos acuáticos subterráneos. La fauna subterránea en el acuífero está representada por una mezcla de invertebrados acuáticos en la que destaca la abundancia de crustáceos de hasta 3mm (en el caso de isópodos y anfípodos). La fauna presente en la zona de estudio muestra una alta biodiversidad para determinados grupos taxonómicos, con presencia de cinco filos, seis clases y diez órdenes (Tabla II).

Tabla II. Biodiversidad encontrada en la MAS 030.007 en la zona adyacente a la Finca Experimental “La Isla” (Arganda del Rey, Madrid).

Filo	Clase	Orden
Annelida	Oligochaeta	-
Crustacea	Malacostraca	Amphipoda
Crustacea	Malacostraca	Isopoda
Crustacea	Malacostraca	Syncarida
Crustacea	Maxillipoda	Harpacticoida
Crustacea	Maxillipoda	Cyclopoida
Crustacea	Ostracoda	Podocopida
Hexapoda	Insecta	Polyphaga
Mollusca	Gastropoda	-
Nematoda	-	-



La gran biodiversidad encontrada en la fauna subterránea de la zona de estudio es típica de acuífero superficial caracterizado por un elevado contacto con la superficie y con un elevado flujo de materia y energía desde la superficie. Los grupos dominantes son los crustáceos Cyclopodia, Ostracoda y Harpacticoida seguidos por los insectos.

La abundancia de individuos es extremadamente alta, sumando casi 12.000 especímenes muestreados en dos periodos diferentes (Tabla III) El grupo que aparecía con mayor frecuencia en todos los pozos fue Cyclopodia (CYC), por lo general muy abundante en aguas subterráneas. Syncarida (BAT) es el más raro de los crustáceos y sólo se encontró en el punto 005, incluido en el grupo de pozos estables al no tener uso para riego. A pesar de su baja abundancia, la presencia de este espécimen en el mismo punto en dos campañas diferentes es un indicador de la estabilidad de las condiciones ambientales y del hábitat físico.

El desarrollo de los invertebrados de aguas subterráneas está condicionado por una serie de factores, tales como la caracterización físico-química del agua (donde la temperatura es la más importante), el oxígeno disuelto y la concentración de iones mayoritarios. Las aguas del acuífero en esta zona están poco oxigenadas (la concentración de oxígeno disuelto varía entre 1,5mg/L y 5,3mg/L), sin embargo la fauna de aguas subterráneas y los crustáceos en especial están adaptados a habitar en aguas con baja concentración de oxígeno o anóxicas (<3mg/L).

En la MAS adyacente a "La Isla" los crustáceos son el grupo biológico más abundante y aparece representado por todos los taxones que se encuentran frecuentemente en aguas subterráneas (Tabla III). La abundancia de los crustáceos está estrechamente ligada a la elevada concentración de HCO_3^- , Ca^{2+} y Mg^{2+} que favorece el desarrollo de la concha. Los insectos son generalmente escasos en las aguas subterráneas y su presencia en esta zona de la MAS 030.007, aunque en baja proporción, refleja el elevado aporte superficial característico de acuíferos poco profundos (Figura 17).

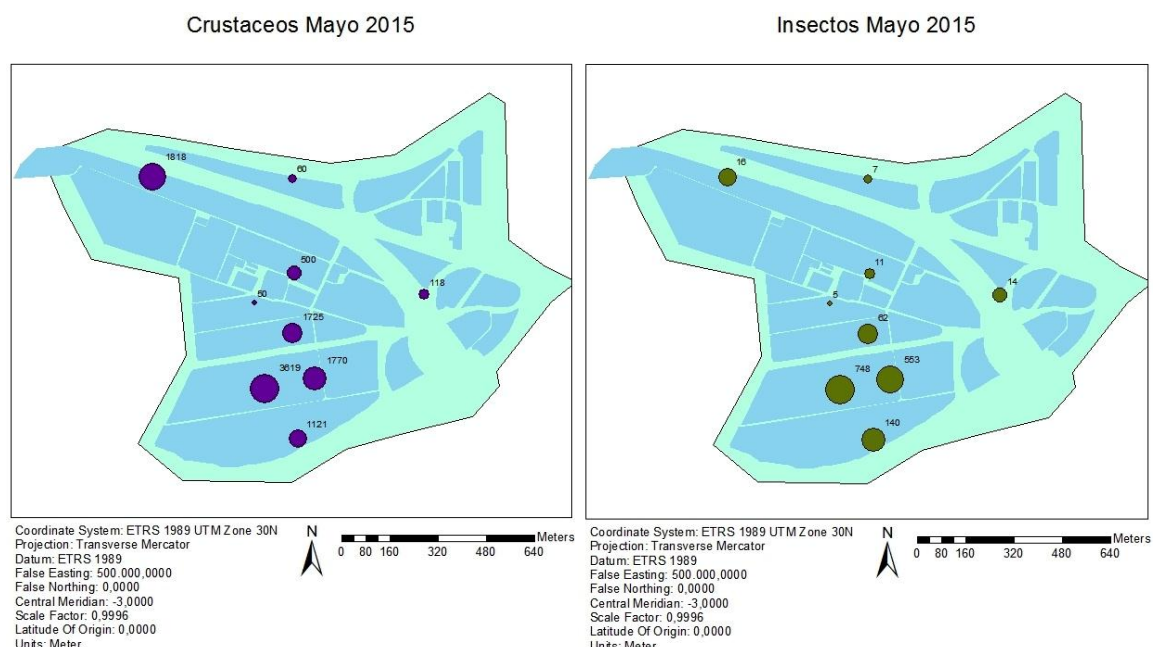


Figura 17. A la izquierda abundancia de crustáceos por pozo (mayo de 2015), a la derecha abundancia de insectos por pozo (mayo de 2015) en la MAS 030.007 adyacente a "La Isla".



La mayoría de los invertebrados de aguas subterráneas dependen de la entrada de materia orgánica alóctona (desde la superficie). Además, tienen capacidad para descomponer sustancias orgánicas complejas que se encuentran disueltas en el agua subterránea (tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas) poniéndolas a disposición de otros organismos situados en diferentes niveles tróficos. Para que los organismos crezcan y se reproduzcan los nutrientes deben de ser suministrados en una matriz apropiada, que garantice los requisitos de carbono, energía, nitrógeno y minerales. En el acuífero aluvial de "La Isla" la abundancia de invertebrados y en particular de crustáceos se correlaciona positivamente con el carbono total (TC), carbono inorgánico (IC) y nitrógeno (Tabla IV).

Tabla III. Relación de individuos adultos encontrados en cada uno de los dos muestreos. Entre paréntesis se indican los individuos juveniles.

POZO	OLI	DIP	AMP	ISO	BAT	HAR	CYC	POD	POL	INS	GAS
MUESTREO 1											
583.1.001	0	0	0	17	0	0	688(1035)	19 (0)	11	553	0
583.1.002	0	0	0	56	0	0	662 (361)	24(0)	18	140	32
583.1.003	3	0	3	586	0	1	1177 (914)	155 (74)	709	748	5
583.1.004	10	0	0	3	0	16	2 (4)	4 (16)	3	5	0
583.1.005	3	0	0	91	1	16	160 (817)	398 (207)	35	62	0
583.1.006	33	0	1	71	0	0	269 (258)	6 - 94	1119	16	21
583.1.008	2	0	0	53	0	37	217	91 - 91	11	11	2
583.1.009	8	0	0	6	0	50	27	13 (9)	13	14	3
583.1.012	2	0	2	1	0	5	22 (7)	8 (9)	6	7	0
Total	61	0	6	884	1	125	3224 (3398)	718 (500)	1925	1556	63
MUESTREO 2											
583.1.001	0	0	0	0	0	0	756 (1410)	144 (690)	0	1002	0
583.1.002	0	0	0	3	0	2	204 (464)	4 (3)	2	14	7
583.1.003	0	0	0	0	0	0	435 (736)	0 (3)	0	173	0
583.1.004	1	0	0	2	0	1	27 (68)	28 (11)	0	4	0
583.1.005	0	0	0	31	3	3	155 (93)	97 (40)	0	3	0
583.1.006	1	0	0	13	0	1	93(80)	68 (63)	10	23	0
583.1.008	4	0	2	93	0	2	145 (204)	316 (521)	1	10	5
583.1.009	17	0	0	22	0	55	17 (30)	1 (12)	0	5	2
583.1.012	0	3	2	1	0	2	30 (5)	0 (0)	1	9	1
Total	23	3	4	165	3	66	1862 (3090)	658 (1343)	14	1243	15

Leyenda - OLI: Oligochaeta; DIP: Diptera; AMP: Amphipoda; ISO: Isopoda; BAT: Syncarida; HAR: Harpacticoida; CYC: Cyclopoida; POD: Podocopida; POL: Polyphaga; INS: Insecta; GAS: Gastropoda.

Riego de los cultivos, uso de los pozos y química del agua

Las fauna acuática subterránea en esta zona concreta de la MAS se ve influenciada por los tres tipos de actividades antropogénicas presentes en la Isla: el uso de los pozos para captación de agua del acuífero, los cultivos que se desarrollan en cada parcela y la recarga artificial del acuífero inducida por los retornos de riego. Los análisis realizados en este estudio indican que las dos primeras actividades afectan de manera significativa a las comunidades de aguas subterráneas.



La intensidad de uso de los pozos y la frecuencia de riego de las parcelas influyen ligeramente en los factores químicos del agua del acuífero y la abundancia de la fauna. En la campaña de mayo de 2015 el periodo de riego había comenzado, pero sólo se extraía agua de los puntos 004 y 009 (Tabla I y Figura 3). La abundancia de poblaciones de invertebrados analizada en los 2 pozos tras los bombeos de agua mostraba una población tres veces menos a la inicial, lo que indica que la extracción de agua afecta negativamente a las comunidades subterráneas.

Tabla IV. Tabla de correlación entre la abundancia de invertebrados y los parámetros químicos del agua.

	Dur.	Alc	NPOC	DOC	TC	IC	F	Cl	NO2	NO3	PO4	SO4	HCO3	Na	NH4	K	Ca	Mg	TotAb	Cru Ab	Og Ab
Dur.																					
Alc	0,93																				
NPOC	0,4	0,35																			
DOC	0,33	0,23	0,95																		
TC	0,89	0,99	0,27	0,17																	
IC	0,87	0,98	0,19	0,09	1																
F	0	0	0	0	0	0															
Cl	0,11	0,26	0,27	0,4	0,31	0,34	0														
NO2	0,71	0,66	-0,03	0,07	0,69	0,69	0	0,52													
NO3	0,65	0,49	0,2	0,25	0,49	0,47	0	0,23	0,85												
PO4	0,69	0,54	0,78	0,71	0,44	0,39	0	0,41	0,14	0,41											
SO4	1	0,91	0,42	0,34	0,88	0,86	0	0,13	0,72	0,66	0,69										
HCO3	0,9	0,99	0,28	0,16	1	0,99	0	0,32	0,68	0,47	0,45	0,89									
Na	0,96	0,91	0,53	0,46	0,87	0,84	0	0,08	0,59	0,61	0,79	0,95	0,87								
NH4	0,71	0,66	-0,03	0,07	0,69	0,69	0	0,52	1	0,85	0,14	0,72	-0,68	0,59							
K	0,69	0,59	0,77	0,66	0,49	0,44	0	0,39	0,05	0,24	0,97	0,69	0,5	0,78	0,05						
Ca	0,99	0,88	0,37	0,31	0,85	0,83	0	0,09	0,72	0,66	0,67	0,99	0,86	0,94	0,72	0,67					
Mg	0,96	0,97	0,44	0,34	0,93	0,92	0	0,14	0,66	0,59	0,68	0,95	0,95	0,96	0,66	0,69	0,92				
Tot.Ab	1	0,95	0,42	0,34	0,92	0,89	0	0,11	-0,7	0,64	0,68	0,99	0,92	0,97	-0,7	0,69	0,98	0,97			
Cru.Ab	1	0,95	0,41	0,33	0,92	0,9	0	-0,1	-0,7	0,63	0,68	0,99	0,93	0,97	-0,7	0,69	0,98	0,98	1		
Og.Ab	0,19	0,26	0,12	0,25	0,22	0,24	0	0,03	0,21	0,52	0,03	0,18	-0,27	-0,1	0,21	0,23	0,18	-0,2	-0,18	-0,18	

Cultivos y las comunidades acuáticas subterráneas en la Isla

Los análisis multivariable basados en la riqueza y presencia de diversos grupos de invertebrados acuáticos encontrados en el acuífero de "La Isla" muestran cuatro grupos de pozos; que están principalmente influenciados por los distintos tipos de cultivo de cada parcela y que generan diferencias a la hora de perfilar los grupos. Los pozos localizados en parcelas cultivadas con cebadas (puntos 001 y 003) y cereales (puntos 002 y 006) destacan por la mayor abundancia de invertebrados. Ambas parcelas no han sido regadas y los pozos que existen en ellas carecen de uso, por lo que el hábitat no se ha visto modificado en términos de fluctuaciones piezométricas. La ausencia de riegos puede causar una menor entrada de nutrientes desde la superficie y el aislamiento de las comunidades que habitan en ella; lo que permite el desarrollo de comunidades estables



de gran número de individuos. En contraste, el pozo del punto 012 tiene la menor abundancia de invertebrados (Figura 17). A pesar de que el pozo no se use para riego, sus aguas son ricas en Cl^- , lo que puede estar impidiendo el desarrollo de poblaciones de invertebrados. El pozo situado en las cercanías de la parcela en la que se ha cultivado patata (punto 005) tiene una significativa abundancia menor de invertebrados; aunque es el único en el que se ha encontrado uno de los grupos característicos de aguas subterráneas: Sincarida.

5. Conclusiones

Por la ubicación del acuífero aluvial en la zona de estudio, encajado entre materiales del Terciario, la recarga del se produce por infiltración de las precipitaciones, aguas de escorrentía y retornos de riego.

La MAS 030.007 adyacente a la Finca Experimental "La Isla" tiene una dinámica perdedora. Alimenta directamente al río Jarama en los tres periodos del año analizados.

Las aguas de la MAS 030.007, río Jarama y Laguna de El Campillo se clasifican como sulfatadas cálcicas magnésicas. Son aguas con una elevada salinidad (entre $750 \mu S/cm$ y $2250 \mu S/cm$) pero bajo contenido en sodio (Na^+), lo que las hace aptas para el riego pero con condicionantes.

El grado de mineralización de las aguas de la MAS 030.007 en la zona de estudio es similar en todos los puntos subterráneos, en los 3 periodos de muestreo. Difiere en el contenido en carbonatos en la Laguna de El Campillo, que es menor. En el río Jarama, que recibe las aguas de la MAS la mineralización es menor por dilución, llegando a niveles mínimos en mayo de 2016 tras un periodo de lluvias abundantes.

Los factores climáticos (lluvia y temperatura) tienen efecto inmediato en la cantidad de agua almacenada en la MAS 030.007. Las lluvias generan incrementos inmediatos del nivel freático.

Las variaciones en el nivel freático de la MAS 030.007 adyacente a la Finca Experimental "La Isla" han sido de hasta 1m en el periodo comprendido entre septiembre de 2015 a mayo de 2016.

La zona de la MAS 030.007 donde se sitúa la Finca Experimental "La Isla", caracterizada por una estructura homogénea y detrítica, es favorable para la fauna acuática subterránea. Las características hidroquímicas de la MAS no tienen una influencia significativa sobre la distribución espacial de esta fauna.

Las comunidades bióticas subterráneas se ven influenciadas por el flujo del agua, nivel de uso de los pozos, riegos y tipo de cultivos de las parcelas.

La fauna acuática subterránea es más abundante en los pozos que no se usan para regadío.

Las comunidades acuáticas subterráneas se ven menos afectadas por los cultivos de cebadas y cereales.

La dirección del flujo del agua en el acuífero da una explicación a la distribución de mayores abundancias en los pozos situados al suroeste de la zona de estudio; puesto que aquí ya se han recogido las aguas de riego de las parcelas centrales que recargan de manera artificial el acuífero (ej. punto 005).



6. Agradecimientos

La obtención de los datos para el desarrollo de este estudio ha sido posible gracias al proyecto de investigación “Smart-Hydro: Sistema inteligente para optimizar el uso de agua en agricultura” con número de expediente **RTC-2014-2367-5** y financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad dentro del programa Retos -Colaboración 2014.



SMART-HYDRO “SISTEMA INTELIGENTE PARA
OPTIMIZAR EL USO DE AGUA EN AGRICULTURA”



Agradecer también la colaboración de la Finca Experimental “La Isla” de Arganda del Rey (Madrid), perteneciente al IMIDRA (Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario); así como la del personal gestor y técnico de las instalaciones.



7. Bibliografía

- Arauzo, M., Martínez Bastida, J.J., Valladolid, M. (2008). Contaminación por nitrógeno en el sistema "río-acuífero aluvial" de la cuenca del Jarama (Comunidad de Madrid, España) ¿Origen agrícola o urbano? *Limnetica* 27(2): 195-210.
- Bardají de Azcárate, I., Cabra Gil, P., Calvo Sorando, J.P., Gil de Mingo, R., Martín Barajas, S., Mogrovejo Gil, J., Ordóñez Delgado, S., Sanz Montero, E., Sastre Merlín, A., de Vega García, M.T., Vela López, A. (1990). Estudio para la ordenación de la actividad extractiva en el tramo bajo del río Jarama. *Servicio de estudios y Planificación. Agencia de Medioambiente*. Comunidad de Madrid.
- Blanco García, I. Rodas, M., Sánchez, C.J., Alonso Azcárate, J. (2007). Gravel washing wastes from Jarama river deposits (Spain): an undervalued natural raw material. *Environmental Geology* 52:1097-1115.
- Blasco, de la Rubia (1973). Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego (U.S Soil Salinity Laboratory). *Laboratorio de suelos, IRYDA*.
- BOE (2009). Real Decreto 1514/2009, de 2 de octubre, por el que se regula la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro. *Boletín Oficial del Estado* 255 (22 de octubre de 2009): 88201-88215.
- Boza Chappuis, L.M. (2016). Cuantificación de la recarga de agua en la Masa de Agua Subterránea (MAS) "Aluviales: Jarama-Tajuña" (030.007) mediante el modelo RENATA. Proyectos 2016 - *Máster Universitario en Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos*. Proyecto Fin de Máster.
- Camacho, A.I. (2003). Four new species of groundwater crustaceans (Syncarida, Bathynellacea, Parabathynellidae) endemic to the Iberian Peninsula. *J. Nat. Hist.* 37, 2885–2907.
- Carreño, F., García, S., Lillo, J., Fernández, R. (2013). 3D Detrital aquifer modelling for water resources management of the Regional Park of the Lower Courses of Manzanares and Jarama Rivers (Madrid, Spain). *Management of Water Resources in Protected Areas* 161-170.
- CHT (2012). Red de control de calidad de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica del Tajo. *Confederación Hidrográfica del Tajo*.
- EEA (2012). El agua en la agricultura. *European Environment Agency (Agencia Europea de Medio Ambiente)*. <Disponible en: <http://www.eea.europa.eu/es/articulos/el-agua-en-la-agricultura>>
- FAO (2002). Agua y cultivos: logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma*. <Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/005/y3918S/Y3918S00.pdf>>
- Fernández Ruíz, L. (2012). *Las aguas subterráneas en la gestión hidrológica*. Instituto Geológico y Minero. Madrid.
- Griebler, C., Stein, H., Kellermann, C., Berkhoff, S., Brielmann, H., Schmidt, S., Selesi, D., Steube, C., Fuchs, A., and Hahn, H.J. (2010). Ecological assessment of groundwater ecosystems – Vision or illusion? *Ecol. Eng.* 36, 1174–1190.



- Hose, G.C., and Lategan, M.J. (2012). Sampling strategies for biological assessment of groundwater ecosystems (CRC CARE Technical Report).
- López-Camacho y Camacho, B., Iglesias Martín, J.A., (2000). Las aguas subterráneas en los abastecimientos. Un decenio de experiencias del Canal de Isabel II. *Revista de Obras Públicas* 3.403: 41-56.
- Nagaraju, A., Sunil Kumar, K., Thejaswi, A., Sharifi, Z. (2014). Statistical Analysis of the Hydrogeochemical Evolution of Groundwater in the Rangampeta area, Chittoor District, Andhra Pradesh, South India. *American Journal of Water Resources* Vol. 2, No. 3:63-70.
- Malard, F., Camacho, A.I., Fiers, F., Galassi, D., Gibert, J., Lefebure, T., Martin, P., Sket, B., Valdecasas, A.G., and Brancelj, A. (2005). Sampling Manual for the Assessment of Regional Groundwater Biodiversity.
- Martínez-Bastida, J., Arauzo, M., Valladolid, M. (2009). Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. *Hidrogeology Journal* 18:681-698.
- Mostaza Colado, D., (2013). Estudio de la evolución hidrogeológica de la masa de agua subterránea (MAS) "Aluviales: Jarama-Tajuña" (030.007). Proyectos 2013 - *Máster Universitario en Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos*. Instituto IMDEA Agua. ISBN 978-84-616-8388-8
- Navarro Alvargonzález, A., Fernández Uría, A., Dobles Domínguez, J.G. (1993). Cuenca del Tajo. Las aguas subterráneas en España. Ed. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. Cap.IX, p. 217-230.
- Panera, J., Torres, T., Pérez-González, A., Ortiz, J.E., Rubio-Jara, S., Uribelarrea del Val, D. (2011). Geocronología de la Terraza Compleja de Arganda en el valle del río Jarama (Madrid, España). *Estudios Geológicos* 67(2): 495-504.
- Peña Hernández, Y., Santacruz de León, G., Charcas Salazar, H. (2012). Calidad del agua en pozos de la red de monitoreo del acuífero del Valle de San Luis Potosí, México. *Aqua-LAC* Vol 4-Nº1: 49-59.
- Peinado-Guevara, H.J., Green-Ruiz, C.R., Herrera-Barrientos, J., Escolero-Fuentes, O.A., Delgado-Rodríguez, O., Belmonte-Jiménez, S.I., Ladrón de Guevara, M.A. (2011). Calidad y aptitud de uso agrícola y doméstico del agua del acuífero del río Sinaloa, porción costera. *Hidrobiológica* 21 (1):63-76.
- Sandino Ramírez, L.N. (2015). Cuantificación de la recarga de agua en la MAS Aluviales Jarama- Tajuña (030.007) mediante el modelo numérico RENATA. Proyectos 2015 - *Máster Universitario en Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos*. Instituto IMDEA Agua. ISBN 978-84-608-4456-3.
- Urbano Terrón, P. (2010). *Tratado de fitotecnia general*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Uribelarrea, D., Pérez González, A., Benito, G. (2003) Channel changes in the Jarama and Tagus rivers (central Spain) over the past 500 years. *Quaternary Science Reviews* 22:2209-2221.
- Wu, H., Chen, J., Qian, H., Zhang, X. (2015). Chemical characteristics and quality assesment of groundwater of exploited aquifers in Beijao Water Sourde of Yinchuan, China: a case of study for drinking, irrigation and industrial purposes. *Journal of Chemistry*. Vol 2015, Article ID: 726340.