

**UNIVERSIDAD DE ALCALÁ  
Y  
UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS**



**MÁSTER OFICIAL EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**PROYECTO FIN DE MÁSTER**

**ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN HIDROGEOLÓGICA  
DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA (MAS)  
“ALUVIALES: JARAMA-TAJUÑA” (030.007)**

**AUTOR:**

**David Mostaza Colado**

**DIRECTORES:**

**Francisco Carreño Conde**

**Javier Lillo Ramos**

Alcalá de Henares, 17 de junio de 2013

Don Francisco Carreño Conde y Don Javier Lillo Ramos, como tutores del proyecto de fin de máster titulado: “**Estudio de la evolución piezométrica de la Masa de Agua Subterránea (MAS) Aluviales: Jarama-Tajuña (030.007)**”, dan su **Visto Bueno** a la presentación y lectura de la memoria de proyecto en la convocatoria de junio de 2013.

*Vº Bº*

**Francisco Carreño Conde**

**Javier Lillo Ramos**

## Índice

1.- RESUMEN.....	1
2.- INTRODUCCIÓN.....	2
2.1.- JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	4
2.2.- ÁREA DE ESTUDIO.....	6
2.2.1.- SITUACIÓN GEOGRÁFICA .....	6
2.2.2.- GEOLOGÍA, HIDROGEOLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA .....	7
2.2.3.- PROBLEMÁTICA AMBIENTAL.....	11
3.- METODOLOGÍA.....	15
3.1.- INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA: DESARROLLO DE UNA BASE DE DATOS GEORREFERENCIADA. ....	15
3.2.- CAMPAÑAS DE CAMPO PARA TOMA DE DATOS .....	16
3.3.- CARTOGRAFÍA TEMÁTICA .....	17
3.4.- LEVANTAMIENTO DE PERFILES TOPOGRÁFICOS Y DETERMINACIÓN LA SUPERFICIE FREÁTICA .....	18
3.5.- DETERMINACIÓN DE FACTORES AMBIENTALES CON EFECTOS EN LA MAS .....	19
4.- RESULTADOS .....	21
5.- DISCUSIÓN .....	34
6.- CONCLUSIONES.....	40
7.- TRABAJOS FUTUROS .....	41
8.- BIBLIOGRAFÍA .....	42

## Índice de tablas

Tabla 1. Naturaleza de las capas suprayacentes en la zona de captación a partir de la cual recibe su alimentación la masa de agua subterránea (superficies que abarcan).....	10
--	----

## Índice de figuras

Figura 1. Localización de la zona de estudio.....	6
Figura 2. Esquema geológico de la zona de estudio.Modificado de Bajardí et al., 1990. ....	8
Figura 3. Perfil geológico de la zona de estudio (NO-SE). Modificado de: IGME, 1972.....	9
Figura 4. Esquema de la red de flujo del Sistema Acuífero de Madrid.....	11
Figura 5. Usos del suelo en la zona de estudio (Corine Landcover, 2006).....	13
Figura 6. Localización de los perfiles estudiados en la zona de trabajo.....	19
Figura 7. Red de control piezométrico y calidad de la MAS en el área estudiada.....	22
Figura 8. Mapa de isopiezas para la campaña de diciembre de 2012 (días 19 y 20 de diciembre), donde se indican las zonas de recarga local.....	23
Figura 9. Mapa de isopiezas para la campaña de abril de 2013 (días 15 y 16 de abril), donde se indican las zonas de recarga local. ....	24
Figura 10. Isodescensos de la MAS 030.007 (periodo interanual: abril de 2012 a abril de 2013).....	26
Figura 11. Isodescensos de la MAS 030.007 (periodo interanual: enero 2012 a diciembre 2012). ....	27
Figura 12. Isodescensos de la MAS 030.007 (periodo interestacional: abril 2012 a septiembre 2012). ....	28
Figura 13. Perfil topográfico y piezométrico I.....	29
Figura 14. Detalle de la variación de niveles piezométricos en el perfil I.....	29
Figura 15. Perfil topográfico y piezométrico II. ....	30
Figura 16. Detalle de la variación de niveles piezométricos en el perfil II.....	30
Figura 17. Perfil topográfico y piezométrico III. ....	31
Figura 18. Detalle de la variación de niveles piezométricos en el perfil III.....	31
Figura 19. Evolución temporal de la temperatura media, precipitación media y evapotranspiración en el periodo de octubre de 2011 a abril de 2013. ....	32
Figura 20. Mapa de isopiezas para la campaña de enero de 2012.....	45
Figura 21. Mapa de isopiezas para la campaña de abril de 2012.....	46
Figura 22. Mapa de isopiezas para la campaña de septiembre de 2012.....	47

## Índice de acrónimos

ARU: aguas residuales urbanas

CSIC: Centro Superior de Investigaciones Científicas

ET: evapotranspiración

LIDAR: *Laser Imaging Detection and Ranging*

MAS: masa de agua subterránea

NE: noreste

NO: noroeste

SE: sureste

SO: suroeste

UTM: *Universal Transverse Mercator*

ZNS: zona no saturada



## **Agradecimientos**

A mis directores, por la ayuda prestada durante la realización de este trabajo fin de máster, así como por la confianza que han depositado en mí.

A mis amigos y familiares, por el apoyo prestado y los buenos ratos

## **1.- RESUMEN**

La masa de agua subterránea (MAS) Aluviales: Jarama-Tajuña es una de las más afectadas por la actividad antrópica de la Comunidad de Madrid. Impactos como la extracción de áridos del aluvial del río Jarama, los vertidos de aguas contaminadas procedentes de industrias y núcleos urbanos, así como los retornos de riego con concentraciones de pesticidas y fertilizantes son notables a lo largo de la zona superficial de la MAS. A esto está unido que las características hidrogeológicas del acuífero lo clasifican como de elevada vulnerabilidad con una zona no saturada altamente permeable y nivel freático a menos de 5m de profundidad.

En este trabajo se ha estudiado la evolución hidrogeológica de la MAS a lo largo de un periodo temporal de año y medio; desde enero de 2012 a abril de 2013. Se realizaron 2 campañas de campo para medir los niveles piezométricos del acuífero y se tomaron datos de campañas anteriores, realizadas para otra investigación.

Mediante el análisis del flujo del agua dentro de la MAS, y considerando su evolución en función de la época del año, cuáles son las zonas de recarga y descarga de agua al acuífero, cómo afectan las zonas de extracción de áridos repartidas por el área de estudio y qué efecto tienen los usos del suelo sobre el flujo del agua subterránea se ha modelizado el comportamiento del agua en el subsuelo. Así se concluye que la MAS Aluviales: Jarama-Tajuña (030.007) es un acuífero que descarga al río Jarama en la zona norte, está afectado por las zonas de extracción en su parte central (lo que produce pérdida de recursos) y consta de una zona de vegas en las que el flujo del agua es percolante en todas las épocas del año; sin que llegue a haber periodo de estiaje.



## **2.- INTRODUCCIÓN**

Los estudios hidrogeológicos son de especial interés en la actualidad, tanto para la provisión de agua como para comprender los procesos físicos y químicos que están ocurriendo en las masas de agua subterráneas (MAS) (definidas como un volumen claramente diferenciado de aguas subterráneas en un acuífero o acuíferos (DOCE, 2000; Fernández, 2001)). El incremento de la demanda de un recurso tan vital como el agua, junto con el aumento de actividades con capacidades de impacto sobre el medio hidrogeológico (actividades extractivas, urbanas, industriales y agrícolas o vertidos contaminantes accidentales o continuados) han supuesto el auge del interés en la evaluación de estos sistemas ambientales complejos.

Por sus características geológicas las llanuras aluviales y terrazas son zonas de gran interés para el sector de la minería extractiva (Blanco García, 2007), ya que es en estas zonas donde se producen las acumulaciones más importantes de sedimentos de grano grueso (Kuchovsky et al., 2008) y la accesibilidad a fuentes de agua para los procesos productivos está garantizada. La actividad de estas empresas supone que en determinados puntos de las llanuras aluviales se generen grandes remociones del material que se comporta como acuífero y que se encuentra asociado a la MAS. Sin embargo, el aprovechamiento de recursos mineros mediante actividades extractivas, incluidas las explotaciones de áridos a cielo abierto y especialmente aquellas emplazadas sobre MAS pueden generar fuertes impactos sobre los recursos hídricos. Éstos deben ser evitados o minimizados en todo lo posible, de manera que se garantice la sostenibilidad de la actividad y se compatibilice con la conservación de la calidad ambiental del medio (ANEFA, 2007).

Cuando la gravera en activo corta la superficie del nivel freático, el riesgo de contaminación del acuífero aumenta; no existe una capa superficial de materiales (lo que se conoce como zona vadosa) a través de la cual el agua pueda infiltrarse y someterse a reacciones biogeoquímicas naturales que atenúen la contaminación o modifiquen sus características físico-químicas (Hatva, 1994). Como consecuencia de esto, pueden tener lugar procesos de acidificación de las aguas subterráneas, que alterarían el equilibrio geoquímico en que se encuentra la MAS llegando incluso a incorporarse elementos como el aluminio (Al) o elementos tóxicos en concentraciones de traza (As, Cd, Pb, Cu, Zn y Ni) que se encuentran en las aguas superficiales y los sedimentos (Hansen y Postma, 1995). En el caso de las explotaciones a cielo abierto, se generan acumulaciones de agua que al quedar expuesta

sufre un incremento de la evaporación directa y con ello la evapoconcentración de solutos, ya que no existe la capa de terreno que amortigua estos efectos. Pero las afecciones no se centran únicamente en la calidad hidrogeoquímica de las aguas del acuífero, sino que también el balance hidráulico de la zona puede verse modificado, teniendo efecto sobre los patrones piezométricos y las líneas de flujo de la MAS (Hobbs y Gun, 1998).

Como dato de la importancia de la industria extractiva de áridos en España, nuestro país llegó a ocupar el segundo puesto en cuanto a producción de áridos en Europa en 2004, únicamente por detrás de Alemania. La media de consumo en 2006 ascendía a 11Tm por habitante y año (la media europea se situaba en 7Tm/hab·año) y un total de 485 millones de Tm consumidas. A partir del año 2007, debido a la situación de crisis en el sector de la construcción se produjo un descenso progresivo en la extracción, que en 2010 llegó a valorarse en un 55% de toda la producción del sector (ANEFA, 2010). No toda la extracción de áridos se produce en aluviales, pero son datos a tener en cuenta para valorar la magnitud de las extracciones que se hacen sobre zonas de este tipo.

Por otra parte, existen factores geológicos, geomorfológicos e hídricos que hacen que el sector agrícola tienda a asentarse en los valles aluviales y terrazas de los ríos. En las áreas de las llanuras de inundación cercanas al cauce del río (proximales) se producen depósitos arenosos (debido a la brusca desaceleración de la corriente) que se intercalan con arcillas (que representan el depósito de las partículas en suspensión tras la inundación). Las llanuras más alejadas del cauce (distales) consisten básicamente en arcillas con intercalaciones carbonatadas, formadas en lagos efímeros, y niveles delgados de arenas finas y limos (Dabrio y Fernández, 1980). La regularidad del terreno en estas zonas, la composición de los suelos, junto con la cercanía y la facilidad de acceso al agua han hecho que históricamente sean zonas de cultivos agrícolas de regadío. Con la llegada del siglo XX y los procesos de modernización de las infraestructuras así como el empleo de productos fitosanitarios y fertilizantes para incrementar la producción se ha pasado de una agricultura de tipo extensivo a intensiva. Como consecuencia de esto pueden encontrarse trazas de insecticidas organoclorados (PCBs) y metales pesados en los sedimentos de los ríos (Fernández, 2000) y concentraciones de nitratos (que tienen como principales factores de aparición el riego y la aplicación de fertilizantes en exceso, así como la escasa profundidad a la que se encuentra el nivel freático) (Arauzo et al., 2008). El origen de esta contaminación se encuentra en la interacción que existe entre los ríos y sus acuíferos asociados. Ya sea por infiltración de agua de lluvia o por el empleo de sistemas de regadío, puede generarse un flujo de agua

descendente que arrastre estas sustancias contaminantes presentes en los suelos de los campos de cultivos y las introduzca en el acuífero o corriente fluvial (Arauzo et al., 2008), generando contaminación dispersa. Cuando se trata de infiltración de agua procedente de regadío, si el volumen de este flujo es significativo puede modificar la dinámica hídrica del sistema río-acuífero; aporta de manera artificial agua en momentos del año en que no ocurre de forma natural, como pueden ser los periodos de estiaje.

Por último, los núcleos urbanos e industriales que se emplazan a lo largo del cauce del río generan aguas residuales que deben ser depuradas antes de su vertido al dominio público hidráulico. En función de cómo actúe el sistema río-acuífero (ganancias o pérdidas relativas de agua) o de los usos del suelo que se den en las zonas que afecten al acuífero (relaciones descritas anteriormente) es probable que la contaminación se difunda entre los distintos subsistemas (superficiales y subterráneos). Las aguas residuales urbanas (ARU) depuradas son un vector de entrada de materia orgánica disuelta, nitratos, fosfatos y sólidos en suspensión a los sistemas ambientales; con concentraciones en algunos casos y periodos temporales por encima de lo marcado por la legislación vigente en la Directiva 91/271/CEE (DOCE, 1991; Mostaza, 2012). Debe tenerse en cuenta este influente a la hora de estudiar la dinámica del sistema fluvial y del acuífero.

Con la implantación de la Directiva 91/271/CEE (DOCE, 1991) se marcaron los criterios de calidad de los vertidos urbanos y de determinación de zonas sensibles (en las que la calidad del vertido debe ser mayor) a fin de evitar la contaminación y eutrofización de masas de agua. De igual modo, años más tarde, se redactó la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE (DOCE, 2000) con el fin de establecer un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, para la gestión y protección de las mismas. Esta normativa constituye como uno de sus objetivos básicos la protección de las aguas subterráneas. Aunque declare como finalidad primordial mantener y mejorar el medio acuático (orientado básicamente a las aguas superficiales), tiene en cuenta que el estado de las MAS repercute en los ecosistemas acuáticos y terrestres asociados a ellas y desde esa perspectiva exige el buen estado cualitativo y cuantitativo de las aguas subterráneas (Fernández, 2001).

## 2.1.- JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los principales problemas que afectan a las aguas subterráneas en la actualidad están relacionados con los niveles de los acuíferos (estado cuantitativo) y con la calidad de sus aguas (estado químico o cualitativo), como se ha descrito anteriormente. Por todo ello se

hace evidente la necesidad de estudiar el sistema acuífero-río para mejorar la gestión de los recursos, evitando la degradación o sobreexplotación de los mismos.

La manera de que esta necesidad se lleve a cabo correctamente ha sido mediante la redacción de normativa legal que lo contemple. La aprobación de la Directiva Marco del Agua (DOCE, 2000) supuso un hito en la gestión de las aguas y fijó los plazos de cumplimiento de objetivos medioambientales. Con ella se busca conseguir el buen estado de todas las aguas: continentales, de transición, costeras y subterráneas; entendiendo como buen estado para las aguas subterráneas el buen estado químico y el buen estado cuantitativo.

De acuerdo a todas estas consideraciones, se pone de manifiesto que la incidencia de las actividades del sector primario (por ejemplo, minería y agricultura) desarrolladas en un territorio requiere de medidas de gestión y explotación que permitan el aprovechamiento de los recursos hídricos sin poner el peligro la sostenibilidad de los mismos; cumpliendo en todo momento con los objetivos dispuestos por la legislación vigente. Aspectos generalmente poco o no considerados, como el estudio de las interacciones entre el río y el acuífero aluvial asociado pueden proporcionar información necesaria para la gestión sostenible de los recursos a escala de cuenca (Arauzo et al., 2008).

Por todo ello, el conocimiento del estado de los niveles piezométricos de la MAS, de los flujos de agua y de las afecciones que las graveras y actividades agrícolas, industriales y urbanas pueden tener sobre ella, constituyen un elemento importante para afianzar el conocimiento que se tiene del medio.

Este proyecto de fin de máster forma parte de un conjunto de tres, que buscan estudiar los impactos que está sufriendo el sistema aluvial río-acuífero en la MAS Aluviales: Jarama-Tajuña (030.007). Mediante el estudio de la evolución hidrogeológica de la MAS desde un punto de vista cuantitativo (variación de la dinámica del acuífero y de los niveles piezométricos) y desde un punto de vista cualitativo (calidad química de las aguas subterráneas (Ráez, 2013) y calidad química de las aguas superficiales (García, 2013)) se pretende tener una visión del comportamiento de la MAS y comprender los factores y procesos que la puedan estar afectando.

## 2.2.- ÁREA DE ESTUDIO

### 2.2.1.- SITUACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio (Figura 1) se sitúa en el sureste de la Comunidad de Madrid, tiene una superficie de 148km<sup>2</sup> aproximadamente. Abarca desde la confluencia de los ríos Jarama y Henares (en los alrededores del municipio de San Fernando de Henares) hasta el paso del río Jarama por el municipio de Titulcia. Incluye áreas de los municipios de Madrid, Coslada, San Fernando de Henares, Mejorada del Campo, Velilla de San Antonio, Rivas-Vaciamadrid, Arganda del Rey, San Martín de la Vega, Ciempozuelos y Titulcia. Dentro de la zona de estudio se encuentra parte del Parque Regional del Sureste de la Comunidad de Madrid (declarado como zona protegida por el Gobierno Regional en 1994), que ha venido sufriendo a lo largo del tiempo una seria degradación debida a las actividades urbanas, agrícolas e industriales que se desarrollan alrededor del mismo (Fernández et al., 2000). Uno de los componentes de especial interés de la zona es el sistema río-acuífero, contenido en la masa de agua subterránea “Aluviales: Jarama-Tajuña” (con código identificativo 030.007); perteneciente a la cuenca hidrográfica del río Tajo y gestionada por la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT). El área objeto de estudio se solapa con parte de la extensión de la MAS 030.007: desde su extremo norte hasta las proximidades de la desembocadura del río Tajuña en el río Jarama (Figura 1).

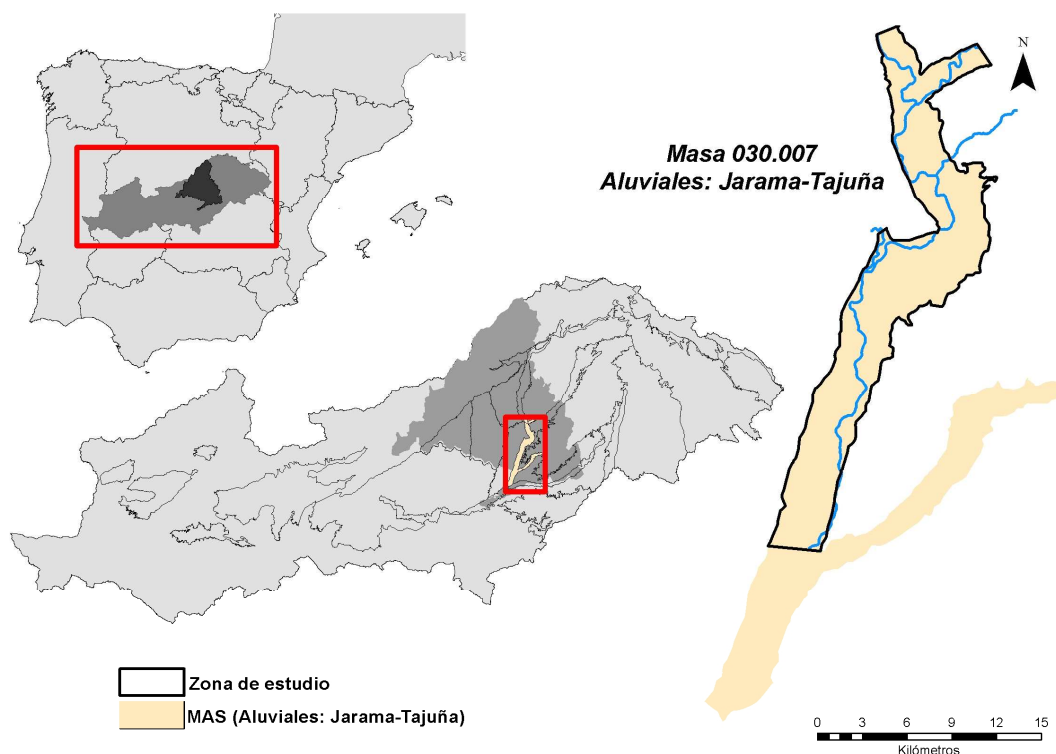


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

El extremo norte de la zona de estudio abarca también parte de las MAS “Aluvial del Jarama: Guadalajara-Madrid” y “Guadalajara”. Puesto que constituyen el límite superior se han controlado también con puntos de control piezométrico. No serán objeto de investigación de este proyecto, pero se han tenido en cuenta por existir pozos de muestreo en ellas y por ser el límite superior de la zona de interés.

El río Jarama es afluente del Tajo en las cercanías de la localidad de Aranjuez, en la zona de estudio tiene un comportamiento meandriforme; recibiendo aguas de varios afluentes: río Henares y arroyo Pantueña por la margen izquierda y río Manzanares por la derecha.

La cuenca del río Jarama, en la que se encuentra la MAS Aluviales: Jarama-Tajuña, es la más antropizada de la Comunidad de Madrid. Sus recursos hídricos se ven sometidos a una intensa e insostenible demanda de agua y a una elevada carga de contaminación de origen urbano e industrial (Arauzo et al, 2008). A esto se suman las numerosas graveras para la extracción de áridos que se han establecido en la zona en las últimas décadas, algunas de las cuales siguen en activo, mientras que otras han sido abandonadas.

#### 2.2.2.- GEOLOGÍA, HIDROGEOLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA

Este río es el sistema fluvial más importante de la zona central de España; sistema que supone un cuarto de la superficie de la Comunidad de Madrid (Blanco-García et al., 2007). El tramo alto del río Jarama recibe sus aguas principalmente del Sistema Central (formado por granitos, gneises, cuarcitas y pizarras mayoritariamente) desde su nacimiento en Sierra Cebollera, a 2.119m de altitud.

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) (Uribelarrea et al., 2003). En su parte superficial, esta cuenca está atravesada por el río Jarama, que la cruza de norte a sur. La geología (Figura 2 y Figura 3) 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 3.500m (Racero, 1998 en Blanco García et al., 2007); sobre los que están situadas las formaciones cuaternarias asociadas a la dinámica fluvial del río (Bardají et al, 1990). Estos materiales terciarios afloran a ambos lados del acuífero en cuatro unidades características: 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) y calizas (de carácter lacustre y con espesores inferiores a los 40m) (Bardají et al, 1990) (Blanco García et al., 2007).

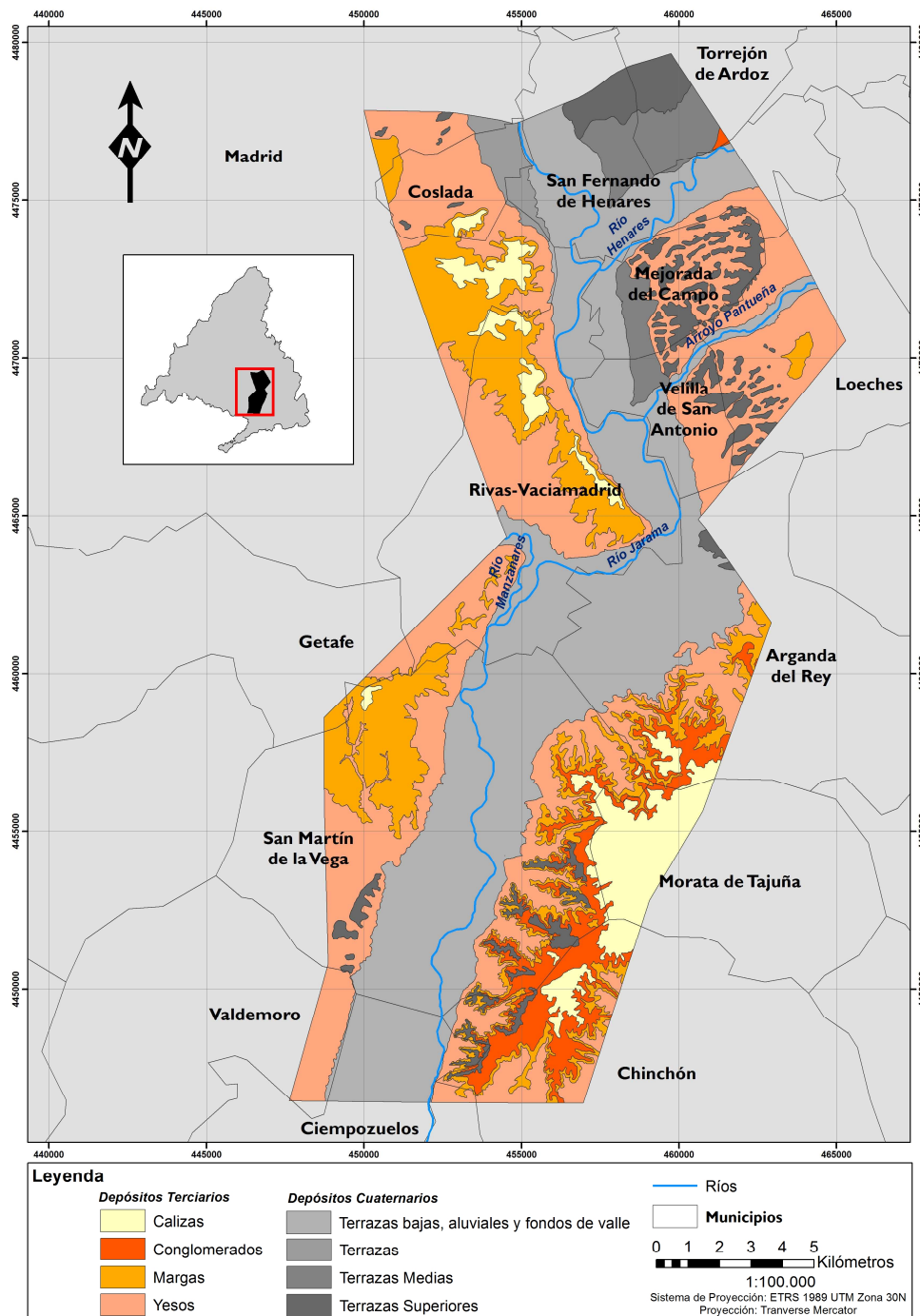
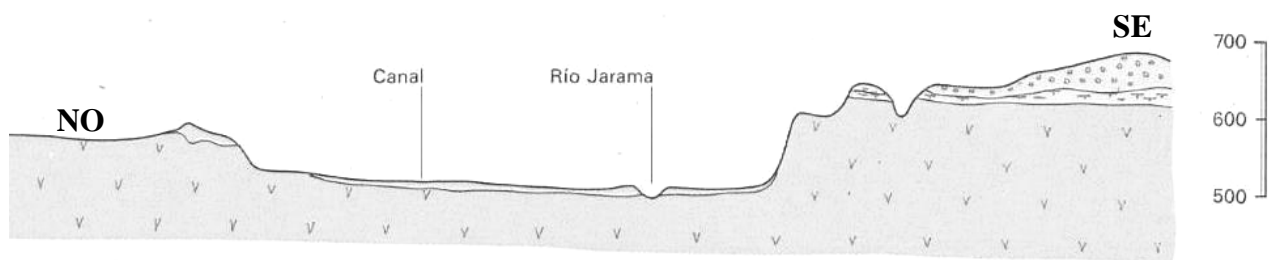


Figura 2. Esquema geológico de la zona de estudio. Modificado de Bajardí et al., 1990.

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 (Figura 3).

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.



**Figura 3. Perfil geológico de la zona de estudio (NO-SE). Modificado de: IGME, 1972.**  
**Leyenda de techo a muro: I(coluviones, arcillas yesíferas, yesos, gravas, arcillas y arenas), II(margas blancas, calizas, arenas y yesos laminares) y III(margas yesíferas grises y verdes).**

El conjunto inferior abarca los sedimentos actuales ubicados en el cauce del río, sedimentos de fondo de valle, llanura de inundación y terrazas del río Jarama. Las zonas de terrazas, distribuidas paralelamente a lo largo del cauce (Figura 3) 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 (Figura 5).

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.



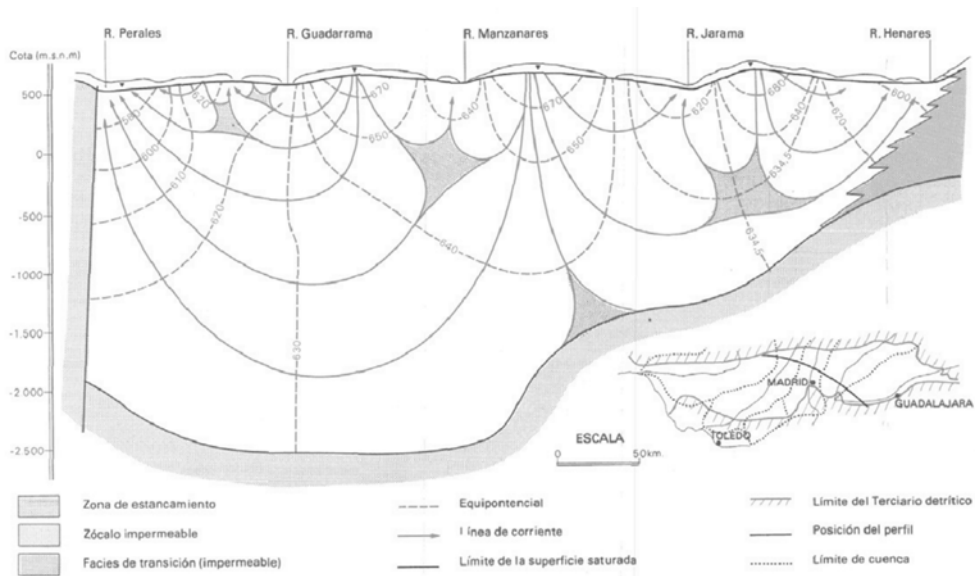
La MAS Jarama-Tajuña (030.007) tiene una superficie total aproximada de 207Km<sup>2</sup> (CHT, 2007). El acuífero detrítico del sector bajo del río Jarama está definido por la unidad hidrogeológica de “Terrazas bajas y medias-aluviones y coluviones” y formado por el conjunto de terrazas inferiores y medias conectadas hidráulicamente entre sí y con el río. El acuífero es de tipo libre, recarga principalmente por la infiltración de agua de lluvia sobre suelos aluviales y coluviales en su mayoría (Tabla 1) y por percolación del Terciario infrayacente (yesos) (Bardají et al., 1990), pero también por retornos de riego (CHT, 2007). Los perfiles edáficos dominantes son de tipo Fluvisol y Luvisol (muy permeables) (Guerra y Moturiol, 1970; Monturiol y Alcalá, 1990 en Arauzo et al., 2008).

**Tabla 1. Naturaleza de las capas suprayacentes en la zona de captación a partir de la cual recibe su alimentación la masa de agua subterránea (superficies que abarcan) (Fuente: CHT, 2007)**

	Km <sup>2</sup>	%
Rendziniformes sobre margas	17	8,45%
Suelos aluviales, coluviales y transformados por el riego	145	69,93%
Suelos pardos calizos	9	4,56%
Tierra parda sobre depósitos alóctonos pedregosos	35	17,05%

El nivel freático en el acuífero oscila entre 0,25m y 6m de profundidad (Bardají et al., 1990) en función de la zona. La descarga es directa hacia los ríos, debida en gran parte al flujo local de la zona de terrazas (Bardají et al., 1990), aunque existe también un cierto flujo regional (Figura 4), 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); los valores de transmisividad oscilan entre 632 m<sup>2</sup>/día y 3.500m<sup>2</sup>/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 9,250Hm<sup>3</sup>, lo que representa unas reservas de aguas subterráneas de 1,250Hm<sup>3</sup>. Las aguas del acuífero presentan en general 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 clima de la zona de estudio se caracteriza por unas marcadas variabilidades estacionales y mensuales, con veranos secos y calurosos e inviernos fríos y húmedos. Los volúmenes de precipitación son máximos entre los meses de febrero a marzo, con máximos en diciembre y descensos en enero; el mes de mínima precipitación es agosto (Uribelarrea et al., 2003).



**Figura 4. Esquema de la red de flujo del Sistema Acuífero de Madrid. (Tomada de Navarro Alvargonzález, 1993)**

### 2.2.3.- PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

La problemática ambiental asociada a la MAS del río Jarama se debe a las características intrínsecas de la zona y a las actividades que se desarrollan en ella.

En el ámbito geológico, el carácter aluvial del terreno hace que la vulnerabilidad del acuífero sea elevada, estando la zona de estudio caracterizada como “zona muy vulnerable debido a materiales permeables por porosidad y fisuración” según el Mapa Hidrogeológico de España (ITGME, 1997). Navas et al. (1998) en Arauzo et al. (2008), describen la unidad hidrogeológica cuaternaria como de vulnerabilidad muy alta, con una zona no saturada altamente permeable y nivel freático a menos de 5m de profundidad. La alta permeabilidad del sustrato junto con la escasa profundidad del nivel freático contribuyen a que aumente la vulnerabilidad de la MAS subyacente.

Es en la zona del curso medio-bajo donde los recursos hidrogeológicos del río están sometidos a una intensa explotación en cuanto a la demanda de agua, a la capacidad de acogida de vertidos (en gran parte por las características de los núcleos urbanos que

atraviesa el cauce) y a la extracción de áridos. El carácter aluvial de la zona de estudio (Figura 2), junto con su proximidad geográfica a Madrid y otros núcleos urbanos donde la construcción ha sido un factor importante en su desarrollo, ha hecho que durante años se instalasen numerosas empresas de extracción de áridos. En la actualidad existen puntos de extracción todavía en activo y otros que han sido abandonados y restaurados como lagunas artificiales (Figura 5), por ejemplo.

El impacto que generan las graveras en el acuífero es muy significativo. A parte de los mencionados anteriormente; según Bardají (1990), cuando la extracción se genera por debajo del nivel freático algunos de los impactos son: desaparición física de parte del acuífero (zona saturada), descenso del nivel freático en la zona de extracción y alteración de la red de flujo por relleno con materiales de diferentes características, aparición de laguna residuales por cortes de la superficie freática, susceptibilidad a la degradación de la calidad del agua, e incremento del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del entorno al perderse la capa de material superficial. Cuando la explotación no llega al nivel freático los impactos que pueden producirse según Bardají, (1990) son: desaparición del soporte susceptible de albergar agua subterránea en caso de incremento del nivel piezométrico, descenso de la capa de protección frente a la contaminación de las aguas subterráneas y posibilidad de percolación hacia el acuífero de sustancias contaminantes que pudiesen estar contenidas en los materiales de relleno por movilización por aguas de infiltración.

Las explotaciones de áridos provocan, por tanto, un impacto significativo tanto en la fase de explotación como en la de abandono, lo que incrementa la vulnerabilidad del acuífero y hace necesarias acciones para protegerlo.

La demanda de agua para abastecer los usos agrícolas a lo largo de los 100Km<sup>2</sup> aproximados de superficies de cultivo de la zona de estudio es elevada. Los cultivos de verano se basan en maíz, alfalfa y arbóreos (regados por inundación) mientras que existen zonas de las vegas que se riegan por aspersión (Arauzo et al., 2008). Las Vegas de la Comunidad de Madrid (Vega del Jarama, del Henares, del Tajuña y del Tajo) están situadas sobre los depósitos aluviales de la cuenca del Jarama (solapándose con el acuífero aluvial), y sus economías se basan principalmente en la agricultura de regadío (Arauzo et al., 2008). Parte de esta demanda se cubre en la zona norte y centro mediante el empleo de pozos (San Fernando de Henares, Mejorada del Campo, Velilla de San Antonio, Rivas-Vaciamadrid y Arganda del Rey). En la zona de la Vega Baja del Jarama la demanda se cubre de manera diferente. Existe una infraestructura denominada “Presa del Rey” (Figura 5), dentro del término

municipal de Rivas-Vaciamadrid. La finalidad de este azud es retener el agua del río Jarama y distribuirlo a lo largo de 70Km de canales y acequias, que atraviesan los términos municipales de San Martín de la Vega y Ciempozuelos, entre otros, y acaban desembocando en el término municipal de Mocejón (Toledo) en el río Tajo. Este sistema de riego con aguas procedentes de la red fluvial ha hecho que desaparezca la explotación de la mayoría de pozos en esta zona de aluvial (Arauzo et al., 2008).

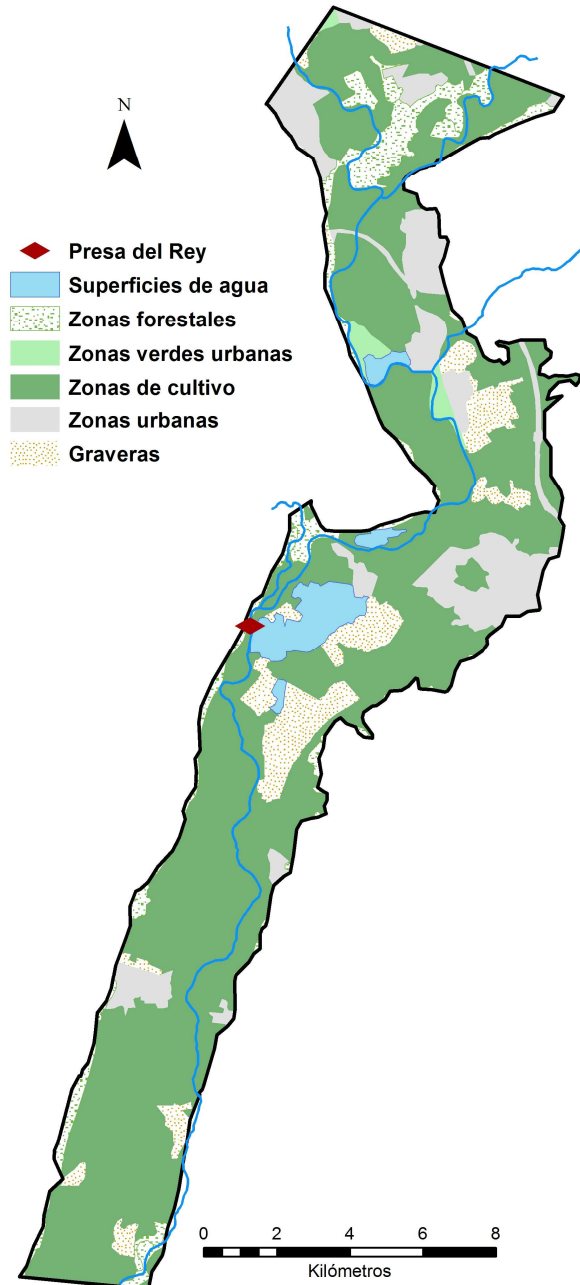


Figura 5. Usos del suelo en la zona de estudio (Corine Landcover, 2006). Ubicación de graveras, lagunas y "Presa del Rey"

Como consecuencia de los métodos empleados en el regadío, los retornos de riego hacia el acuífero y al río son importantes (Arauzo et al., 2008). La influencia que éstos tienen sobre el medio receptor no está solo condicionada por las características de estas aguas (concentración de fertilizantes o plaguicidas), sino también por las características del acuífero (Causapé, 2007). Por ello es importante conocer los flujos de agua en el sistema para poder valorarla.

### **3.- METODOLOGÍA**

El proyecto que aquí se desarrolla se centra en el estudio de la evolución hidrogeológica de la MAS en un periodo espacial de año y medio, para el que se tendrán en cuenta las particularidades del acuífero y los factores ambientales externos que le afectan.

#### **3.1.- INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA: DESARROLLO DE UNA BASE DE DATOS GEORREFERENCIADA.**

Para el estudio de la evolución de la superficie freática de una MAS se necesita conocer la altura del nivel piezométrico a lo largo de la misma. Esta vendrá determinada por la presión atmosférica en acuíferos libres y por la presión a la que se encuentre el acuífero en los confinados. La MAS 030.007 es un acuífero libre; por ello, en los puntos en los que haya perforaciones o pozos el agua permanecerá en el nivel en que se corte esta superficie. Así mismo, descensos en la zona saturada implicarán descensos en el nivel de la superficie freática. El estudio hidrogeológico que aquí se trata se ha realizado mediante la medición de profundidades de agua en pozos abiertos o sondeos.

Se disponía de un primer inventario de puntos de agua (Mota, 2012) entre los que figuraban pozos privados, pozos de instituciones que colaboraban con el estudio y pozos de los que se desconocía su titularidad, por no estar en propiedades cerradas. Empleando como punto de partida este inventario, se construyó una base de datos georreferenciada para almacenar la información y poder gestionarla. De esta forma fue posible gestionar la red de control piezométrica y de calidad de la MAS.

El diseño de la base de datos consta de tres tablas principales: una tabla (I) para caracterizar la masa de agua (en previsión de poder añadir datos de campo de otras masas), una tabla (II) con información sobre cada punto de muestreo (coordenadas geográficas y UTM, cota del punto, altura del brocal y diámetro del pozo, dirección, municipio, imágenes de los pozos y planos de acceso a la zona, entre otros) y una tabla (III) con datos de las campañas de muestreo (nombre de la campaña, fecha, profundidad del agua y piezometría calculada). Las tablas I y II se relacionan mediante el código de identificación de la MAS (030.007) en este caso, de forma que haya tantas tablas II como MAS en la base de datos. La tabla II genera automáticamente un número de tres cifras (000) para identificar cada uno de los pozos; se emplea como elemento de relación con la tabla III, de manera que cada pozo se enlaza con los datos tomados en campo.

La base de datos permite obtener fichas para cada pozo, de manera que se pueda tener en campo la información para la ubicación y toma de datos. Además, se puede acceder a la misma desde cualquier dispositivo móvil u ordenador a través del navegador, permitiendo introducir datos en tiempo real según se toman en campo.

En cada campaña de campo se fueron anotando datos sobre las características de los pozos, de manera que la base de datos estuviese en continua actualización para ayudar en futuras campañas de campo.

El software empleado para gestionar la base de datos ha sido *Filemaker Pro 12* sobre *Mac OS X* (versión 10.8).

### 3.2.- CAMPAÑAS DE CAMPO PARA TOMA DE DATOS

Al inicio de este proyecto, ya se habían llevado a cabo varias campañas de campo anteriores para la localización y medición de pozos y niveles piezométricos; en los meses de enero, abril y septiembre de 2012 (Mota, 2012). Las campañas posteriores (diciembre de 2012 y abril de 2013) se desarrollaron en el marco de este proyecto de investigación. Tuvieron lugar los días 19 y 20 de diciembre y 15 y 16 de abril y se tomaron medidas de los niveles piezométricos, muestras de agua subterránea a través de pozos (Ráez, 2013) y muestras de agua de cauces superficiales (García, 2013) (Figura 7).

Durante las campañas se midió la profundidad a la que se encontraba la superficie freática de los pozos inventariados mediante una sonda eléctrica. Este dispositivo consta de un carrete con cinta métrica a la que está unida una sonda de acero inoxidable, cuando la sonda toca el agua se cierra el circuito eléctrico y la batería contenida en el carrete hace sonar una alarma. Se tomaron anotaciones de las características del entorno, de las de los puntos de muestreo y de los posibles comentarios de los dueños de pozos o agricultores de la zona.

La selección de estas fechas atiende al comienzo del año hidrológico, buscando que el espacio temporal entre toma de datos fuese trimestral (cuatro campañas anuales) y ajustándose al calendario del curso académico. De esta manera se pretende responder a las necesidades de explorar los efectos de las precipitaciones invernales (momento en el que se esperaba que la superficie freática se encontrase en su nivel más alto) y el estiaje (momento de menor recarga y mas evapotranspiración) en la dinámica del acuífero. También se pretendía explorar los efectos de la agricultura de regadío sobre la dinámica hídrica en el sistema río-acuífero. Se esperaba que en el periodo de verano (durante la máxima demanda

de agua de los cultivos) hubiese variaciones, debido a las extracciones que se hacen desde el cauce fluvial (Arauzo et al., 2008).

### 3.3.- CARTOGRAFÍA TEMÁTICA

Para el diseño de la cartografía temática que sirve como base para el estudio de la evolución hidrogeológica de la MAS, se ha empleado el software *ArcMap*. La información georreferenciada de los puntos de agua se obtuvo de la base de datos, en la que previamente se habían introducido los valores de las cota del terreno, obtenidos a partir del vuelo LIDAR 2010 obtenido a través de la Comunidad de Madrid.

Conociendo la cota del terreno ( $C$ ), la profundidad de la superficie freática en el pozo ( $p$ ) y el brocal ( $b$ ) del mismo, se calculó el nivel piezométrico del acuífero ( $NP$ ), según la fórmula:

$$NP = C - (p - b)$$

Posteriormente se procedió a representar los pozos en la cartografía junto con sus valores de nivel piezométrico en las diferentes campañas de campo.

Conociendo la extensión del acuífero, los límites impermeables y las cotas del nivel piezométrico a lo largo del mismo es posible para dibujar las líneas equipotenciales (o isopiezas) del acuífero. Se emplearon diferentes herramientas de *ArcMap*. En primer lugar se interpolaron los datos empleando el procedimiento geoestadístico *Kriging*, que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersos. Sirve, por tanto, para hacer una composición aproximada de la situación de las líneas equipotenciales aparentes del acuífero en vista a un procesado posterior para obtener la superficie definitiva. El uso de esta herramienta implica que se deba estudiar el comportamiento espacial de fenómeno representado, ya que no tiene en cuenta los límites impermeables del acuífero ni las masas superficiales de agua (ríos o lagunas) que pueden estar aportándola o extrayéndola.

Además hay que determinar el método de aproximación que mejor se adapte al comportamiento espacial del fenómeno representado. Se optó por emplear el método *Kriging* ordinario con un modelo de semivariograma lineal, ya que ofrece resultados más acordes al comportamiento normal de la superficie de un acuífero detrítico (Kumar, 2006). El resto de opciones de configuración de la herramienta se mantuvieron como las determinó el programa por defecto.

Una vez obtenido el archivo *raster* (imagen de mapa de bits) de la superficie equipotencial aparente de la MAS, se dibujaron las líneas equipotenciales aparentes en intervalos de 2m



mediante la herramienta de *ArcMap* “curvas de nivel”. Esta primera aproximación sirvió para tener una visión global de la situación del acuífero y poder localizar pozos con mediciones erróneas o en situaciones anormales. Se decidió no tener en cuenta los pozos situados fuera del aluvial o en MAS adyacentes (puntos con ID 013, 030 y 031) (Figura 7), ni aquellos que por los valores de profundidad medidos se dedujera que pudieran estar en uso, lo que implicaría que el nivel freático estuviese en situación dinámica (puntos con ID 037, 045 y 050) (Figura 7).

Finalmente se dibujaron las isopiezas para cada una de las 5 campañas de campo existentes, teniendo en cuenta las características y propiedades de la MAS de estudio para visualizar la situación hidrogeológica y obtener un modelo de la distribución de los flujos de agua subterránea en cada periodo.

Partiendo del modelo de isopiezas se interpolaron las líneas equipotenciales (mediante la herramienta “*topo a raster*” de *ArcMap*) para obtener un modelo más acorde a la realidad de la superficie piezométrica de la MAS en la zona de estudio. De esta manera se estimó la superficie piezométrica en la totalidad de la extensión del acuífero en cada una de las diferentes campañas de campo. Puesto que las superficies totales estaban modeladas mediante archivos raster (mapa de bits) se llevaron a cabo operaciones algebraicas: restas entre campañas para evaluar los isodescensos de la MAS en los periodos interanuales (abril de 2012 - abril de 2013 y enero de 2012 – diciembre de 2012) e interestacionales (abril 2012 –septiembre de 2012).

### 3.4.- LEVANTAMIENTO DE PERFILES TOPOGRÁFICOS Y DETERMINACIÓN LA SUPERFICIE FREÁTICA

Hasta este punto la metodología se había basado en obtener datos en dos dimensiones (X e Y) únicamente. Mediante la comparación de perfiles topográficos y de perfiles piezométricos (Figura 6) en varios puntos de la zona de estudio se pretende tener una visión espacial de la evolución de la MAS.

Las zonas estudiadas son dos:

- Zona central (Rivas-Vaciamadrid y Arganda): puesto que es en la que se concentra la mayoría de puntos de extracción de áridos, se va a estudiar la evolución de la MAS en detalle. Se realizaron dos levantamientos, uno con orientación noroeste (NO) sureste (SE) (perfil I) y otro en sentido noreste (NE) suroeste (SO) (perfil II).

- Zona sur (San Martín de la Vega): se trata de la zona de vegas de cultivo. Con objeto de estudiar la influencia del riego en la dinámica hidráulica de la MAS se dibujó un perfil con orientación noroeste (NO) sureste (SE) (perfil III).

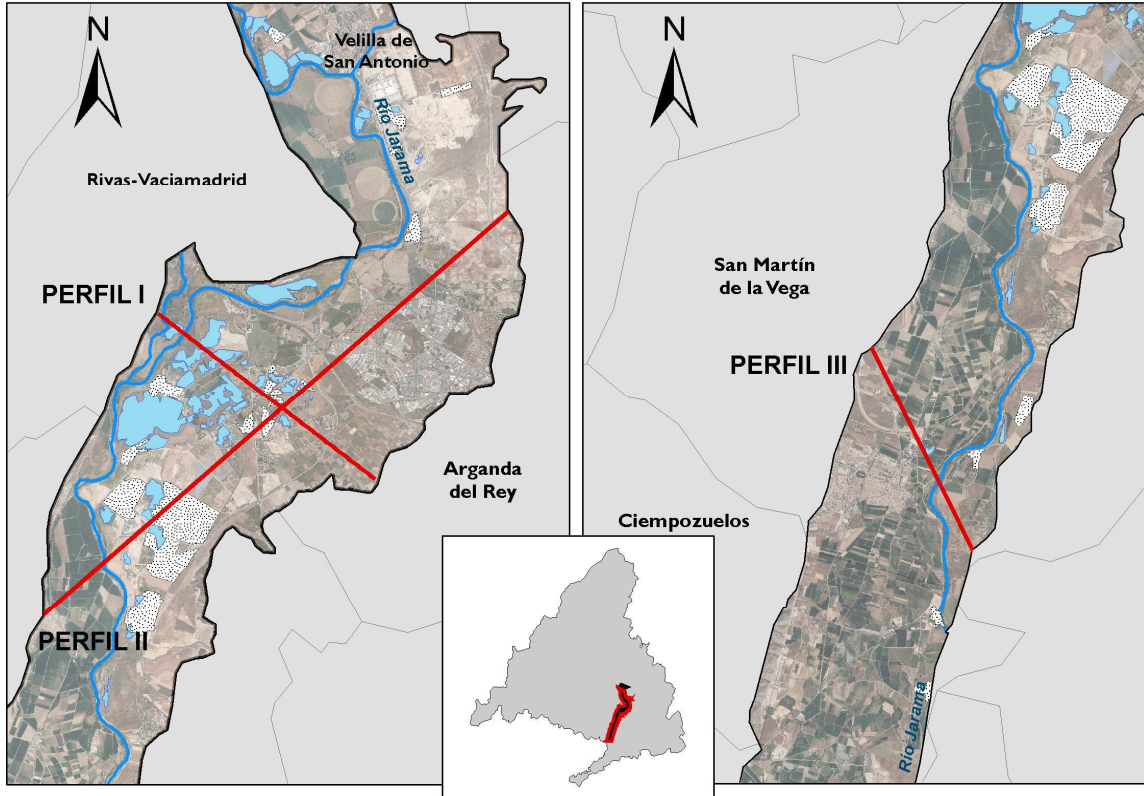


Figura 6. Localización de los perfiles estudiados en la zona de trabajo.

### 3.5.- DETERMINACIÓN DE FACTORES AMBIENTALES CON EFECTOS EN LA MAS

Con objeto de comprender los factores ambientales que afectan a la dinámica de la MAS se tomaron datos de la estación meteorológica situada en la Laguna de las Madres (Arganda, Madrid); gestionada por Miguel Álvarez Cobelas, investigador responsable de la estación y personal del Instituto de Recursos Naturales – Centro de Ciencias Medioambientales (CSIC).

Se empleó el método de Linacré para calcular la evapotranspiración potencial (ET) en las inmediaciones, puesto que según Xu y Shing (2001), los valores obtenidos de esta manera se aproximan más a la ET real que mediante otros métodos como el de Thornthwaite.

$$ET(\text{Linacré}) = \frac{\left( 500 \cdot \frac{Tm}{(100 - A)} + 15 \cdot (T - Td) \right)}{80 - T} (\text{mm/día})$$

Donde:

- $T_m$  es la temperatura media reducida al nivel del mar: aplicando un gradiente vertical medio de  $0,6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ . [ $T_m=T+(0,006\cdot Z)$ ]
- $Z$  es la cota sobre el nivel del mar.
- $A$  es la latitud en grados.
- $T$  es la temperatura media en grados centígrados.
- $T_d$  es el punto de rocío medio.

La estación meteorológica recopila datos de temperatura media y temperatura del punto de rocío cada 10 minutos, entre otras variables. Se procesó la información para obtener una estimación mensual media de los valores de ambas temperaturas y obtener el valor de ET (en mm/día) para cada uno de los 12 meses del año. Se tomaron 30 días como media de todos los meses y se multiplicó por la ET calculada, para determinar un valor medio de ET mensual. Estos resultados se tomaron como valores medios de la zona de estudio, ya que la estación meteorológica se encuentra en el sector central de la misma.

Para estimar la precipitación media mensual en la zona de estudio se emplearon datos de precipitación media diaria en la Comunidad de Madrid, proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología.

#### **4.- RESULTADOS**

El estudio de la evolución hidrogeológica de la MAS se va a enfocar desde el punto de vista de la variación de los niveles piezométricos a lo largo de una escala temporal corta, a través de la información obtenida en las campañas de campo.

Los datos de las campañas de diciembre de 2012 y abril de 2013 se obtuvieron a partir de la red de control piezométrica y de calidad (Figura 7). Tras el procesado de la información según se describe en la metodología se obtuvieron los mapas de isopiezas de la MAS para diciembre de 2012 (Figura 8) y abril de 2013 (Figura 9). En la cartografía de isopiezas se han representado las principales zonas de descarga y recarga del acuífero, de manera que se pueda visualizar el flujo de agua en la MAS.

El diseño de la red piezométrica (Mota, 2012) está basado en pozos ubicados a lo largo de toda la zona de estudio, de manera que queden lo suficientemente espaciados entre sí para que la toma de datos de piezometría sea representativa de la situación del acuífero. En la zona central del área de estudio se incrementó la densidad de pozos, puesto que es la zona en la que se concentran el mayor número de graveras para la extracción de áridos, con el fin de estudiar con más detalle los efectos que tienen sobre la MAS las áreas de extracción.

La distribución de los puntos de muestreo de calidad de aguas subterráneas y superficiales atiende al objetivo de cubrir toda la zona de estudio con la toma de muestras, de manera que se consiga la mayor representatividad de la calidad química del agua del sistema río-acuífero.

La dinámica del acuífero, en cuanto al flujo del agua, en las campañas de abril de 2013 y diciembre de 2012 es similar. Predominan las descargas del acuífero hacia el río Jarama en el norte del área de estudio. Existe un área de recarga por percolación del terciario (yesos) al este, entre los municipios de Velilla de San Antonio y Arganda del Rey. En las zonas de desembocadura del río Manzanares en el río Jarama y en la desembocadura del Arroyo de la Vega de Madrid (en el término municipal de San Martín de la Vega) se aprecian otras dos zonas de recarga. Por último, la zona sur tiene una dinámica particular. Por la zona oeste del área de vegas se estaría produciendo recarga, mientras que en la zona este se estarían produciendo descargas hacia el río Jarama, que actúa de límite del área de estudio.

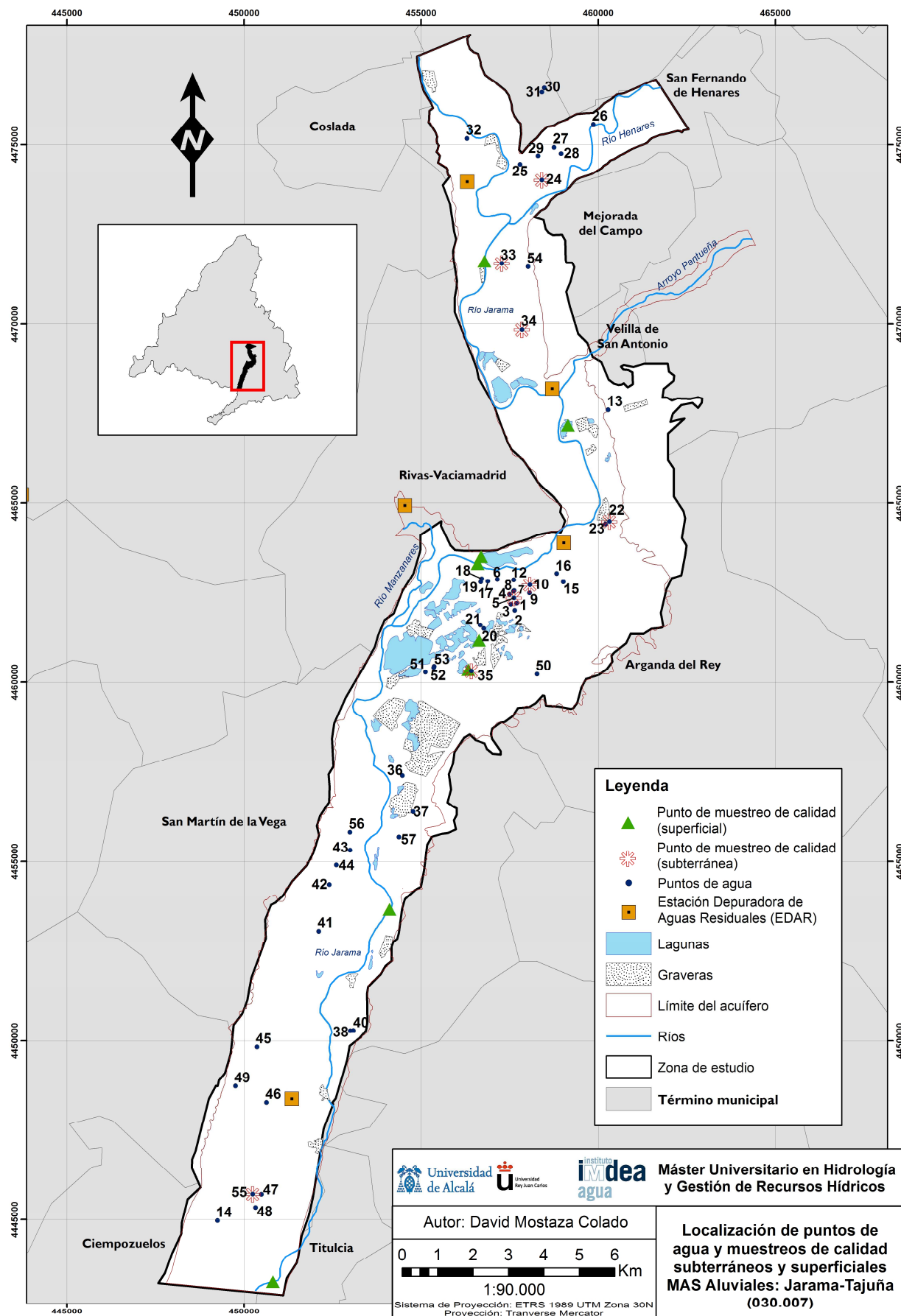


Figura 7. Red de control piezométrico y calidad de la MAS en el área estudiada

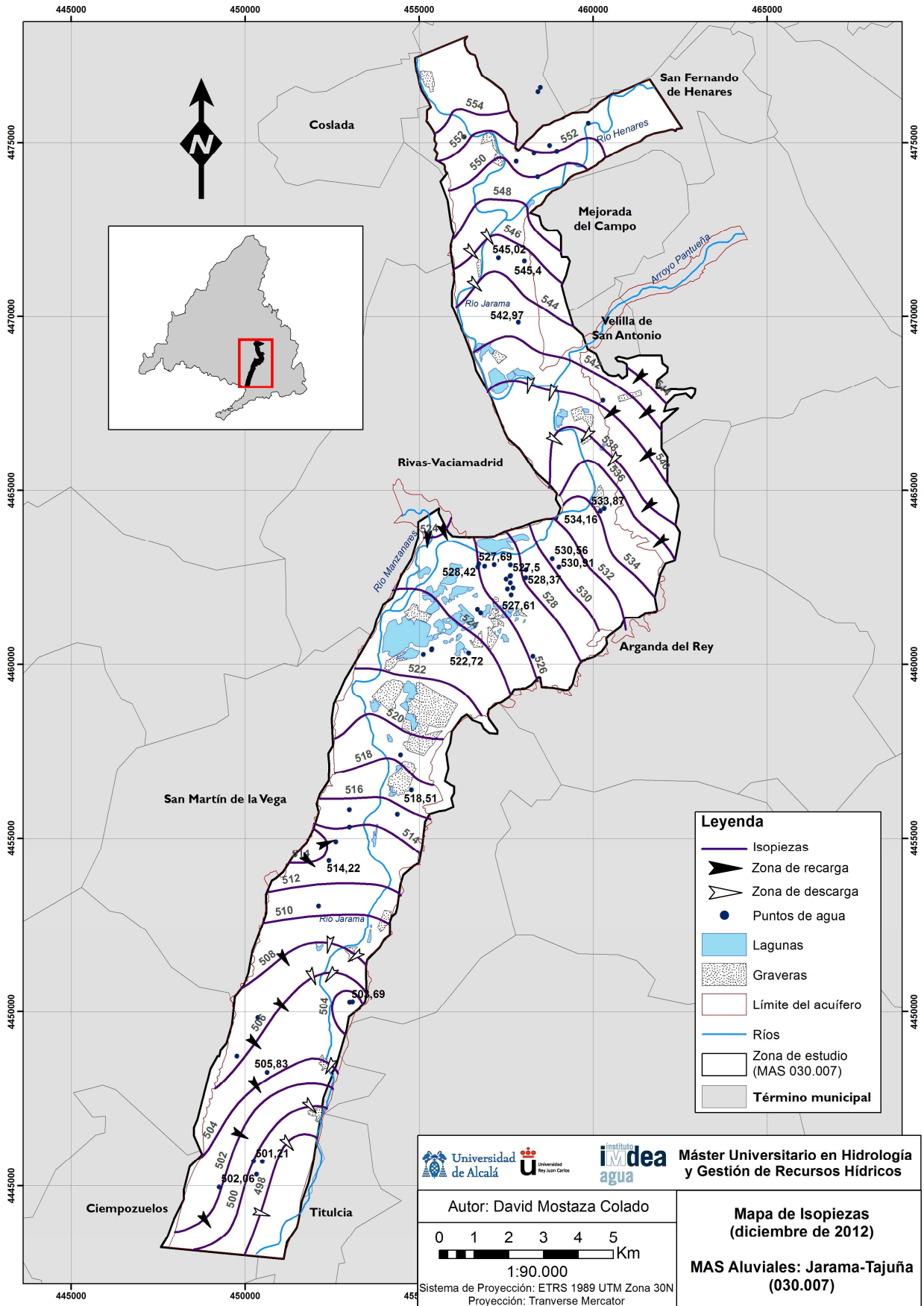


Figura 8. Mapa de isopiezas para la campaña de diciembre de 2012 (días 19 y 20 de diciembre), donde se indican las zonas de recarga local.

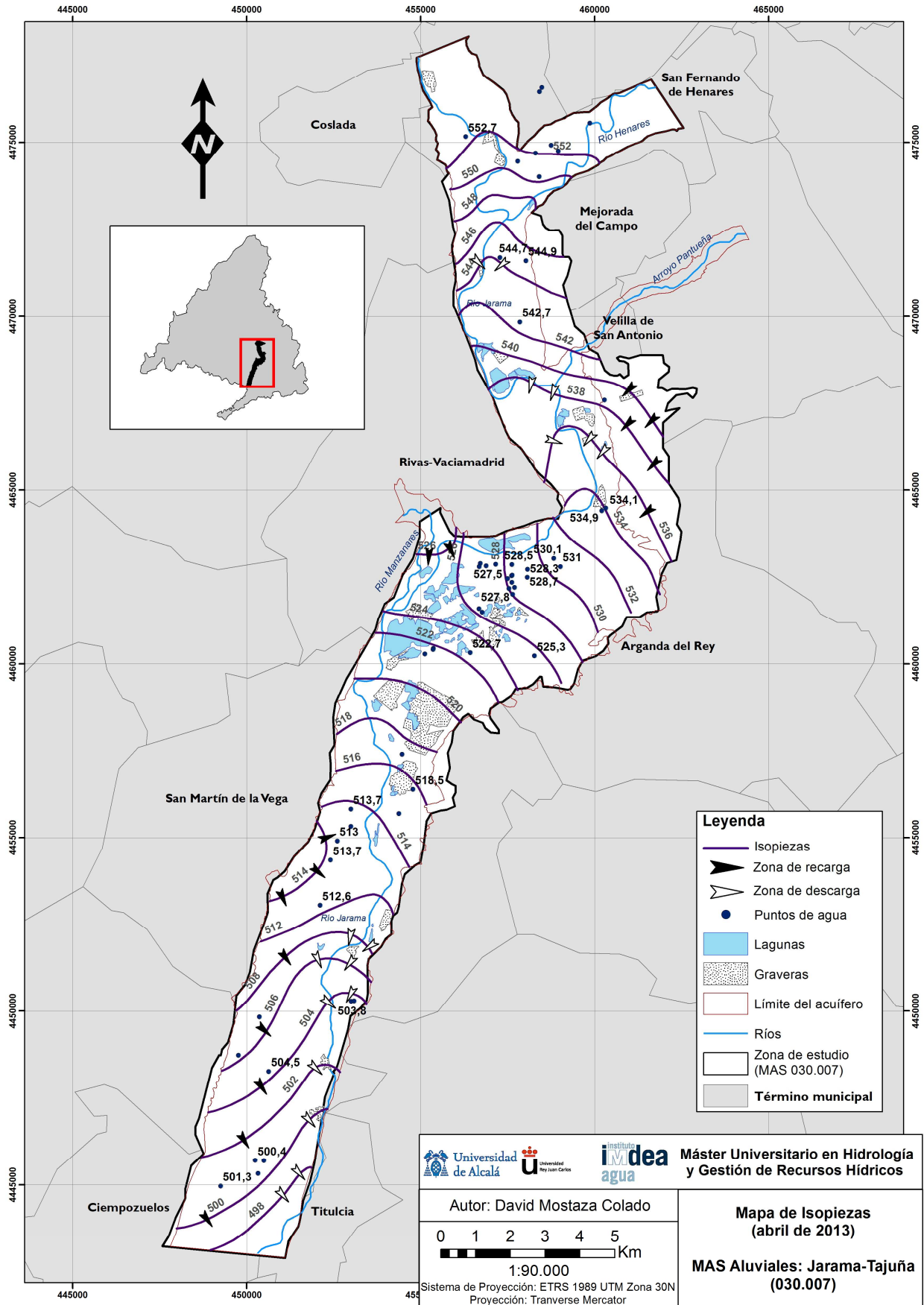


Figura 9. Mapa de isopiezas para la campaña de abril de 2013 (días 15 y 16 de abril), donde se indican las zonas de recarga local.

A fin de poder comparar la situación de la MAS en las campañas de abril de 2013 y diciembre de 2012 con la de campañas anteriores (Mota, 2012), se tomaron los datos de éstas para componer los mapas de isopiezas para enero de 2012, abril de 2012, y septiembre de 2012 (Anexo: Figura 20, Figura 21 y Figura 22). Puede observarse, por la morfología de las isopiezas, que el flujo de agua en el acuífero no se ha visto modificado significativamente a lo largo de las campañas. Las zonas de recarga y las de descarga locales son las mismas que se han observado en las campañas más recientes.

La cartografía de isodescensos se obtuvo a partir de los datos de isolíneas de las campañas de campo. Existen datos de isodescensos para los periodos interanuales de abril de 2012 a abril de 2013 (Figura 10) y enero de 2012 a diciembre de 2012 (Figura 11); así como para el periodo interestacional de abril de 2012 a septiembre de 2012 (Figura 12). Esta cartografía representa la variación del nivel piezométrico de la superficie del acuífero entre los periodos de tiempo indicados.

A grandes rasgos, las variaciones entre periodos interanuales como los de enero de 2012 y diciembre de 2012 o abril de 2012 y abril de 2013 son de pequeña magnitud. La zona norte de la MAS tiene variaciones de entre 0m y 1m, al igual que la zona central de vegas (situada al sur). Destacan por su comportamiento dos zonas concretas de la MAS: oeste del sector central y este de la zona sur. En la primera de ellas se observa que en el periodo comprendido entre enero y diciembre de 2012 se produce una variación positiva del nivel freático (de hasta 4m), mientras que en el periodo de abril de 2012 a abril de 2013, la variación es negativa (con descensos de hasta 5m). En la segunda zona la evolución de la superficie de la MAS en el periodo de enero de 2012 a diciembre de 2012 es negativa, con descensos de hasta 4m; en el periodo de abril de 2012 a abril de 2013 la superficie llega a ascender hasta 4m.

En el periodo interestacional de abril de 2012 a septiembre de 2012, que abarca desde el momento final del aporte de agua por las lluvias de primavera y el deshielo (abril) hasta el final del periodo seco del verano (septiembre), se observa que la zona norte tiene una variación positiva del orden de 1m. Esto mismo ocurre en la zona sur de vegas, en donde en la mayor parte de su extensión se produce un incremento del nivel freático de hasta 4m. Un comportamiento a destacar es el que ocurre en los bordes del aluvial en la zona centro, donde se observan descensos en ambos extremos (este y oeste) de hasta 5m.



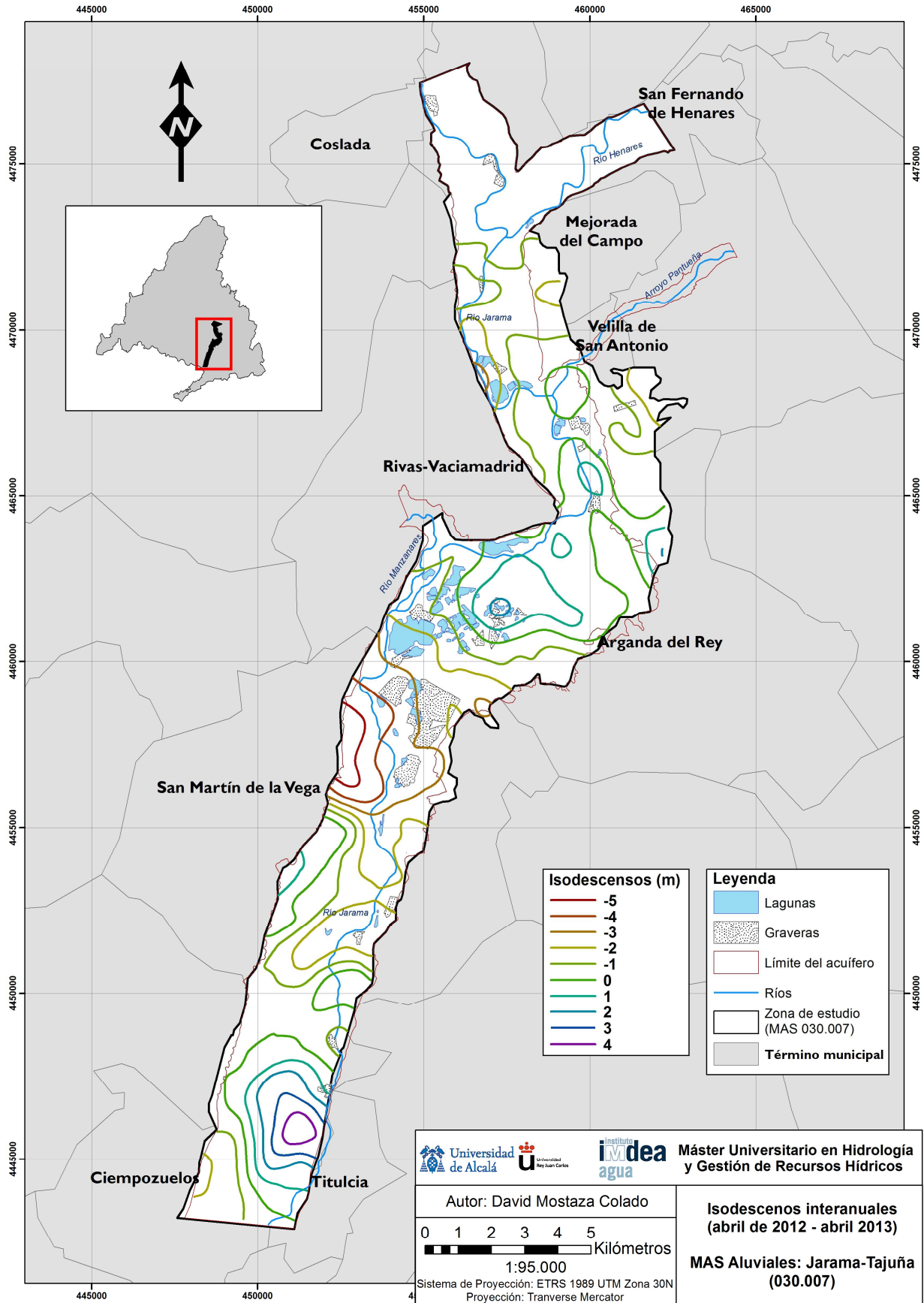


Figura 10. Isodescensos de la MAS 030.007 (periodo interanual: abril de 2012 a abril de 2013).

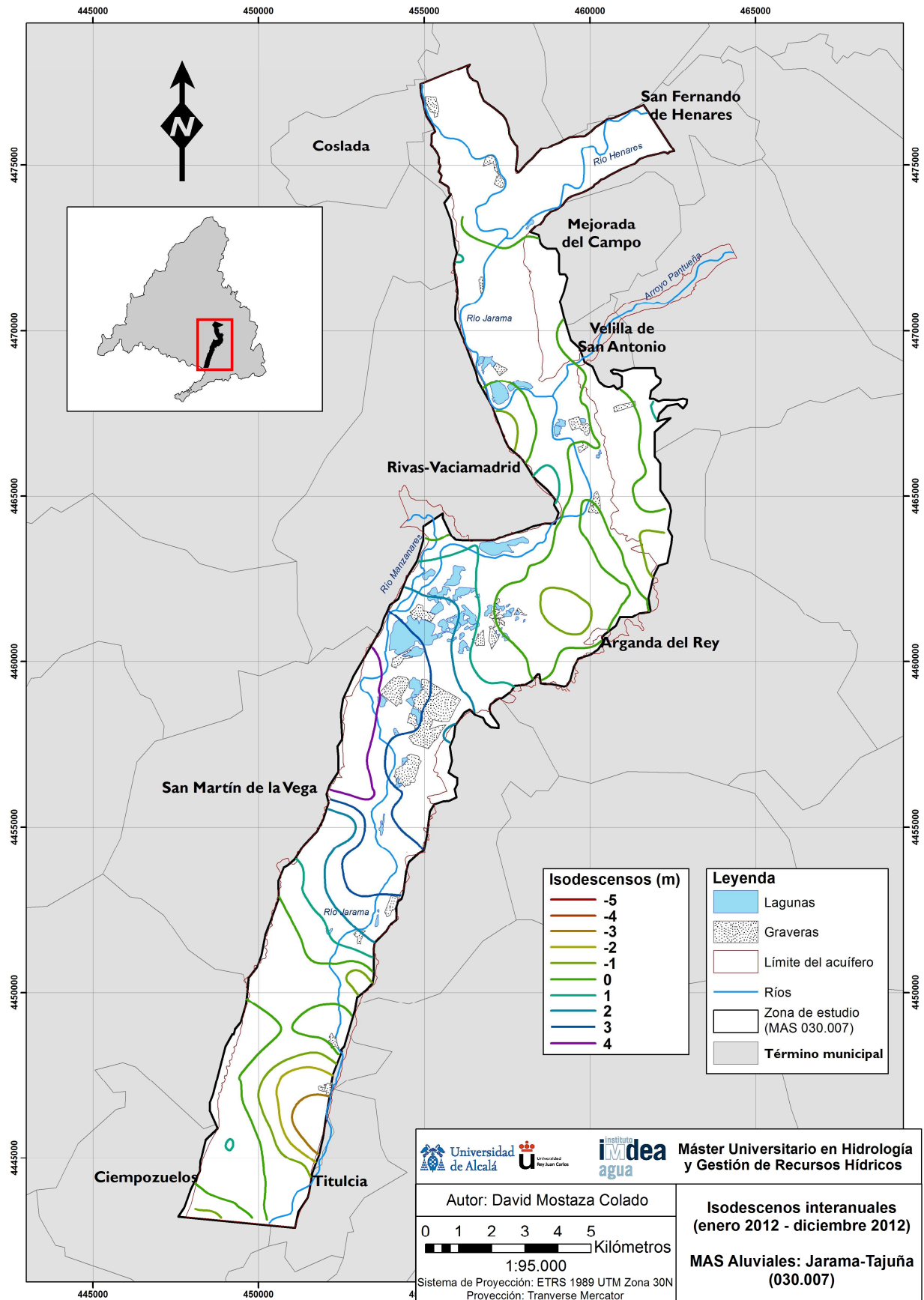


Figura 11. Isodescensos de la MAS 030.007 (periodo interanual: enero 2012 a diciembre 2012).

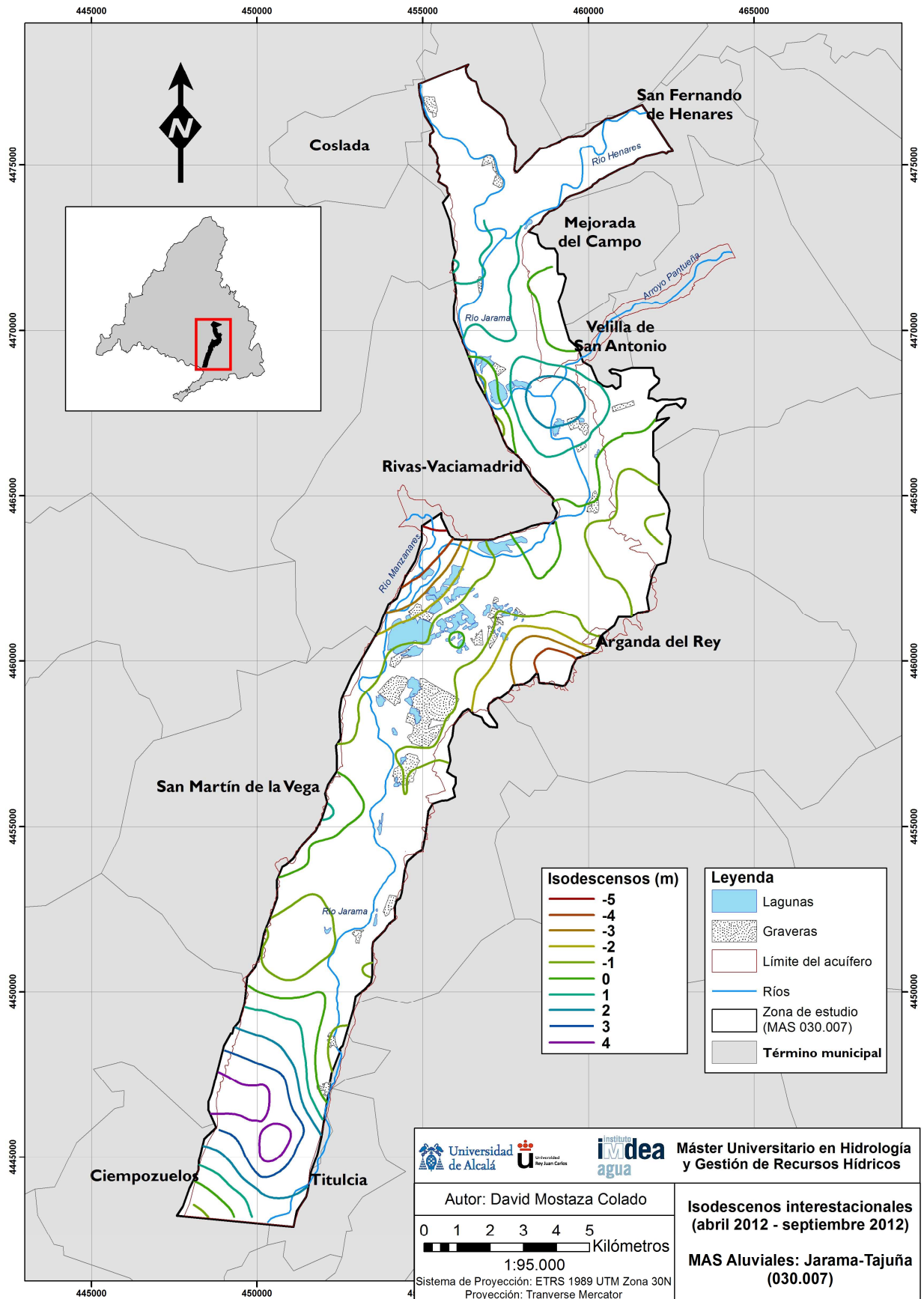
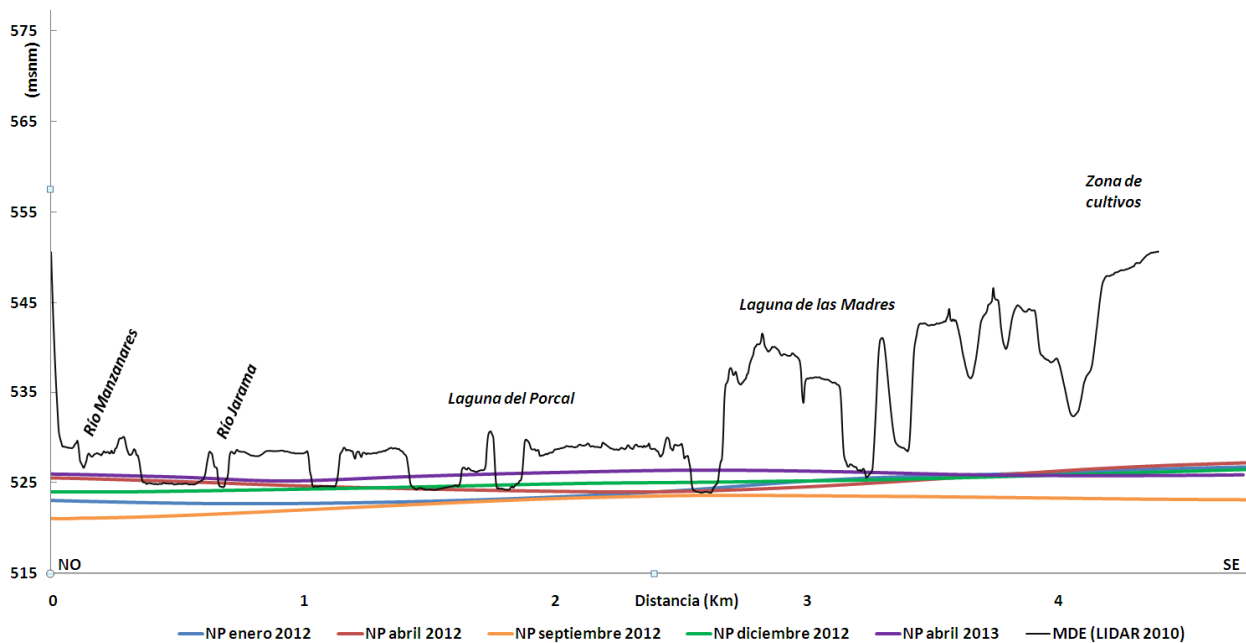


Figura 12. Isodescensos de la MAS 030.007 (periodo interestacional: abril 2012 a septiembre 2012).

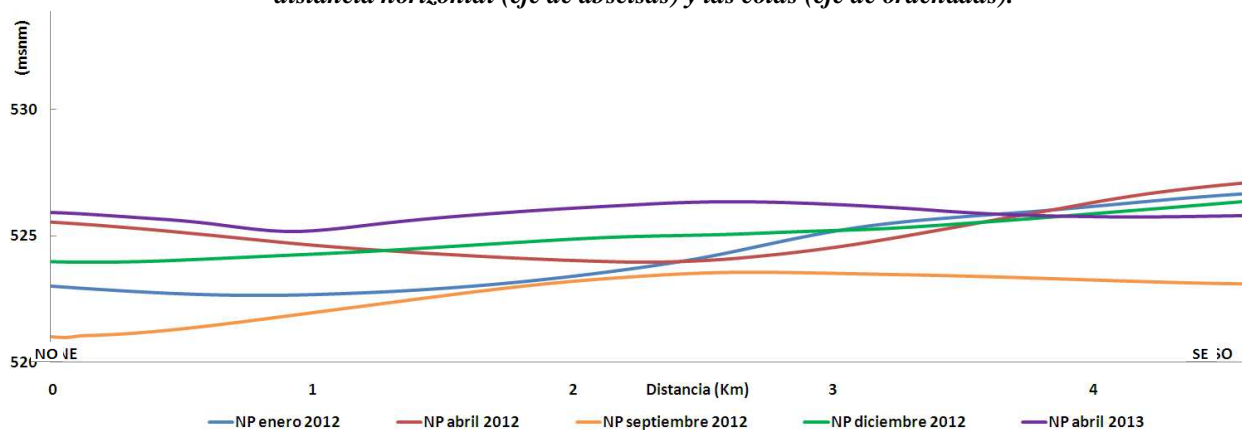
Se han estudiado tres perfiles donde se comparan los niveles piezométricos de la MAS en cada una de las campañas de campo con la topografía del terreno. Para cada uno de ellos existen, además, figuras con el detalle de los niveles piezométricos (Figura 14, Figura 16 y Figura 18).

En el primero de los perfiles (Figura 13) se distinguen las diferencias en el nivel de la superficie freática en los momentos de toma de datos. Se ha levantado en dirección perpendicular al flujo del agua en la MAS. El mes de abril de 2013 es en el que la superficie freática se encuentra a menor profundidad (Figura 14), seguido por diciembre, abril y enero de 2012. La morfología del nivel freático en septiembre de 2012, sobre todo en la zona de los bordes del aluvial se aprecia también en el mapa de isodescensos interestacional (Figura 12).



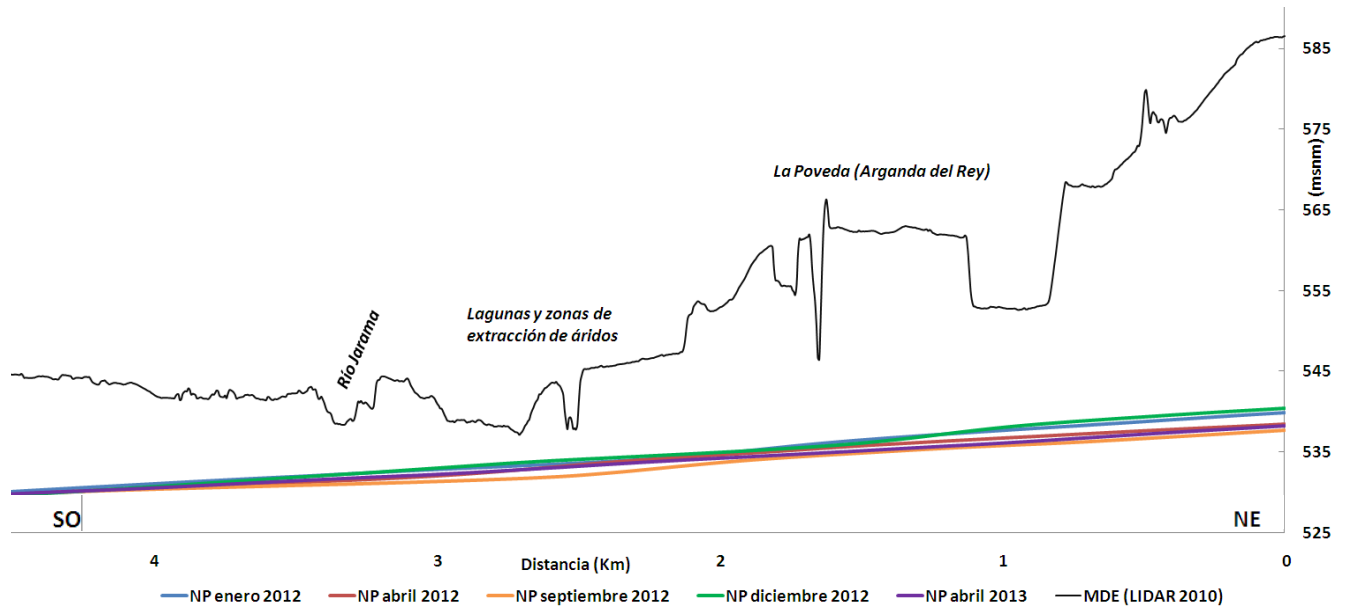
**Figura 13. Perfil topográfico y piezométrico I.**

*La morfología del terreno aparece exagerada debido a las diferentes escalas empleadas para representar la distancia horizontal (eje de abscisas) y las cotas (eje de ordenadas).*

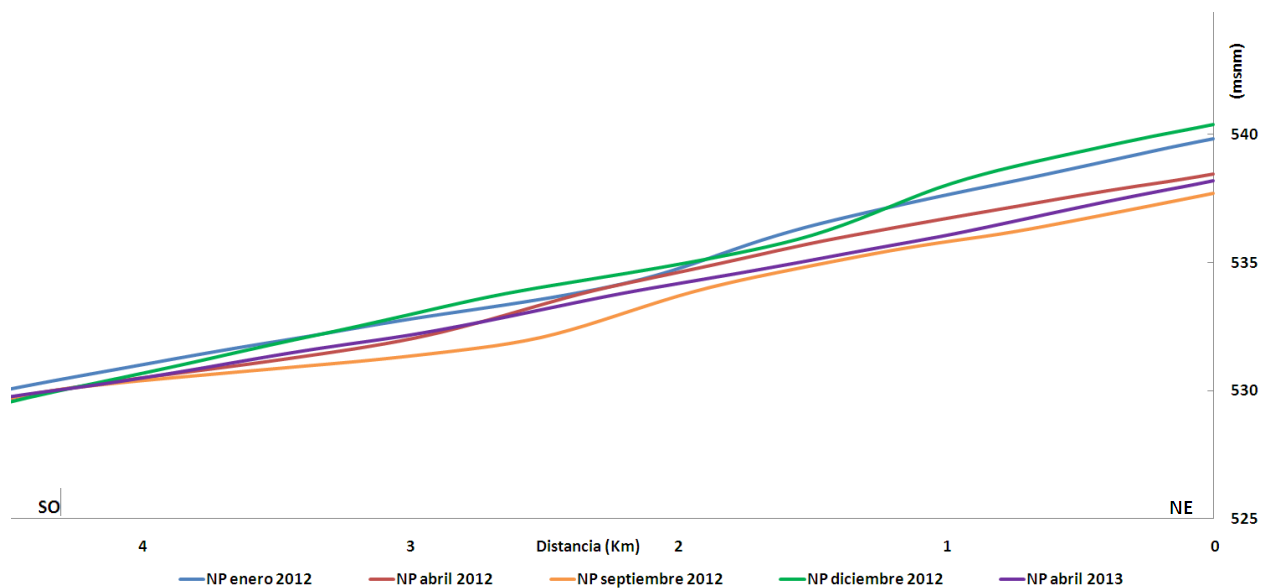


**Figura 14. Detalle de la variación de niveles piezométricos en el perfil I**

El segundo de los perfiles se ha levantado en dirección paralela al flujo del agua en la MAS. Muestra la sección vertical de la superficie piezométrica del acuífero. La forma de la superficie freática es prácticamente constante a lo largo de todas las campañas y representa de forma esquemática el gradiente de potencial hidráulico. La disposición de las líneas a lo largo del eje de ordenadas es proporcional al volumen de agua almacenado en la MAS. La de mayor altura es la de diciembre de 22012, seguida por enero de 2012, abril de 2012, abril de 2013 y finalmente septiembre de 2012 (Figura 16).

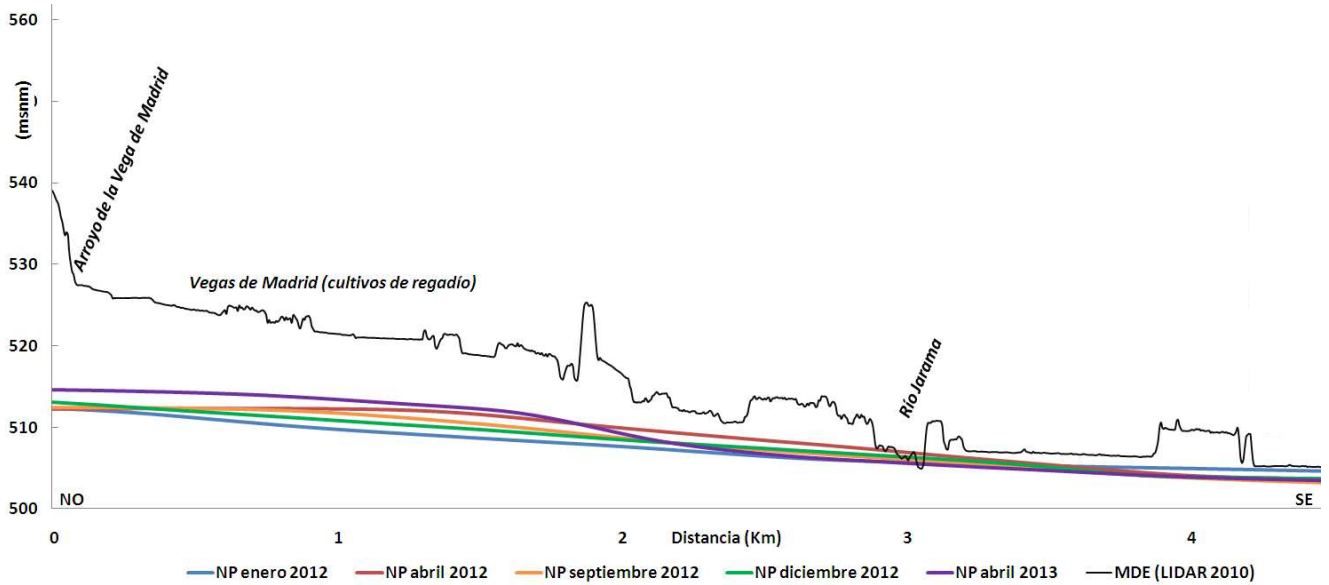


**Figura 15. Perfil topográfico y piezométrico II.**  
*La morfología del terreno aparece exagerada debido a las diferentes escalas empleadas para representar la distancia horizontal (eje de abscisas) y las cotas (eje de ordenadas).*



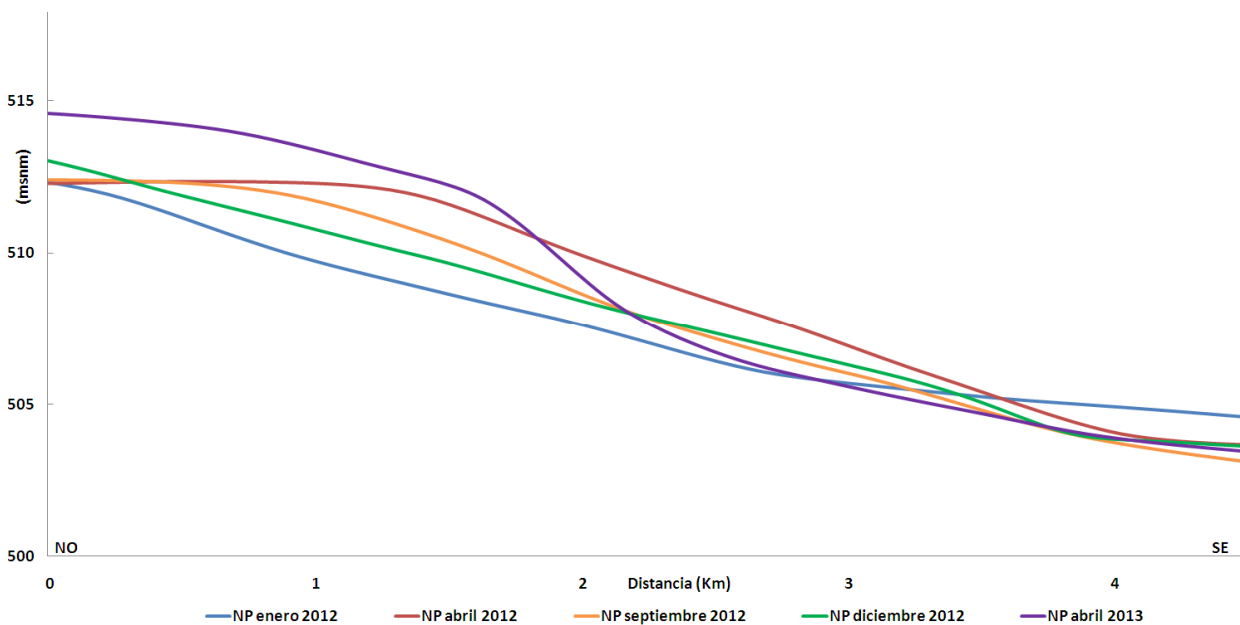
**Figura 16. Detalle de la variación de niveles piezométricos en el perfil II**

El último de los perfiles topográficos (Figura 17) y piezométricos se levantó en la zona sur de vegas de cultivo. Se trata de un perfil perpendicular al flujo de agua en la MAS. La tendencia que seguía el nivel de la superficie piezométrica en los anteriores perfiles se invierte en éste. Ahora son abril de 2012 y 2013 junto con septiembre de 2012 los meses en los que la superficie del acuífero está a menor profundidad y diciembre de 2012 en los que está a mayor profundidad (Figura 18).



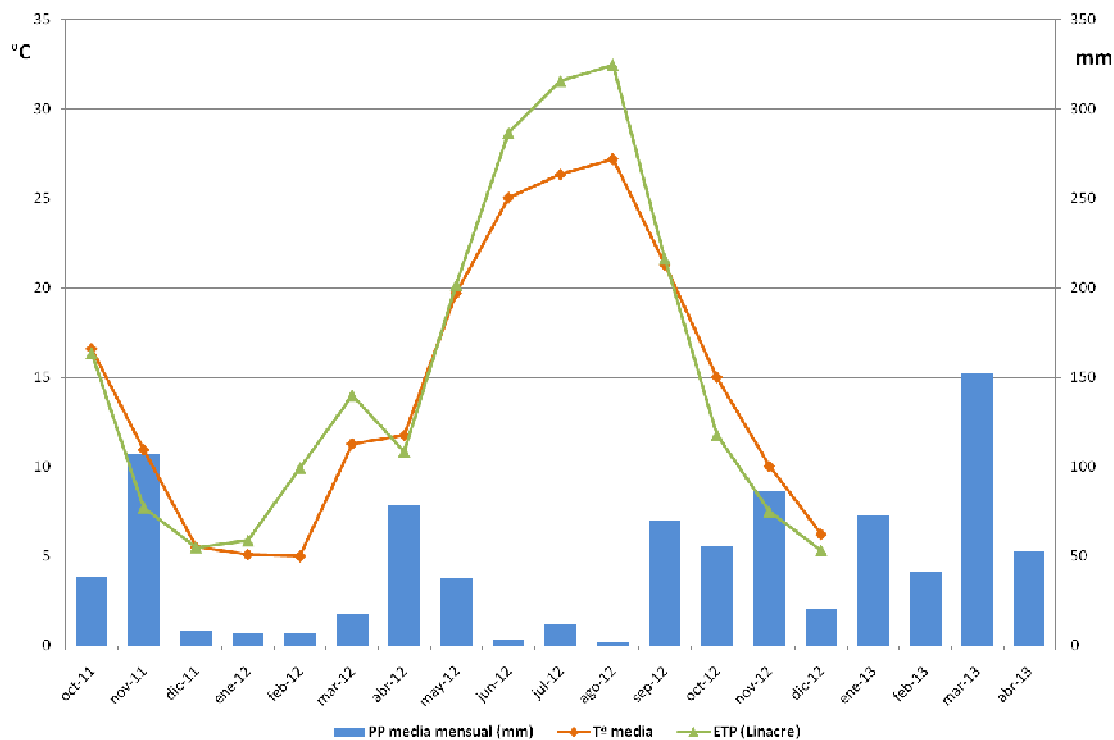
**Figura 17. Perfil topográfico y piezométrico III.**

*La morfología del terreno aparece exagerada debido a las diferentes escalas empleadas para representar la distancia horizontal (eje de abscisas) y las cotas (eje de ordenadas).*



**Figura 18. Detalle de la variación de niveles piezométricos en el perfil III**

Puesto que las variables meteorológicas tienen influencia en la evolución de la MAS, se ha estudiado la precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial media (Figura 19).



**Figura 19. Evolución temporal de la temperatura media, precipitación media y evapotranspiración en el periodo de octubre de 2011 a abril de 2013.**

La serie temporal de datos empieza en octubre de 2011, con el comienzo del año hidrológico 2011-2012. Se considera que a partir de octubre finaliza el periodo de estiaje y comienzan las precipitaciones. Los datos de piezometría están disponibles desde enero de 2012.

Analizando la serie temporal se observa que la distribución de las precipitaciones desde octubre de 2011 a septiembre de 2012 es la típica de un clima mediterráneo continental, con máximos en otoño y primavera. El volumen medio total medido fue de 388,55mm

El comienzo del nuevo año hidrológico 2012-2013 lo hace desde un mes de septiembre húmedo y las precipitaciones se siguen sucediendo a lo largo de todo el otoño, invierno y primavera de 2013. En el periodo que va desde octubre de 2012 a abril de 2013 (todavía no se ha dado por finalizado el año hidrológico) se ha recogido un volumen medio de 481,24mm; superior al de todo el periodo anterior.

En cuanto a la distribución de las temperaturas, siguen el patrón típico de un clima mediterráneo continental: veranos cálidos, inviernos fríos y oscilación elevada (22°C

aprox.). La evapotranspiración (ET) potencial calculada mediante el método de Linacré (Guijarro, 1980; Xu, 2001) se asocia a la latitud de la zona, la cota del terreno y el punto medio de rocío (asociado a su vez a la humedad relativa del ambiente y a la temperatura del aire). Por todo ello sigue la misma tendencia que la gráfica de temperatura, en los meses cálidos y secos la ET será mayor que en los fríos y húmedos.



## **5.- DISCUSIÓN**

Existen numerosos estudios que tienen como objetivo analizar la situación de la MAS Jarama-Tajuña, tanto a nivel hidrogeológico como de calidad de las aguas del sistema. Las características geológicas e hidrogeológicas del acuífero, son responsables de su elevada vulnerabilidad, al definir un acuífero bajo materiales muy permeables y con el nivel piezométrico a poca profundidad.

### **DINÁMICA HIDRÁULICA DE LA MAS**

El modelo de la superficie piezométrica del acuífero, obtenido a partir de las profundidades de la superficie freática de los puntos de muestreo, ha permitido estudiar el flujo del agua en el acuífero y determinar cuáles son las zonas en las que se está produciendo recarga y en cuáles descarga.

De manera general, la zona norte la MAS se caracteriza por recargar al río en todas las campañas del año en que se hicieron mediciones. El agua que descarga al río es de origen local mayoritariamente, procedente de las zonas de terrazas (como las existentes al oeste del término municipal de Mejorada del Campo) y (vegas del río a través de suelos aluviales y coluviales), como explica Bardají et al. (1990). Existen diferencias en las posiciones de las isopiezas entre campañas, que podrían justificarse por la distribución de precipitaciones en el tiempo; aunque en términos generales se mantienen bastante estables en el espacio. Abril de 2012 fue el segundo mes más lluvioso del año hidrológico (2011-2012) tras un periodo de pocas lluvias; en cambio, abril de 2013 también fue un mes lluvioso, pero estuvo precedido por unos meses de abundantes lluvias. Por ello cabría esperar que el nivel freático de la MAS entre ambos periodos fuese más somero puesto que el aporte de agua desde la superficie ha sido mayor. Por ejemplo, si se compara la isopieza de 540m de la campaña de abril de 2013 (Figura 9) con la del resto de mapas, ésta se encuentra desplazada hacia el norte. Además, en el mapa de isodescensos interanual (Figura 10) se aprecia que en esta zona en concreto la variación entre campañas ha sido del orden de 1m. El descenso de casi 4m que se aprecia en el borde occidental del acuífero podría deberse a alguna anomalía difícilmente explicable ya que no se conoce de la existencia de pozos en la zona que puedan estar extrayendo agua, ni es un comportamiento que se pueda justificar por la presencia de las pequeñas lagunas.

El hecho de que la variación del nivel freático en la MAS sea de poca magnitud, teniendo en cuenta el volumen de precipitaciones caídas desde septiembre de 2012, podría explicarse por

los valores de transmisividad del acuífero, que oscilan entre  $632\text{m}^2/\text{día}$  y  $3.500\text{m}^2/\text{día}$ . Esto haría que el flujo de agua se desplazase rápidamente desde las zonas de recarga a las de descarga, transfiriéndose en poco tiempo al cauce del río. Dado que existe un punto de control de calidad de agua superficial en el río Jarama a su paso por el municipio de Mejorada del Campo (García, 2013), de estar ocurriendo así, las muestras de la campaña de abril de 2013 tendrían que tener una menor concentración en sales que las anteriores, por la dilución en un mayor volumen de agua. Según García (2013), las aguas de la campaña de abril de 2013 tienen menor mineralización que las de la campaña de diciembre de 2012, caracterizándose como bicarbonatadas cálcicas.

Siguiendo con el análisis de la dinámica de la MAS, en su extremo oriental (al este del municipio de Velilla de San Antonio) existe una formación de yesos (Figura 2) a través de la cual, según la morfología de las isopiezas, se estaría produciendo recarga al acuífero. Bardají et al. (1990) afirma que existe recarga al acuífero por percolación del terciario de yesos. Según los datos de Ráez (2013), la calidad química del agua del pozo con ID 022 (Figura 7), aguas abajo de la zona de recarga, muestran una concentración elevada de sulfatos, que confirmarían la recarga por esta zona. Las aguas muestreadas son de naturaleza sulfatada magnésica en la campaña de diciembre de 2012 y sulfatada cálcica en la campaña de abril de 2013 (Ráez, 2013). La composición sulfatada cálcica podría ser indicador de un menor tiempo de residencia del agua en el acuífero, propiciado por el elevado volumen de precipitaciones.

En esta zona, dada la morfología del aluvial, se produce un estrechamiento que hace converger las aguas que provienen de la zona norte de la MAS con las que percolan y recargan a través de los yesos. Además se trata de una zona de descarga hacia el cauce del río. La mezcla de aguas del propio acuífero con las de percolación del terciario podría contrastarse en los dos puntos de la red de control de calidad química que existen en las inmediaciones (Laguna del Campillo, Arganda) (García, 2013).

Una vez el río Jarama entra en la zona de confluencia de los municipios de Arganda del Rey y Rivas-Vaciamadrid, la dinámica del acuífero cambia. Pasa a un estado neutro, en el que la morfología de las isopiezas no permite definir zonas de recarga o descarga locales significativas. Únicamente es destacable la zona de la desembocadura del río Manzanares en el río Jarama, en la que se estaría produciendo recarga del acuífero durante todas las campañas en las que se realizaron mediciones de la piezometría. El río Manzanares se encuentra muy modificado y las aguas que circulan por su cauce son principalmente las que

proviene de los vertidos depurados de la ciudad de Madrid y colindantes. Es probable que debido a ello se estén introduciendo al sistema río-acuífero contaminantes como nitratos o fosfatos; presentes de manera habitual en las aguas depuradas (Mostaza, 2012).

La zona central de estudio se caracteriza por ser el punto en el que se concentran la mayoría de empresas de extracción de áridos. Las excavaciones de algunas de estas graveras, ya abandonadas, cortan el nivel freático de la MAS, por lo que existen una serie de lagunas diseminadas a lo largo del área central de estudio. En esta zona se ubican también la Finca Experimental La Isla (Comunidad de Madrid) y la Finca Experimental La Poveda (CSIC) de 64Ha, dedicadas al cultivo de regadío de especies vegetales con fines investigadores. El agua que se emplea en ellas proviene de pozos de extracción.

A la vista del perfil I (Figura 13) se aprecia que en los periodos húmedos (enero de 2012, abril de 2012 y diciembre de 2012) se está produciendo recarga desde los ríos Manzanares y Jarama hacia el acuífero a través de la zona noroeste del perfil. Bardají et al., (1990) ya clasifican este lugar como punto de recarga de la MAS su estudio de 1989.

Este mismo fenómeno se repite en el extremo sureste del perfil, zona en la que predominan las tierras de cultivo. Las características edáficas y litológicas de esta área hacen que el agua de lluvia percole fácilmente y se produzca recarga de la MAS. La elevada humedad del comienzo del año hidrológico 2012-2013 se ve reflejada en el comportamiento de la superficie del acuífero en el mes de abril de 2013. Como puede verse en la Figura 13, la recarga no sólo se estaría produciendo desde los cauces fluviales, sino también desde las lagunas.

Con la llegada del periodo de estiaje y la reducción de aportes de agua superficial, se modifica la dinámica del acuífero; las precipitaciones son escasas, mientras que las temperaturas y ET son elevadas. En la campaña del mes de septiembre de 2012 se aprecia que los ríos Manzanares y Jarama están aportando agua a la MAS y ya no se produce recarga a través de las zonas de cultivo.

Puesto que la recarga en esta zona ocurre a través de los bordes del aluvial con mayor intensidad (en términos de volumen), el mapa de isodescensos interestacional del periodo abril de 2012 a septiembre de 2012 (Figura 12) muestra la variación en el nivel piezométrico entre los meses húmedos y el periodo de estiaje. Para verificar que la recarga tiene lugar a través de la zona sureste del perfil y puesto que son zonas de cultivo, cabría esperar que en los datos de calidad química del agua de los pozos con ID 005 e ID 010 de las campañas

posteriores a periodos húmedos existan nitratos. Son un componente de los fertilizantes que se emplean en cultivos y por su elevada movilidad son lavados hacia el acuífero por el agua de lluvia que se infiltra en el suelo. Según los datos de calidad química de Ráez (2013), la concentración de nitratos en la campaña de abril de 2013 es mayor que en la de diciembre de 2012. A pesar de que las dos campañas se encuentran en periodos húmedos, la de abril se realizó tras un mes de marzo muy lluvioso. Por este motivo, el lavado del suelo fue mayor y se refleja en la concentración de nitratos en las aguas superficiales.

El segundo de los perfiles levantados en esta zona, con orientación noreste-suroeste (Figura 15) corta el terreno en paralelo al flujo del agua en la MAS. La representación de la superficie piezométrica muestra el gradiente hidráulico que existe entre el punto inicial y final del perfil. A pesar de la variación de la recarga que se produce entre el periodo seco y húmedo en los bordes de la MAS el gradiente hidráulico no se ve tan modificado en la zona central del acuífero. Las líneas que representan el nivel de la superficie freática aparecen superpuestas unas a otras. Sólo se aprecia un ligero descenso en el mes de septiembre de 2012 (de nuevo tras el estiaje) en los alrededores de las zonas de extracción de áridos y lagunas. En estas áreas, el espesor de la zona no saturada (ZNS) es pequeño o inexistente y por ello el efecto de la ET es mayor, al no haber una barrera física que proteja al acuífero.

Los isodescensos (Figura 10 y Figura 11) observados en esta zona no son significativos, a excepción de los indicados anteriormente en los bordes del aluvial (Figura 12). Se encuentran todos en un orden magnitud que oscila entre los  $\pm 1\text{m}$ .

Finalmente el río Jarama se adentra en la zona de vegas del sur de la Comunidad de Madrid. Tras permanecer represado en el azud denominado "Presa del Rey" se divide en dos. Parte del volumen del río fluye de manera natural por su cauce y otra parte se deriva para el riego de campos de cultivo. La dinámica hidráulica vuelve a modificarse y el acuífero vuelve a aportar agua al cauce superficial.

Existe una zona de recarga, que se ha identificado en todas las campañas de campo que se realizaron. Se trata de la zona de la desembocadura del Arroyo de la Vega de Madrid en el aluvial, al norte del municipio de San Martín de la Vega y en el borde oeste del aluvial. La magnitud de la recarga es mucho mayor en el mes de abril de 2013 (Figura 9) en comparación con la del mes de diciembre de 2012 (Figura 8). Como se ha venido indicando, el comienzo del año hidrológico 2012-2013 ha sido muy húmedo; esta variación en la recarga vendría dada por las abundantes precipitaciones del otoño e invierno. No se conocen

las causas por la que se produce recarga en este punto. Una hipótesis sería que se pueden estar produciendo por cuestiones tectónicas que favorezcan la permeabilidad del agua hacia el acuífero.

Al sureste de esta zona de recarga se observa que en la campaña de diciembre de 2012 las isopiezas dibujan una zona de descarga muy localizada, como si se tratara de un pozo de extracción. En la superficie de este punto está emplazada la Urbanización Pingarrón (San Martín de la Vega). Se trata de una zona de viviendas ilegales en vías de regularización, por lo que no cuentan con servicios como abastecimiento de agua o saneamiento. Puesto que la extensión de la urbanización es amplia, es probable que esta anomalía que aparece en la cartografía se deba a la existencia de pozos ilegales para su abastecimiento.

Ya en el extremo sur de la zona de estudio, la dinámica dominante en todas las campañas de campo es la misma. Hasta este punto el sentido del flujo del agua era predominantemente paralelo al cauce del río (con las excepciones de las zonas de recarga). Ahora el flujo es perpendicular al cauce del río Jarama (en sentido noroeste-sureste). Por este motivo se levantó el perfil III (Figura 17), que está orientado en este mismo sentido.

Al contrario de lo que venía ocurriendo en la zona norte y centro de la MAS, en este lugar se invierte la dinámica del flujo del acuífero. En el extremo noroeste del perfil (zonas de cultivo), en el mes de abril de 2013 junto con abril y septiembre de 2012 es cuando el nivel freático es más somero. Los meses que se suponen más húmedos, o posteriores a meses húmedos, son dónde el nivel freático está más profundo. En todas las campañas el flujo del agua es de descarga, desde la zona de campos de cultivo hacía el cauce del río Jarama.

Los factores que explican esta inversión en la tendencia hidráulica de la MAS son el riego de especies vegetales con elevada demanda de agua mediante sistemas poco eficaces, y la elevada permeabilidad del suelo, lo que se suma a un comienzo de año hidrológico húmedo. El valor de abril de 2013, aunque atípico en cuanto a las precipitaciones caídas, está dentro de la normalidad. Puesto que la infiltración de agua a través del terreno es elevada, también lo es el nivel freático de la MAS. El hecho de que septiembre de 2012 se asemeje a los meses de abril de ambas campañas demuestra que se está produciendo una recarga artificial del acuífero de manera indirecta a través del agua excedente de riego. Este aspecto deberá ser contrastado con la presencia de nitratos en los datos de calidad del agua. Las precipitaciones de los meses de otoño e invierno lavarían el suelo al infiltrarse y tendrían que aparecer nitratos en las aguas subterráneas y superficiales de las áreas de descarga.

Como dato adicional que sustente lo expuesto, durante la campaña de campo de abril de 2013, se habló con agricultores, explicando estos que el riego de los campos de cultivo se hacía "a manta". Comentaron que en algún momento puntual llegaron a instalar sistemas de riego más eficaces con las ayudas concedidas por las administraciones pero, a medida que se fueron estropeando u obstruyendo, algunos agricultores volvieron al método tradicional. Además se quejaban de que en determinadas zonas (tierras más cercanas al río, a cotas más bajas), en los meses de agosto y septiembre, el agua "manaba de las tierras encharcando los cultivos".

En la cartografía de isodescensos del periodo interestacional abril de 2012 a septiembre de 2013 (Figura 12), la variación del nivel freático es notable (del orden de +4m). Puesto que la medición se hizo con posterioridad al periodo de estiaje, en el que el riego de los cultivos es abundante, se ve reflejada la recarga artificial indirecta del acuífero. Las variaciones del periodo interanual enero de 2012 a diciembre de 2012 (Figura 11) no son significativas, mientras que las del periodo interanual abril 2012 a abril 2013 (Figura 10) (en donde vuelven a ser del orden de +4m) se deben a las características del comienzo del año hidrológico 2012-2013 ya descritas.

## **6.- CONCLUSIONES**

El modelo de la superficie piezométrica de la MAS obtenido en este trabajo identifica su sector norte como zona de descarga hacia el río Jarama; que se han interpretado como recargas de origen local procedentes de las zonas de terrazas adyacentes al cauce, así como por la percolación de la formación de yesos situada al este de Velilla de San Antonio.

La cantidad de agua almacenada en la MAS, estimada como la variación horizontal de los niveles piezométricos, se ha mantenido estable (dentro de la variabilidad natural causada por los periodos de estiaje y húmedos) a lo largo del tiempo de estudio. Los altos valores de transmisividad del acuífero hacen que el flujo de agua se desplace rápidamente desde las zonas de recarga a las de descarga.

En el sector central de la MAS la recarga se produce en los periodos húmedos del año por infiltración de agua de lluvia a través de las lagunas y zonas de cultivo situadas al este. El efecto producido por el periodo de estiaje es significativo en comparación con el periodo de precipitaciones, con descensos en la superficie piezométrica de la MAS de hasta 5m. La ET de la superficie freática del acuífero es elevada en estos meses como consecuencia del escaso espesor de la ZNS en algunos puntos.

El río Manzanares, en su desembocadura en el río Jarama, también se ha identificado como un punto de recarga del acuífero en todas las campañas que podría estar empeorando la calidad del agua de la MAS, por lo que deberían de tenerse en cuenta en las medidas de gestión y protección de la MAS.

La zona de vegas, situada al sur, actúa como zona de recarga de la MAS en todas las campañas de campo como consecuencia de la percolación hacía el acuífero de las aguas excedentes de los cultivos de regadío durante el verano, desde donde fluyen hacía el cauce del río Jarama que actúa como receptor de la descarga. Esto implica que se está produciendo una recarga importante del acuífero por infiltración de agua de riego.

La dinámica de la MAS en cuanto a distribución de las zonas de recarga y descarga ha sido bastante estable a lo largo del periodo estudiado. Sólo se ha visto modificada ligeramente en base a las características del año hidrológico 2012-2013, por haber sido éste en su comienzo mucho más húmedo que el anterior.

## **7.- TRABAJOS FUTUROS**

Se plantean como líneas de trabajo futuro:

- Perfeccionamiento de la red de control piezométrico y calidad de la MAS: mallado de la red de puntos de agua para mejorar la modelización de la superficie piezométrica del acuífero; localización de puntos de muestreo para optimizar la representatividad de la toma de muestras y estudiar los flujos de agua en detalle.



## **8.- 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.
- ANEFA. (2007). Buenas prácticas medioambientales en el sector de los áridos. *Observatorio de Áridos y Medio Ambiente*. <Disponible en: <http://www.medioambienteyaridos.org>>
- ANEFA. (2010). Estadísticas del consumo de áridos en 2010. *Federación de Áridos*. <Disponible en: <http://www.aridos.info>>
- 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. (2007). Gravel washing wastes from Jarama river deposits (Spain): an undervalued natural raw material. *Environmental Geology* 52:1097-1115.
- 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.
- Causapé Valenzuela, J. (2007). Acuíferos mayoritariamente recargados por retornos de riego. Problemática en su protección de la contaminación por nitratos. En: Molinero, J., Ortuño, F., Valverde, M., Lambán, L.J. (ed.) *Hidrogeología y Aguas subterráneas*: 26. IGME, Santiago de Compostela.
- CHT (2007). Estudio General sobre la Demarcación Hidrográfica. *Confederación Hidrográfica del Tajo*.
- Dabrio, C.J., Fernández, J. (1980). Secuencias originadas por migración de ríos arenosos de baja sinuosidad. *Estudios geológicos* 36: 371-381.
- DOCE (1991). Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas L 135* (30 mayo 1991).

- DOCE (2000). Directiva 2000/60/CEE 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. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas L 327* (22 diciembre 2000).
- Fernández, M., Cuesta, S., Jiménez, O., García, M.A., Hernández, L.M., Marina, M.L., González, M.J. (2000). Organochlorine and heavy metal residues in the water/sediment system of the Southeast Regional Park in Madrid, Spain. *Chemosphere* 41:801-812.
- Fernández Sánchez, J.A. (2001). La Directiva Marco del Agua y las aguas subterráneas: incidencia en la legislación y gestión hídrica en España. En: *Jornadas IWRA-CENTA, Sevilla*. Instituto Geológico y Minero de España.
- García Vegas, R. (2013). *Caracterización hidroquímica de los recursos hídricos superficiales de la MAS Jarama-Tajuña*. Proyecto Fin de Máster, Universidad de Alcalá – Universidad Rey Juan Carlos, Madrid.
- Guijarro Pastor, J. A. (1980). *Cálculo de evapotranspiraciones potenciales en Baleares por el método de Linacré*. Trabajos de Geografía. Miscelánea 1978-1979 35:105-112.
- Hansen, B.K., Postma, D. (1995). Acidification, buffering and salt effects in the unsaturated zone of a sandy aquifer, Klosterhede, Denmark. *Water Resources Research* 31(11): 2795-2809.
- Hatva, T. (1994). Effects of gravel extraction on groundwater. En: IAHS (ed.) *Futures Groundwater Resources at Risk Proceedings of Helsinki Conference* 222: 247-434.
- Hobbs, S.L., Gunn, J. (1998). The hydrogeological effect of quarrying karstified limestone: option for prediction and mitigation. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 31: 147-157.
- IGME (1972). *Mapa geológico de España. Escala 1:50.000 (582)*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- ITGME (1997). *Mapa Hidrogeológico de España. Escala 1:200.000 (45)*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Madrid. Segunda Edición.
- Kuchovsky, T., Ricka, A., Cervenkova, J. (2008). Impact of gravel pits on ground water: case study of gravel pits near Mohelnice City, Czech Republic. En: *Mine Water and the Environment Proceedings, 10th International Mine Water Association Congress*, República Checa.
- Kumar, V. (2006). Kriging of groundwater levels: a case of study. *Journal of Spatial Hydrology* 6:81-94.

- 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.
- Mota Marcos, C., (2012). *Hidrogeología y actividad minera en el acuífero detrítico del tramo bajo del Jarama*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Rey Juan Carlos, Móstoles, Madrid.
- Mostaza Colado, D. (2012). *Análisis de la calidad de las aguas depuradas en España: implantación de un sistema de información de las estaciones depuradoras de aguas residuales*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Rey Juan Carlos, Móstoles, Madrid.
- 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.
- Ráez Tajuelo, J.M. (2013). *Caracterización hidroquímica de los recursos hídricos subterráneos de la MAS Jarama-Tajuña*. Proyecto Fin de Máster, Universidad de Alcalá – Universidad Rey Juan Carlos, 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.
- Xu, C.Y., Singh, V.P. (2001). Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes* 15:305-319.

**ANEXO**

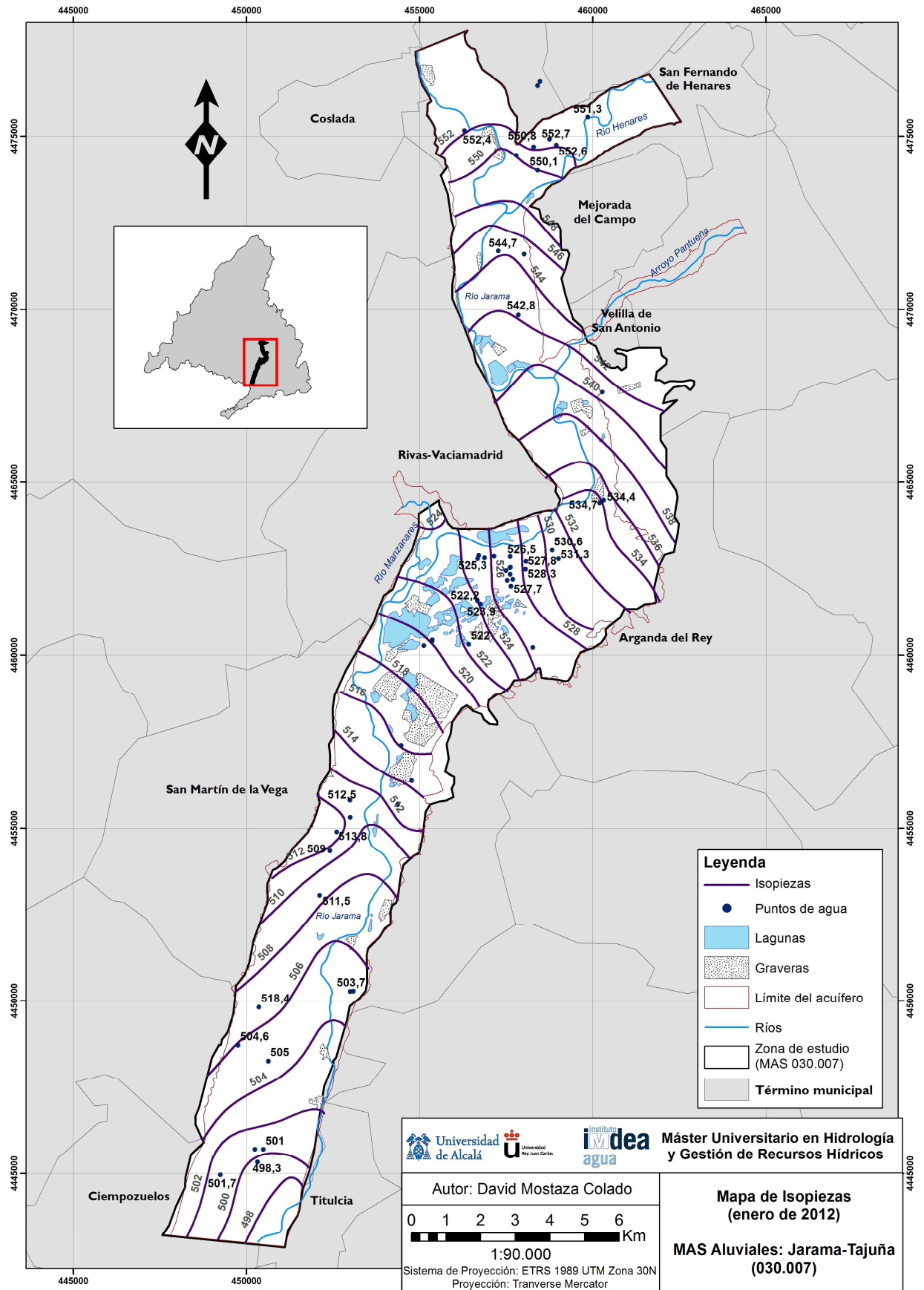


Figura 20. Mapa de isopiezas para la campaña de enero de 2012  
 Datos de campo extraídos de Mota, (2012).

ANEXO

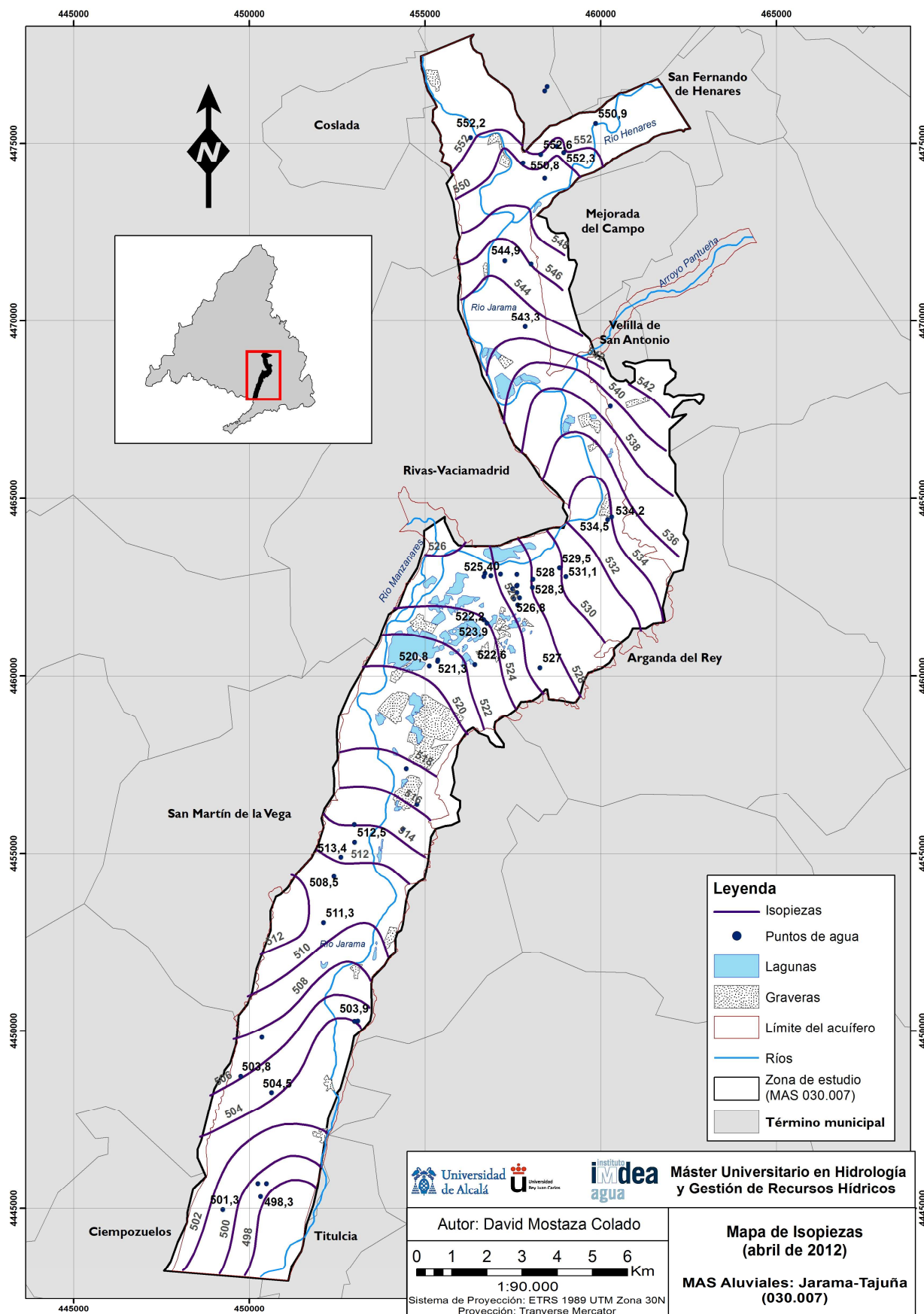


Figura 21. Mapa de isopiezas para la campaña de abril de 2012  
 Datos de campo extraídos de Mota, (2012).

**ANEXO**

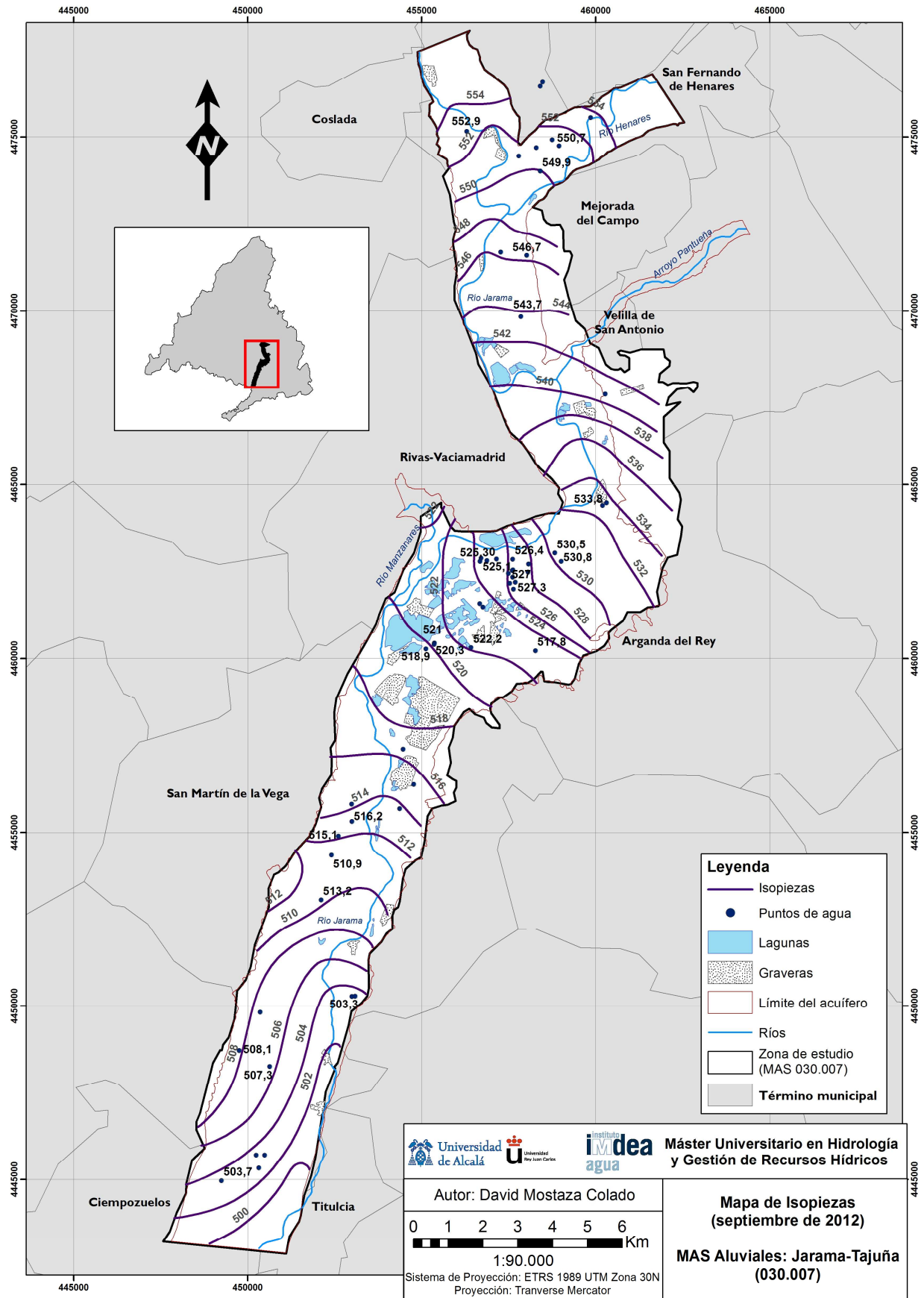


Figura 22. Mapa de isopiezas para la campaña de septiembre de 2012  
 Datos de campo extraídos de Mota, (2012).