

# **ASISTENCIA TÉCNICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE ÁREAS FAVORABLES PARA LA UBICACIÓN DE SONDEOS DE ALTA PRODUCTIVIDAD Y ESTIMACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO**

**TRABAJOS REALIZADOS DURANTE EL AÑO 2017 EN EL  
ACUÍFERO EZCARAY-PRADOLUENGO PARA MEJORAR EL  
ABASTECIMIENTO A LA MANCOMUNIDAD DEL RÍO OJA.**

**TOMO I  
MEMORIA**

**DICIEMBRE 2017**



**Gobierno de La Rioja**  
Dirección General de Calidad  
Ambiental y Agua



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA, INDUSTRIA  
Y COMPETITIVIDAD



Instituto Geológico  
y Minero de España





# **ASISTENCIA TÉCNICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE ÁREAS FAVORABLES PARA LA UBICACIÓN DE SONDEOS DE ALTA PRODUCTIVIDAD Y ESTIMACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO**

**TRABAJOS REALIZADOS DURANTE EL AÑO 2017 EN EL  
ACUÍFERO EZCARAY-PRADOLUENGO PARA MEJORAR EL  
ABASTECIMIENTO A LA MANCOMUNIDAD DEL RÍO OJA.**

**TOMO I  
MEMORIA**

**DICIEMBRE 2017**



**Gobierno de La Rioja**  
Dirección General de Calidad  
Ambiental y Agua



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA, INDUSTRIA  
Y COMPETITIVIDAD



Instituto Geológico  
y Minero de España



# INDICE



## INDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. ANTECEDENTES
3. METODOLOGÍA
4. GEOLOGÍA
  - 4.1. Área Cartografiada
  - 4.2. Marco geológico y estructural
  - 4.3. Unidades cartografiadas
    - 4.3.1. Precámbrico
    - 4.3.2. Paleozoico
    - 4.3.3. Carbonífero
    - 4.3.4. Triásico
    - 4.3.5. Jurásico
    - 4.3.6. Cenozoico
    - 4.3.7. Cuaternario
  - 4.4. Geomorfología
  - 4.5. Geología estructural
  - 4.6. Descripción de los cortes realizados
5. GEOFÍSICA
  - 5.1. Metodología y fundamentos de la tomografía eléctrica
  - 5.2. Trabajos realizados en el cauce del río Oja
  - 5.3. Perfiles medidos en la laguna de Anguta o de la Dehesa
  - 5.4. Conclusiones
6. CLIMATOLOGÍA
  - 6.1. Información meteorológica
  - 6.2. Análisis de correlación
  - 6.3. Identificación de ciclos climáticos y tipificación climática
7. INVENTARIO DE PUNTOS ACUÍFEROS
  - 7.1. Puntos acuíferos tipo zanja
  - 7.2. Manantiales
  - 7.3. Sondeos y pozos en el acuífero Jurásico
  - 7.4. Sondeos y pozos en otros acuíferos
8. HIDROMETRÍA
  - 8.1 Recopilación de datos históricos
    - 8.1.1. Caudales circulantes por la acequia de Ojastro
  - 8.2. Caudales circulantes por la estación de aforos de Azárrulla e interpretación de su hidrograma
    - 8.2.1. Emplazamiento de la estación.
    - 8.2.2. La serie foronómica de Azárrulla y los ciclos climáticos de la Estación 9115 W.
      - 8.2.3. Análisis de la serie foronómica de la estación 9157.
      - 8.2.4. Comentarios sobre la serie foronómica de la estación 9157
  - 8.3. Aforos en manantiales

- 8.4. Aforos diferenciales en los ríos Oja y Santurdejo
- 9. HIDRODINAMICA
  - 9.1 Parámetros hidrogeológicos del acuífero carbonatado Jurásico
  - 9.2 Parámetros hidrogeológicos del acuífero aluvial Cuaternario
- 10. NIVELACIÓN TOPOGRÁFICA DE PRECISIÓN
- 11. PIEZOMETRÍA
  - 11.1. Piezometría del acuífero Jurásico
  - 11.2. Piezometría del acuífero Cuaternario
- 12. HIDROQUÍMICA
- 13. RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO
- 14. RECARGA NATURAL AL ACUÍFERO JURASICO
  - 14.1. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MEDIANTE EL MÉTODO APLIS
    - 14.1.1. Fundamentos del método
    - 14.1.2. Fuentes de información
    - 14.1.3. Aplicación del método y resultados
      - 14.1.3.1. Parámetro A, altitud
      - 14.1.3.2. Parámetro P, pendiente
      - 14.1.3.3. Parámetro L, litología
      - 14.1.3.4. Parámetro I, infiltración preferente
      - 14.1.3.5. Parámetro S, suelo
      - 14.1.3.6. Factor Fh, características hidrogeológicas
    - 13.1.4. Evaluación de la recarga
  - 14.2. Estimación de la recarga mediante el modelo visual balance
    - 14.2.1. Objetivo
    - 14.2.2. Metodología
    - 14.2.3 Modelo de Balance hídrico
      - 14.2.3.1. Código Visual Balance
      - 14.2.3.2. Criterios de calibración
    - 14.2.4. Aplicación del código Visual Balance
      - 14.2.4.1. Zona a modelar
      - 14.2.4.2. Identificación de parámetros relevantes en la calibración
      - 14.2.4.3. Calibración
      - 14.2.4.4. Análisis y presentación de resultados
  - 14.3. Estimación de la recarga mediante el modelo RENATA
    - 14.3.1. Fundamentos del modelo Renata.
    - 14.3.2. Delimitación de sectores
    - 14.3.3. Aplicación y calibración del código
    - 14.3.4 Presentación y análisis de resultados
  - 14.4. Análisis y comparación de resultados entre las diferentes metodologías utilizadas para la estimación de la recarga natural.
- 15. ANÁLISIS DE USOS Y DEMANDAS DE AGUA
  - 15.1 Usos y demandas en la cuenca del río Oja
  - 15.2 Explotación y aprovechamiento del acuífero Jurásico

16. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO Y BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO JURASICO
17. LOCALIZACIÓN DE ÁREAS FAVORABLES PARA LA UBICACIÓN DE SONDEOS DE ALTA PRODUCTIVIDAD
18. ANÁLISIS DETALLADO DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE ACTUACIONES FUTURAS.
19. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS





# AUTORÍA



El presente documento ha sido elaborado por el  
**INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA** por  
encargo de la **DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD  
AMBIENTAL Y AGUA DEL GOBIERNO DE LA RIOJA**

La DIRECCIÓN administrativa de los trabajos ha sido  
efectuado por:

**DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD AMBIENTAL Y AGUA DEL  
GOBIERNO DE LA RIOJA**

María José Clavijo Izquierdo

**SERVICIO DE OBRAS HIDRÁULICAS DEL GOBIERNO DE LA  
RIOJA**

Alfredo Laguna Sáenz

**INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA**

José Manuel Murillo Díaz

La DIRECCIÓN técnica de los trabajos ha sido  
efectuado por:

José Manuel Murillo Díaz

La elaboración de cada uno de los capítulos de que consta el presente  
proyecto ha sido realizada por:

CAPÍTULO 1. José Manuel Murillo Díaz

CAPÍTULO 2. José María Ruiz Hernández

CAPÍTULO 3. José María Ruiz Hernández

CAPÍTULO 4. Javier Ramajo Cordero, Carlos Gale Bornao y Alejandro Robador  
Moreno

CAPÍTULO 5. Félix Manuel Rubio Sanchez-Aguililla

CAPÍTULO 6. Javier Gustavo Heredia Díaz y Carmen Serrano Hidalgo

CAPÍTULO 7. José María Ruiz Hernández y Miguel García Lapresta

CAPÍTULO 8. Javier Gustavo Heredia Díaz, Carmen Serrano Hidalgo, José María Ruiz Hernández, Juan de Dios Gómez Gómez y Miguel García Lapresta.

CAPÍTULO 9. José María Ruiz Hernández

CAPÍTULO 10 José María Ruiz Hernández y Juan de Dios Gómez Gómez

CAPÍTULO 11. José María Ruiz Hernández y Juan de Dios Gómez Gómez

CAPÍTULO 12. José María Ruiz Hernández

CAPÍTULO 13. José Antonio de la Orden Gómez

CAPÍTULO 14.1. Raquel Morales García, Leticia Vega Martín, Juan José Durán Valsero y Eulogio Pardo Igúzquiza.

CAPÍTULO 14.2. Javier Gustavo Heredia Díaz y Carmen Serrano Hidalgo

CAPÍTULO 14. 3. Juan de Dios Gómez Gómez

CAPÍTULO 15. José María Ruiz Hernández

CAPÍTULO 16. José Manuel Murillo Díaz

CAPÍTULO 17. José Manuel Murillo Díaz, Juan José Durán Valsero, Raquel Morales García y José María Ruiz Hernández

CAPÍTULO 18. José Manuel Murillo Díaz

# **1. INTRODUCCIÓN**



## 1. INTRODUCCIÓN.

El 22 de mayo de 2017 el Instituto geológico de España presento a la Dirección General de Calidad Ambiental y Agua del Gobierno de la Rioja la siguiente **“OFERTA DE CONTRATO DE SERVICIO DE ASISTENCIA TÉCNICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE ÁREAS FAVORABLES PARA LA UBICACIÓN DE SONDEOS DE ALTA PRODUCTIVIDAD Y ESTIMACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO”**.

En ella se especificaba lo siguiente:

En relación con el pliego de prescripciones técnicas para la contratación del servicio de “ASISTENCIA TÉCNICA PARA LA LOCALIZACIÓN DE ÁREAS FAVORABLES PARA LA UBICACIÓN DE SONDEOS DE ALTA PRODUCTIVIDAD Y ESTIMACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO”. Expediente 00860-2017/35441, el Departamento de Recursos Geológico del Instituto Geológico y Minero de España realiza la siguiente oferta:

1) Se procederá a localizar las áreas favorables para la ubicación de sondeos de alta productividad a partir de los resultados proporcionados por la cartografía a escala 1:10.000 de la “UNIDAD CALIZO-DOLOMÍTICA DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA 65 PRADOLUENGO-ANGUIANO” que será facilitada al IGME por la Dirección General de Calidad Ambiental y Agua del Gobierno de la Rioja. Los puntos concretos donde se recomienden realizar perforaciones se acompañarán de las características técnicas de la obra que es preciso ejecutar, del método de perforación más adecuado que se puede emplear para realizarla y de la columna geológica que se espera encontrar.

2) Se procederá a realizar una estimación y cuantificación del balance hídrico que se realizará de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$D_i = R_i - A_i - E_i$$

Donde:

$D_i$  es la disponibilidad hídrica en el instante de tiempo  $i$ .

$R_i$  la recarga de agua al acuífero en el instante de tiempo  $i$ .

$A_i$  los aprovechamientos que tienen lugar en el acuífero en el instante de tiempo  $i$  tanto por bombeo a través de sondeos como por captación directa de manantiales.

y

$E_i$  las necesidades ecológicas en ríos, manantiales y humedales en el instante de tiempo  $i$  previstas en el Plan Hidrológico de cuenca.

$i$  es el paso de tiempo, que será mensual.

El balance se realizará para una serie climática lo suficientemente amplia y representativa. El balance también se realizará para diferentes tipologías climáticas (años húmedos, medios y secos).

La recarga al acuífero se determinará a través de la siguiente ecuación:

$$R_i = R_{r_i} + R_{e_i} + R_{p_i}$$

Donde:

$R_{r_i}$  es la recarga que tiene lugar en el acuífero en el instante de tiempo  $i$  por causa del caudal de agua que se infiltra a través del lecho de los ríos. Este valor se determinará mediante el tratamiento de los datos obtenidos en la actividad 2.

$R_{e_i}$  corresponde a la recarga que tiene lugar en el acuífero tanto por retornos de regadío como por pérdidas en las redes de distribución. Se determinará a partir de encuestas específicas sobre dotaciones aplicadas y pérdidas en las redes de distribución y saneamiento que se realizarán a las organizaciones agrarias y ayuntamientos presentes en la zona de estudio.

$R_{p_i}$  es la recarga que tiene lugar en el acuífero a partir de la precipitación. Dado que dicho valor<sup>1</sup> constituye una de las mayores indefiniciones e incertidumbres que se presentan en la zona de estudio se utilizarán tres metodologías diferentes para su cálculo.

Dichas metodologías serán las siguientes: Método APLIS y modelos VISUAL BALANCE y RENATA. El empleo de varias metodologías para calcular la recarga por precipitación se debe a que no existe, según la comunidad científica, ningún método cien por cien fiable, por lo que se deben emplear varias metodologías para estimar el valor de la recarga al objeto comparar y verificar resultados. La determinación final debe incluir un análisis de incertidumbre.

3) Se realizará un análisis detallado de los resultados obtenidos y una propuesta de actuaciones futuras. Dicho documento también contemplará las alternativas más favorables y viables que se puedan plantear, que se acompañarán de una propuesta de actuaciones o plan de acción valorado económicamente. Se contemplará en un único documento la integración de todos los informes generados a lo largo de la asistencia, unificando y sintetizando su contenido al objeto de facilitar la toma de decisiones.

4) El IGME realizará la Supervisión y Dirección Técnica de los trabajos de cartografía geológica de detalle y de instrumentación y toma de datos para la mejora del conocimiento hidrogeológico de la masa de agua subterránea 65

---

<sup>1</sup> La recarga por precipitación se estiman en un orden de magnitud que parece variar, según autores, entre 4 y 8 hm<sup>3</sup>/a, por lo que la discrepancia existente entre los valores anteriormente mencionados puede llegar a suponer una diferencia porcentual del cien por cien. Esta apreciación alcanza todavía un mayor significado si se tiene en cuenta que la explotación del acuífero para el abastecimiento urbano de la mancomunidad del Oja se estima en 4,5 hm<sup>3</sup>/a. Es decir, los bombeos, para el supuesto más desfavorable de recarga natural al acuífero, serían mayores que los recursos disponibles, por lo que no se podría llevar a cabo un aprovechamiento sostenible del acuífero.



Pradoluengo-Anguiano que la Dirección General de Calidad Ambiental y Agua del Gobierno de la Rioja contratará a empresas especializadas o a profesionales libres.

El plazo de ejecución de los trabajos a realizar será de seis meses. La cuantía del servicio asciende a la cantidad de DIECISIETE MIL NOVECIENTOS CINCUENTA EUROS (17.950,00 EUROS), IVA excluido.



## **2. ANTECEDENTES**



## 2. ANTECEDENTES

Desde el año 2012 se vienen realizando distintas actuaciones y trabajos dentro del Plan de Abastecimiento de La Rioja por parte del Gobierno de La Rioja, bien directamente, bien mediante la colaboración de otros organismos públicos como el Consorcio de Aguas y Residuos de La Rioja (CARE) y la empresa pública Aguas de la Cuenca de España (ACUAES). Estos trabajos trataron de evaluar las afecciones provocadas por la explotación de los sondeos de San Torcuato y, trabajos para llevar a cabo sondeos de investigación para tratar de conseguir nuevas captaciones en el acuífero Pradoluengo-Anguiano que complementarían a las disponibles, como los propuestos en Zorraquín y en la Ermita de Allende.

Igualmente, en 2012 y 2014, con el objetivo de valorar la capacidad del acuífero Jurásico Inferior y las afecciones derivadas de la extracción de agua subterránea desde el pozo denominado San Torcuato-2 en Ezcaray, se llevan a cabo ensayos de bombeo de larga duración con altos caudales (197 l/s) y se pone de manifiesto un elevado grado de conexión del pozo con el río.

Con respecto a los recursos renovables de aguas subterráneas en el acuífero carbonatado también se han llevado a cabo diversos trabajos para intentar aproximar su determinación.

En trabajos realizados por ACUAEBRO en 2005 se cifraban los recursos hídricos superficiales Medios en el Río Oja o Glera en Zaldierna en unos 87 hm<sup>3</sup>/año en valores medios y, en unos 4,90 hm<sup>3</sup>/año la infiltración directa de las precipitaciones sobre el acuífero de calizas jurásicas de la Unidad Hidrogeológica Pradoluengo-Anguiano en la zona. La detracción en las captaciones de los pozos proyectadas, supondrá, en el año horizonte, un total de 5,45 hm<sup>3</sup>/año, equivalente a un 5,9% de los recursos totales (MIMAM, ACUAEBRO, 2005). En 2015 ACUAES realiza otros trabajos de revisión y actualización de los recursos disponibles de la masa de agua subterránea de Pradoluengo-Anguiano en la cuenca del Oja. La recarga media interanual del acuífero por infiltración de las precipitaciones se ha evaluado en 4,6 hm<sup>3</sup>/año.

Según el Plan Director de Abastecimiento de Agua a Poblaciones 2002-2015 de la Comunidad Autónoma de La Rioja, se tenía en cuenta la ejecución de una infraestructura de abastecimiento supramunicipal para el sistema Oja-Tirón. Estas obras se finalizaron en 2016 y se inició su explotación en 2017.

El sistema de abastecimiento cuenta con una estación de tratamiento de agua potable (ETAP) en Ezcaray y con captaciones para el suministro del sistema que captan principalmente los recursos subterráneos del acuífero carbonatado de la masa de agua subterránea Pradoluengo-Anguiano.



### **3. METODOLOGÍA**





### 3. METODOLOGÍA

Los trabajos llevados a cabo han sido los siguientes:

- Realización de una cartografía geológica de detalle.
- Realización de una campaña geofísica para caracterizar la geometría de algunos de los acuíferos de la zona.
- Estudio climatológico.
- Actualización del inventario de puntos acuíferos.
- Análisis y actualización de la información hidrométrica.
- Recopilación y análisis de los parámetros hidrodinámicos característicos de los acuíferos explotados.
- Campaña de nivelación de principales sondeos y del cauce del río Oja.
- Campañas de piezometría en pozos someros del acuífero detrítico aluvial para establecer una posible afección provocada por la explotación en el acuífero Jurásico y para disponer de datos con vistas a la realización de un modelo matemático que contemple la interrelación hídrica entre el acuífero Jurásico y el acuífero aluvial en Ezcaray.
- Toma de datos y estudio de la relación río-acuífero.
- Estudio y estimación de la recarga natural al acuífero carbonatado mediante diversas metodologías (método APLIS y Modelos VISUAL BALANCE y RENATA).
- Esquemas de gestión y balance hídrico del acuífero carbonatado bajo diferentes hipótesis de funcionamiento a través de la realización de un modelo unicelular.

En cada uno de los apartados que siguen al presente epígrafe se desarrolla la metodología desarrollada en los mismos con un cierto detalle.

Cabe indicar el Instituto Geológico y Minero de España ha realizado trabajos por iniciativa propia no contemplados en la oferta inicialmente presentada. La inclusión de dichos trabajos se ha realizado con el objetivo de mejorar la calidad del proyecto. El trabajo de mayor entidad que se ha llevado a cabo entre los no incluidos en la oferta inicial ha sido la realización de un modelo matemático unicelular al objeto de identificar y definir las pautas de explotación con las que se debe gestionar el acuífero Jurásico.



## **4. GEOLOGÍA**



## 4. GEOLOGÍA.

### 4.1. Área cartografiada.

La zona cartografiada se localiza en el borde septentrional de la Sierra de la Demanda, incluida en la Masa de Agua Subterránea “65 Pradoluengo-Anguiano” (Ver mapas, leyenda, cortes y reportaje fotográfico en Tomo II de anexos y mapas). El área de estudio (Figura 4.1.1) está comprendida entre las Hojas 202 “Santo Domingo de la Calzada” y 240 “Ezcaray” del mapa Geológico de la 2ª Serie del mapa geológico a escala 1:50.000, Serie MAGNA, del Instituto Geológico y Minero de España. El sector se encuentra delimitado por el río Tirón al oeste, los afloramientos de materiales paleozoicos al sur, el río Espardaña al este, y los afloramientos terciarios de la Depresión del Ebro al norte.

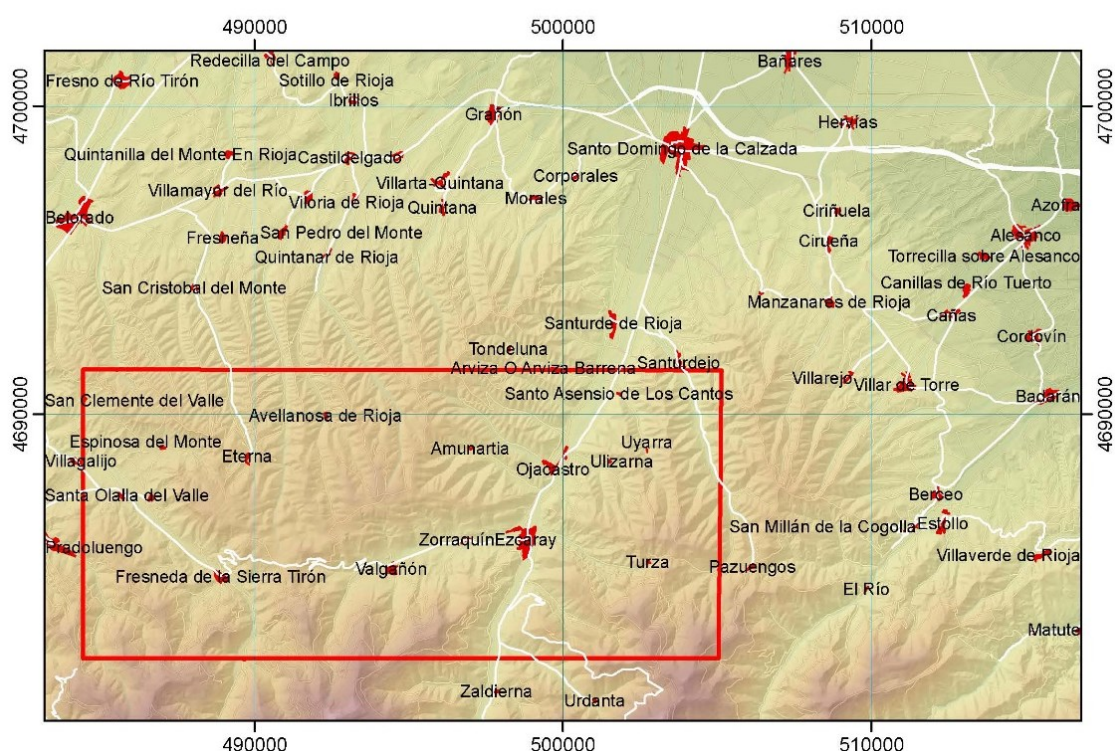


Figura. 4.1.1. Situación geográfica (recuadro rojo) del área de estudio.

En la zona comprendida entre los ríos Oja y Tirón, en la parte norte de la cartografía, confluyen los dominios geológicos de la Sierra de la Demanda y la Depresión del Ebro. Ese sector comprende la banda de materiales mesozoicos de Ezcaray, que está involucrada en el cabalgamiento frontal de la Sierra de la Demanda (dirigido hacia el norte) sobre el relleno Cenozoico del surco Ebro-Rioja. Desde el punto de vista geológico, la Sierra de la Demanda forma parte de la Cordillera Ibérica, mientras que el surco Ebro-Rioja suele ser encuadrado como la parte más occidental de la Cuenca Terciaria del Ebro.

## 4.2. Marco geológico y estructural.

Los materiales geológicos cartografiados se sitúan en el contacto entre los depósitos detríticos cenozoicos de la Cuenca de Ebro y los afloramientos paleozoicos de la Sierra de la Demanda (Figura 4.2.1). Están conformados por materiales mesozoicos de edad Triásico a Jurásico Medio, predominando las litologías calcáreo-dolomíticas, y recubiertos por materiales cuaternarios. Al sur se ha cartografiado el contacto con los materiales del Paleozoico de edad fundamentalmente cámbrica.

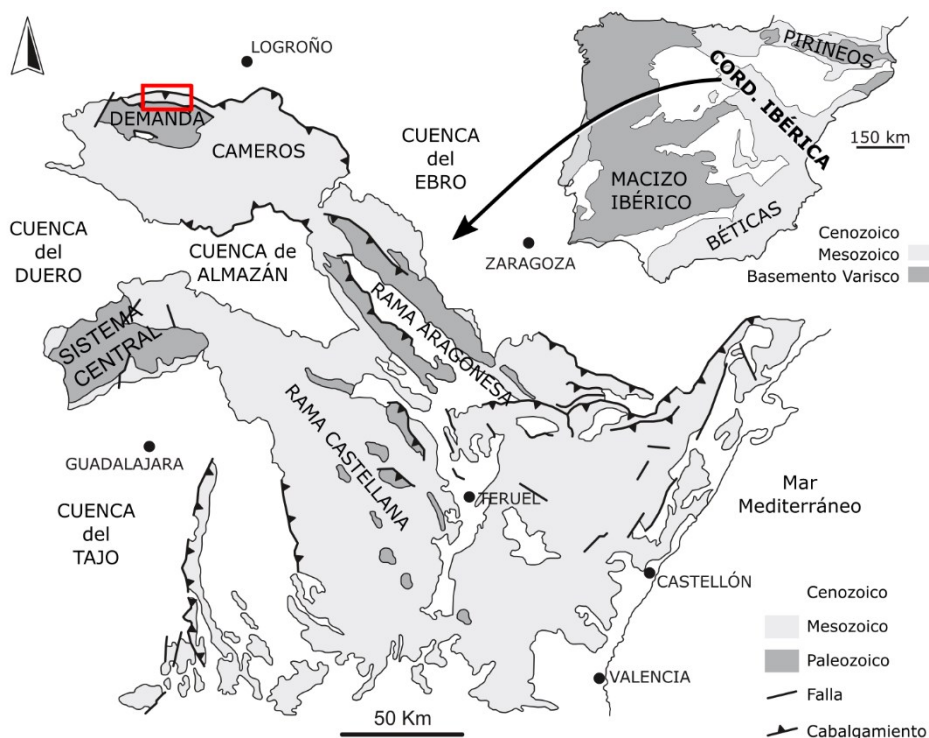


Figura 4.2.1. Situación geológica del área de estudio (recuadro en rojo). Modificado de Sopeña (2004).

En cuanto a su estructura, la Sierra de la Demanda forma parte de la Cordillera Ibérica. Al igual que dicha cordillera se encuentra plegada por la Orogenia Alpina, de edad cenozoica. En general este plegamiento en la Cordillera Ibérica está caracterizado por pliegues y cabalgamientos de direcciones NO-SE a E-O. La cobertera se encuentra despegada en los niveles margo-yesíferos del Triásico Medio y Superior. Además, su núcleo está constituido por materiales paleozoicos que han sufrido los efectos de la Orogenia Varisca previa.

La Sierra de la Demanda está representada en esta cartografía por una estrecha banda de materiales mesozoicos que, con orientación E-O, se extiende unos 12 km entre el río Tirón y el Río Oja. Esta banda se encuentra constituida por los niveles calcáreos y margosos del Jurásico, despegados en su base, en el contacto con los materiales arcillosos y yesíferos del Triásico superior (*Facies*



*Keuper*), presentando una estructura imbricada de pliegues y cabalgamientos de rumbo E-O y vergencia hacia el norte, donde cabalgan sobre los depósitos cenozoicos de la Cuenca del Ebro-Rioja. El cabalgamiento frontal se extiende de manera continua desde el oeste en las cercanías del río Tirón, hasta el Cerro de Santorcuator, al norte de Ezcaray, y está parcialmente cubierto por los conglomerados cenozoicos hasta Santurdejo y Turza, mostrando una inmersión hacia el sur. Éstos se encuentran levantados bajo el cabalgamiento, buzando hacia el norte, mientras que la unidad más moderna de este conjunto fosiliza esta estructura en la zona oriental de la cartografía.

Hacia el sur del cabalgamiento se desarrolla una estructura imbricada con varios cabalgamientos y pliegues que buzcan entre  $30^\circ$  y más de  $60^\circ$  con vergencia sur, llegando hasta casi verticalizarse, que deben enraizar en un nivel de despegue general constituido por los materiales de la facies *Keuper*. Posiblemente los cabalgamientos tuvieron, originalmente, una posición más tendida, y aparecen verticalizados por la progresión de las imbricaciones hacia el norte y el reapretamiento de las estructuras. Los despegues secundarios a favor de los niveles margosos jurásicos son frecuentes. Algunas fallas de desgarre de pequeño desarrollo, de rumbo NNO-SSE, completan el cuadro estructural, correspondiendo éstas a fallas de acomodación.

La envergadura del cabalgamiento frontal de la Sierra de la Demanda se puso de manifiesto en el sondeo petrolero “Demanda-1”, situado en el Paleozoico aflorante al sur de Pazuengos, a unos 7 km a ESE del Cerro Santorcuator (Fig. 4.2.2).



**Fig. 4.2.2. Localización del sondeo “Demanda-1” al sur de Pazuengos.**

En este sondeo se cortó al cabalgamiento frontal sobre los materiales cenozoicos, que en superficie aparece 1,5 km al norte, después de atravesar 300 m de materiales paleozoicos y 700 m de materiales mesozoicos. Tras cortar un espesor de 3000 m de depósitos cenozoicos de la Cuenca del Ebro, el Mesozoico del bloque cabalgado se perforó a 4.000 m de profundidad. Todo ello implica que el desplazamiento de la Sierra de la Demanda sobre la Cuenca del Ebro es del orden de varios kilómetros.

En cuanto a los materiales paleozoicos y triásicos situados al sur de la zona cartografiada, presentan una estructura compleja, puesto que a la deformación Varisca que afecta a las unidades más antiguas (Precámbrico a Cámbrico en la zona cartografiada), se le superponen estructuras de origen alpino que afectan a las unidades carboníferas y triásicas.

La tectónica Varisca es polifásica, caracterizada por estructuras plegadas, planares y lineales, de muy diversos tamaños y con acompañamiento de recristalizaciones metamórficas de grado bajo-medio. Las formaciones precarboníferas, constituidas por unidades litológicas con distintas características y litofacies que hacia el oeste son más pelíticas, no reaccionaron de manera homogénea frente a los esfuerzos tectónicos.

En las unidades donde predominan rocas cuarcíticas y estratos potentes, los pliegues tienen un gran radio de curvatura y tienden a ser isopacos y concéntricos, simétricos o disimétricos. Si presentan esquistosidad es a menudo de fractura, quedando la de flujo reservada a niveles pizarrosos intercalados. Las meso- y microestructuras son poco numerosas, estando localizadas esencialmente en los niveles pizarrosos del Cámbrico Medio. En general, los ejes de los pliegues mantienen una orientación ligeramente diferente a la alpina del terciario, más N-S que NO-SE. Las estructuras de acortamiento se acentúan durante la posterior fase alpina, así como la esquistosidad observada en los materiales.

Las estructuras suelen presentar una orientación definida por la fase alpina, si bien se pueden identificar orientaciones previas en algunas estructuras reactivadas por dicha fase. La mayoría suelen ser de carácter compresivo, a partir de fallas verticales que evolucionaron a fallas inversas como consecuencia de la compresión alpina.

Esta compresión alpina se manifiesta también en el comportamiento de los materiales del Triásico y de la base del Jurásico, que se encuentran afectados por fallas inversas en la mayor parte de los casos, así como por pliegues que acondicionan el acortamiento, no habiéndose observado estructuras de carácter diapírico en la zona cartografiada.



### 4.3. Unidades cartografiadas.

#### 4.3.1. Precámbrico

#### PC. Precámbrico

El Precámbrico aflora en el sur de la zona de estudio, a 350 m al SE de la aldea abandonada de Cilbarrena, en la confluencia del Bco. Surdía y el arroyo de la Zataya. Se trata de materiales pertenecientes al Fm Esquistos de Anguiano (Lotze, 1957; Colchen, 1974), denominada en el Mapa Geológico Digital continuo de España (GEODE) del IGME como “Esquistos y pizarras. Fm Anguiano” (unidad 7, zona Z1700 Ibérica; López Olmedo *et al.* 2018).

Se trata de un afloramiento de pequeñas dimensiones, inferior a 0,1 km<sup>2</sup>, constituido por pizarras y limolitas oscuras con intercalaciones arenosas, intensamente foliadas. La memoria del mapa geológico a escala 1:50.000 n° 240 MAGNA (Boquera *et al.* 1978) describen en su composición elementos detríticos y minerales de neoformación, como cuarzo y clorita, y no orientados, como micas y minerales opacos (Ramírez Merino *et al.*, 1990).

Es una unidad azoica, datada como Neoproterozoico por su similitud con las pizarras del Fm Paracuellos (Liñán y Tejero, 1988; Valladares *et al.*, 2002) aflorantes al SE, en la Cordillera Ibérica.

Se desconoce la base de esta unidad y su techo se encuentra parcialmente erosionado, y en contacto paraconforme con los conglomerados suprayacentes del Cámbrico Inferior denominados “Conglomerados de Anguiano”. La potencia aflorante de esta unidad no supera los 200 m.

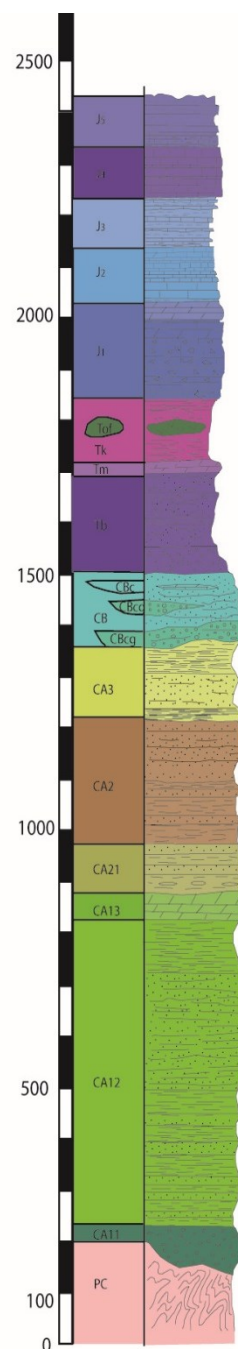


Fig.4.3.1. Columna sintética de las unidades del Paleozoico y Mesozoico cartografiadas.

#### 4.3.2. Paleozoico.

Las unidades paleozoicas cartografiadas constituyen el margen sur de la zona de estudio. En su mayor parte corresponden a metasedimentos detríticos de edad Cámbrico, si bien en la parte más occidental de la zona de estudio, al sur de la localidad de Fresneda del Río Tirón, aflora materiales detríticos con intercalaciones calcáreas de edad Carbonífero.

#### **CA<sub>11</sub>. Conglomerados. Fm Anguiano**

Esta unidad aflora 100 m al SE de la aldea abandonada de Cilbarrena rodeando a la unidad anterior. Fue definida como Fm Conglomerados de Anguiano (Colchen, 1974) y denominada en la Cartografía GEODE como “Conglomerados. Fm Anguiano” (unidad 9, zona Z1700 Ibérica; López Olmedo et al. 2018).

Al igual que en el caso de la unidad anterior, está presente en un único afloramiento de pequeñas dimensiones, próximo a 1 km<sup>2</sup>, constituido por conglomerados cuarcíticos con intercalaciones de areniscas. Los conglomerados están constituidos por cantos redondeados de cuarcita, liditas y venas de cuarzo. Los cantos tienen un tamaño mm a cm y están soportados por un cemento de cuarzo diagenético con micas, turmalina, rutilo y circón accesorios (Ábalos *et al.* 2011). No incluyen cantos de la unidad precámbrica subyacente. Su estratificación es poco marcada, definida principalmente por la disposición de los cantos y las intercalaciones de areniscas. Al contrario que la unidad anterior, no presentan una foliación penetrativa.

También se trata de una unidad azoica cuya edad Cámbrico Inferior ha sido establecida por similitud con la Fm. Bámbola de la parte central de la Cordillera Ibérica (Lotze, 1961; Palacios, 1982; Liñán *et al.*, 1993).

Están dispuestos de manera paraconforme sobre las pizarras precámbricas y continúan a techo con las areniscas de la unidad suprayacente concordante. Su potencia en la zona de estudio es de unos 30 m.

Esta unidad tiene un origen ligado a un ambiente sedimentario de playa conglomerática (Ábalos, 2001), siendo el resultado de la erosión de materiales precámbricos diferentes a los de la unidad infrayacente (Ábalos *et al.*, 2011). Este periodo de erosión y posterior depósito, parece estar ligado a la denominada regresión Córdoba del Límite Precámbrico - Cámbrico Inferior, que dio lugar posteriormente a una trasgresión en la base del Cámbrico (González *et al.* 2005).

## **CA<sub>12</sub>. Areniscas y pizarras. Fm Puntón**

De las unidades paleozoicas aflorantes al sur de la zona de estudio, ésta es la predominante el tercio oriental. Aflora al sur de la localidad de Ezcaray y es atravesada por el río Oja. Se trata de los materiales de las Fms Metareniscas de Puntón y Pizarras de Puntón (Colchen, 1974) integradas en la Cartografía MAGNA dentro de la unidad “Areniscas y pizarras de Puntón”. En la reciente Cartografía GEODE corresponde a la unidad “Areniscas y pizarras. Fms Puntón y Riocabado” (unidad 13, zona Z1700 Ibérica; López Olmedo et al. 2018).

Está constituido por materiales detríticos que se ordenan en dos tramos de diferente litología. El tramo inferior está formado por metareniscas de tonos pardos con intercalaciones de pizarras oscuras minoritarias en sus tramos más laminados. Hacia techo aumenta el tamaño de grano llegando a presentar facies microconglomeráticas masivas. Este primer tramo corresponde a la Fm Metareniscas de Puntón. El tramo superior se dispone en concordancia sobre el anterior y está constituido por los materiales pelíticos de la Fm Pizarras de Puntón.

En afloramiento presentan un microplegamiento intenso y una foliación muy penetrativa. Su espesor está estimado en unos 500 m, correspondiendo unos 400 m al tramo de metareniscas y los 100 m restantes a las pizarras. Su edad Cámbrico Inferior ha sido establecida por comparación con otras unidades con contenido fósil de la Cordillera Ibérica y la Península Ibérica (Liñán *et al.*, 2002).

## **CA<sub>13</sub>. Dolomías de San Antón**

Destacando como niveles guía dentro las unidades del Cámbrico, esta unidad dolomítica aflora en el tercio SE de la zona estudiada, entre las aldeas de Turza y Urdanta. Se trata de los materiales de la Fm Dolomías de San Antón (Colchen, 1974), denominada en la Cartografía GEODE como “Dolomías. Fms Mansilla y Urbión” (unidad 14, zona Z1700 Ibérica; López Olmedo et al. 2018).

Está constituido por bancos de dolomías gris azuladas con intercalaciones de pizarras pardas hacia la base, terminando la serie en un potente banco de dolomía masiva parda de espesor decamétrico.

La memoria de la Cartografía MAGNA describe su composición como formada mayoritariamente por carbonatos, en especial dolomita, seguido de calcita, siderita y ankerita. También son frecuentes las mineralizaciones de siderita, piritita y calcopiritita asociadas a fracturas en el tramo superior, que en otros tiempos fueron explotados (Ramírez Merino *et al.*, 1990). Son frecuentes las venillas secundarias blancas a rosadas de carbonato.

Su espesor es de unos 50 m y se encuentran dispuestas concordantes a muro de las pizarras carbonatadas y calcoesquistos de Azárulla.

### **CA<sub>21</sub>. Pizarras carbonatadas y calcoesquistos. Fm Azárulla**

Esta unidad se dispone concordante sobre la anterior y aflora en el tercio SE de la zona de estudio. Se trata de los materiales de la Fm Pizarras de Azárulla (Colchen, 1974), denominada en la Cartografía GEODE como “Pizarras carbonatadas y calcoesquistos. Fm Azárulla” (unidad 29, zona Z1700 Ibérica; López Olmedo et al. 2018).

Está constituida por una serie de pizarras carbonatadas verdosas en las que se distingue una alternancia de lechos entrelazados pizarrosos y carbonatados. Hacia techo la presencia de carbonatos disminuye, formando nódulos paralelos a la estratificación y desapareciendo a techo de la serie.

Se trata de una unidad de escaso espesor, que alcanza su máxima potencia de 25 m en la localidad tipo de donde toma el nombre, Azárulla, situada en el valle del río Oja, al sur de la zona de estudio. Su edad es Cámbrico Medio.

### **CA<sub>2</sub>. Pizarras verdes de río Gatón**

Esta unidad predomina en la mitad SW de la zona de estudio. Se trata de los materiales de la Fm Pizarras verdes de río Gatón (Colchen, 1974), denominada en la Cartografía GEODE como “Pizarras. Fm Río Gatón” (unidad 30, zona Z1700 Ibérica; López Olmedo et al. 2018).

Está formada por una alternancia de areniscas grises y pizarras gris verdosas, en bancos poco potentes y organizadas en secuencias granodecrescentes. En la base de la unidad se reconoce un potente paquete de areniscas constituido por bancos de espesor métrico. A techo aumenta la proporción de elementos pelíticos-lutíticos y la estratificación es muy fina.

En la base de los estratos se reconocen estructuras sedimentarias que son características de esta formación: estratificación gradada, estructuras de carga a escala macroscópica de tipo *Ball and pillow* y *ripples* de cresta recta. También se han reconocido icnofósiles de *Monocraterion sp.*, *Planolites reticulatus* Osgood y *Planolites sp.* (Shergold et al., 1983).

Esta unidad puede llegar a superar los 200 m de espesor y su edad es Cámbrico Medio.

### **CA<sub>3</sub>. Alternancia de Areniscas y Pizarras del Najerilla**

Esta unidad aflora en retazos en la mitad SW de la zona de estudio. Se trata de los materiales de la serie Alternancia del Najerilla (Colchen, 1974), denominada en la Cartografía GEODE como “Alternancia de Areniscas y Pizarras del Najerilla” (unidad 32, zona Z1700 Ibérica; López Olmedo et al. 2018).

Esta unidad constituye una formación compuesta por una serie de alternancias de metareniscas gris verdosas y pizarras azuladas. De nuevo la unidad se organiza en secuencias granodecipientes con predominio de areniscas en la base y un aumento paulatino de pizarras hacia techo de la secuencia. Las metareniscas son compactas y duras y de composición silíceas bastante homogénea. Las pizarras presentan una esquistosidad muy penetrativa.

Esta unidad alcanza espesores de más de 1000 m al sur de la zona estudiada y tiene una edad Cámbrico Superior.

#### 4.3.3. Carbonífero.

El Carbonífero tiene muy pequeña representación en la zona estudiada y se concentra en su parte más occidental, atravesado por el río Tirón. El contacto con los materiales cámbricos es discordante o tectónico y los materiales mesozoicos se disponen discordantes sobre el Carbonífero.

Incluye una sucesión de conglomerados, areniscas y pizarras, con lentejones calizos, expuesta de manera excepcional en el corte situado a 1,5 km al S de Fresneda del Río Tirón.

Las unidades cartografiadas en el presente trabajo corresponden a las unidades estratigráficas descritas por Colchen (1974) y sintetizadas por Villena y Pardo (1983). A partir del abundante contenido fósil de estas unidades, Colchen (1974) propone una edad *Westphaliense C* a *Estefaniense* para el Carbonífero de este sector.

### **CB. Pizarras con areniscas y conglomerados**

Esta unidad representa la secuencia sedimentaria propia del Carbonífero en la Sierra de la Demanda. Se trata de una alternancia de conglomerados, areniscas y pizarras con lentejones calcáreos a techo, donde se observa una disminución paulatina del tamaño de grano y un aumento de la clasificación y grado de redondeamiento de los componentes detríticos.

Hacia la base predominan los conglomerados formados por bloques y cantos de gran tamaño, englobados en una matriz arenosa-limosa. En la vertical pasan a una alternancia de conglomerados y areniscas de grano grueso mal

estratificadas. Más arriba en la secuencia se encuentra una alternancia de areniscas y pizarras para culminar a techo en una sucesión pizarrosa donde aparecen lentejones carbonatados.

### **CBcg. Areniscas y conglomerados**

Dentro de la serie carbonífera general, descrita en la unidad anterior, se han individualizado en la cartografía geológica una serie de niveles situados en la parte inferior y en la parte media, donde predominan las litologías detríticas gruesas. Se trata de niveles decimétricos a métricos de conglomerados con escasas intercalaciones de areniscas de carácter canaliforme. Estos niveles pueden formar tramos de varias decenas de metros de espesor intercalados entre los niveles que forman la serie anterior, distinguiéndose al menos 2 de estos niveles dentro del corte situado al S de Fresneda del río Tirón.

### **CBc. Niveles calcáreos**

Hacia el techo de la secuencia carbonífera se ha identificado en la cartografía geológica una unidad carbonatada que se puede seguir fácilmente a ambos lados del río Tirón. Se trata de un nivel de dolomías intercalado entre los niveles detríticos finos del Carbonífero.

#### 4.3.4. Triásico.

Dentro de la cartografía se han distinguido las unidades típicas del Trías Germánico de la Cordillera Ibérica, organizadas de base a techo como: Facies *Buntsandstein*, Facies *Muschelkalk* y Facies *Keuper*.

### **Tb. Areniscas y Conglomerados Facies *Buntsandstein***

Esta unidad aflora al sur de la zona de estudio y se encuentra afectada por una serie de cabalgamientos y fracturas que pueden incrementar el espesor de la misma.

Está constituida por una secuencia granodecreciente que comienza por un conglomerado rojo, bien clasificado, cuyo espesor puede llegar a los 20 m. Presenta cantos de rocas detríticas paleozoicas y cantos de cuarzo. La matriz es de color rojo. Por encima aparecen una serie de alternancias detríticas también de color rojo, compuestas por areniscas gruesas, finas y lutitas limosas, en bancos de espesores decimétricos a métricos. Es frecuente la estratificación paralela y cruzada.

Suelen presentar buzamientos muy verticalizados, en especial cerca de los contactos mecánicos o cabalgantes con el Paleozoico. En total, la potencia es aproximadamente de 80-100 m.

### **Tm. Margas y calizas dolomíticas. Facies *Muschelkalk***

Esta unidad aflora al sur de la zona de estudio, en contacto con la unidad anterior. Lo más característico de esta unidad es su falta de continuidad, acuñándose continuamente y dando lugar a una banda estrecha y lentejona. También se encuentra afectada por una serie de fracturas inversas, lo que junto a su conexión con los niveles plásticos de la facies *Keuper*, hace que esta unidad se encuentre involucrada en algunos de los cabalgamientos y estructuras que afecta a estos materiales al actuar como nivel de despegue.

Consiste en una serie de calizas dolomíticas y dolomías de tonos amarillentos y de aspecto tableado. Está compuesta en su base por un tramo de dolomías, margas y calizas tableadas y finamente laminadas, con laminación algal y ocasionales acumulaciones de bioclastos o peloides con aspecto nodular o estructuras sedimentarias de tipo *ripple*. Estos materiales pasan hacia la parte superior a calizas dolomíticas y carniolas que alternan con los primeros niveles de margas y lutitas de la facies *Keuper*.

La potencia de esta unidad es variable y puede llegar a tener 15-25 m.

### **Tk. Lutitas, margas y yesos. Facies *Keuper***

Esta unidad aflora en todo el sector central de la zona de estudio, separando los afloramientos paleozoicos y del Trías Inferior situados al S, de los mesozoicos y cenozoicos situados hacia el N. Corresponde al nivel de despegue de la cobertera por su plasticidad y está muy deformado por estar afectado por la estructura tectónica, presentando frecuentes contactos de tipo mecánico. Esta fracturación, su participación en los principales elementos estructurales de este sector y el carácter lábil de sus materiales hacen que sea muy difícil observar su secuencia completa. Además, incluye pequeñas y dispersas intrusiones de rocas ígneas (ofitas).

Es una unidad fundamentalmente lutítica que comprende arcillas y margas, de colores generalmente rojos, aunque también muestra un aspecto versicolor en numerosas ocasiones. Localmente se identifican niveles de arenisca rojiza de pequeño espesor interestratificados, así como lentejones de yeso y anhidrita negra, usualmente restringidos a la parte superior de esta unidad.

Su espesor es difícil de conocer al encontrarse involucrados en los procesos tectónicos regionales.

Se considera esta unidad como el nivel impermeable basal a escala regional del acuífero jurásico, lo que hace que en multitud de ocasiones se observen en el

mismo y en su contacto con los materiales del Jurásico, manantiales o fuentes como la de los Tres Caños en los alrededores de Valgañón.

### **Tof. Ofitas**

De forma aislada, aparecen pequeños afloramientos de rocas ígneas dentro de los materiales de la facies *Keuper*. En algunas ocasiones se trata de afloramientos tan pequeños que no tienen cabida en la cartografía realizada en el presente trabajo.

Son rocas ígneas de composición básica que se encuentran muy alteradas. En superficie presentan un color verdoso, en ocasiones amarillento, debido a la alteración de los minerales ferromagnesianos primarios a clorita y epidota secundarias. Suelen presentar un cierto moteado debido a los minerales opacos. Casi todos los afloramientos identificados están muy alterados y no conservan estructuras de emplazamiento ni relaciones de corte con el encajante.

En los alrededores de Fresneda del Río Tirón un afloramiento presenta rocas menos alteradas y su estudio revela una composición propia de las ofitas estudiadas tanto en el Pirineo como en la Cordillera Cantábrica (Azambre *et al.*, 1987; Lago, M. 1980; Lago *et al.* 2000). Se trata de rocas de textura dolerítica a subofítica, donde predominan el piroxeno, la plagioclasa y los minerales opacos, junto con minerales secundarios como la clorita y epidota.

Es muy difícil estimar el volumen total de esta unidad puesto que se trata de pequeñas intrusiones (*sills*) dentro de los materiales de la facies *Keuper* que han sido rotos y fragmentados por el intenso plegamiento que ha sufrido dicha unidad, debido a su carácter más frágil. Su edad podría ser Rhaetiense–Hettangiense si se toman como comparación las ofitas estudiadas en el Pirineo (Azambre *et al.*, 1987; Lago *et al.* 2000).

#### 4.3.5. Jurásico.

Los materiales del Jurásico se corresponden con una serie calco-dolomítica, con alguna intercalación margosa, que acoge al acuífero principal de la masa de agua Anguiano-Pradoluengo, objeto del presente estudio.

Se trata de materiales de edades Jurásico Inferior y Medio, perteneciente al intervalo Rhaetiense-Calloviense, sin que se hayan identificado afloramientos de materiales del Jurásico Superior.



## **J1. Calizas tableadas, Carniolas y Brechas Calcáreas. (Fms Imón y Cortes de Tajuña)**

Los materiales del Jurásico Inferior se disponen en los márgenes de los afloramientos jurásicos. Estos depósitos se sitúan por encima de los materiales del Triásico, en contacto concordante a veces mecanizado o mediante fracturas que afectan a las facies *Keuper*.

En determinadas zonas como el tramo que va desde la aldea de Turza hasta Ezcaray, o en los alrededores de Fresneda del río Tirón, se observan afloramientos aislados de los materiales de la base de esta unidad que están afectados por fallas y contactos mecanizados. Estos afloramientos dan lugar a resaltes morfológicos sobre los materiales de las facies *Keuper*.

La base de esta unidad se corresponde a un tramo tableado de calizas dolomíticas en facies de calizas micríticas laminadas, con intercalaciones de calizas oolíticas e intervalos de margas, con un espesor que no supera los 10 a 15 m y que puede ser atribuido a la Fm Dolomías de Imón.

Por encima se observan una serie de niveles margosos que dan paso a un tramo basal de calizas brechoides y brechas carbonatadas, con espesor métrico y aspecto caótico. En los sondeos realizados en las localidades de Zorraquín (Sondeo Zorraquín CARE GLR) y Ezcaray (Sondeo Superior Cantera GLR, Sondeo La Cantera IGME y Sondeo La Cantera IGME Ezcaray 3) se han descrito niveles de anhidrita dentro de los niveles de margas situadas por debajo de los niveles carniolares o brechoides, que se corresponderían a las facies de anhidrita que se sitúan en la parte basal de esta unidad, siendo equivalentes a las Fms Lécera (Gómez y Goy, 1998), de la Cordillera ibérica y Fm. Isabena (Arnal *et al.*, 2002) del Pirineo ambas situadas por encima de la Formación Dolomías de Imón.

Estas brechas se atribuyen a la disolución en superficie de los niveles de anhidritas cortados en los sondeos. Por encima de este tramo se sitúan dolomías rojizas oquerosas y brechoides de aspecto masivo o caótico (carniolas). En este tramo también se observan intercalados niveles de brechas intraformacionales de aspecto masivo, formados por cantos de calizas laminadas u oquerosas. Por encima de las carniolas aparece un tramo de calizas dolomíticas rojizas o micríticas masivas en bancos bien estratificados, con laminaciones de tipo algal y superficies onduladas. Este tramo puede presentar escasas intercalaciones margosas y da paso hacia techo a bancos individualizados de dolomías gruesamente cristalinas y de calizas dolomíticas de espesores decimétricos y tonos rojizos que alternan con margas.

El espesor es algo superior a 100 m. El origen de esta unidad se atribuye a depósitos en una llanura de mareas hipersalina, en condiciones inter- a supramareales y ambientes áridos evaporíticos

Atribuimos a esta unidad por correlación regional una edad Rhaetiense-Hettangiense. El tramo superior aquí descrito sería equivalente a la Fm Carniolas de Cortes de Tajuña de Goy *et al.* (1976).

En el campo esta unidad presenta una gran porosidad y/o permeabilidad. Esto es debido a la existencia de frecuentes tramos carniolares y brechoides, así como a la karstificación que presentan las dolomías y calizas dolomíticas de los tramos superiores de la serie. Esta karstificación puede apreciarse sobre todo en los materiales aflorantes en la zona de recarga situada entre el río Tirón y la laguna de Valgañón, así como en el área situada entre Ezcaray y Turza, donde se observan formas kársticas como dolinas o rellenos de cavidades dentro de estos materiales.

## **J<sub>2</sub>. Calizas Tableadas. Fm Cuevas Labradas.**

Esta unidad se dispone sobre la unidad anterior y es, de todas las del Jurásico, la que presenta una mayor superficie de afloramiento, estando frecuentemente afectada por pliegues de dirección ibérica NW-SE a NNW-SSE.

Su contacto basal es de carácter transicional, pudiendo estar cubierto al presentarse una mayor presencia de margas a techo de la unidad anterior. Esto hace que en muchas ocasiones la superficie de contacto coincida con el primer resalte topográfico producido por las calizas tableadas.

En el campo se observa en esta base una incipiente dolomitización lo que, unido a la karstificación de la serie, hace que en ocasiones sea difícil de distinguir de los tramos superiores de la unidad infrayacente J<sub>1</sub>. Estos materiales dan paso en la vertical a niveles de calizas micríticas de espesor decimétrico a métrico, que alternan con niveles decimétricos tableados y finamente laminados, dentro de los cuales se han identificado laminaciones estromatolíticas y porosidad móldica de disolución de cristales de yeso. Estas calizas alternan con niveles de calizas de carácter tractivo, bioclásticas y oolíticas con texturas *wackestone* a *packstone* o incluso *grainstone* oolíticos, con ocasionales *ripples*, que se hacen más comunes hacia la parte media-superior del tramo. Hacia techo se observa un aumento gradual de la presencia de niveles margosos y del contenido en bioclastos (bivalvos, braquiópodos, gasterópodos, belemnites y escasos ammonoideos).

Por encima se dispone un tramo final donde afloran calizas bioclásticas de aspecto nodular con frecuentes niveles de *hardground* y la presencia más común de ammonites.

Esta unidad presenta un espesor de unos 150 m. Su edad podría determinarse como Sinemuriense a Pliensbachiense por correlación regional. En cuanto al ambiente sedimentario, se depositaron en una plataforma carbonatada somera donde predominan los medios intermareales, aunque se pueden atribuir algunas de sus facies a depósitos submareales a intermareales en una llanura de mareas que evoluciona progresivamente a medios de mayor profundidad hacia techo.

En el campo en esta unidad presenta una intensa karstificación en la zona más alta, situada en el entorno de la Laguna de la Dehesa de Valgañón y en los alrededores de Fresneda del río Tirón, donde al igual que en la unidad anterior, abundan las formas kársticas de tipo *lapiaz* o *rillkarren*. Asimismo, hacia el este en la zona de Ezcaray se observa también la existencia de algunas formas kársticas como dolinas o simas de pequeñas dimensiones, rellenas por sedimentos de fondo de dolina. El contacto de esta unidad con los tramos basales de la unidad superior margosa, es un área favorable para el desarrollo de depresiones kársticas como el *polje* que da lugar a la Laguna de la Dehesa de Valgañón.

### **J3. Margas y calizas nodulosas. Fms Turmiel, Cerro del Pez y Barahona**

Esta unidad aflora principalmente en la parte central de los relieves comprendidos entre Fresneda del Río Tirón y Ezcaray, generalmente formando el núcleo de las estructuras sinclinales.

Estos materiales, por sus características litológicas, constituyen unos niveles erosionables y suelen estar cubiertos por depósitos cuaternarios. Esto hace que en la mayor parte de los casos solo se observen de manera detallada su parte inferior o superior.

De modo general, esta unidad se presenta como una sucesión de margas grises y verdes entre las que se intercalan niveles de calizas arcillosas, más frecuentes hacia el muro de la formación. En el campo se observan frecuentes intercalaciones de bancos de calizas de 30-60 cm de espesor con aspecto modoso, que contienen abundantes bioclastos de braquiópodos, bivalvos, crinoideos, ammonites y belemnites. La potencia total estimada es de unos 70 m. El tramo superior consiste en unos 15 m de calizas grises nodulosas, con juntas margosas y con estratificación ondulada correspondientes a la serie de transición al *Dogger*.

Su medio deposicional corresponde a una plataforma externa submareal bajo condiciones abiertas y salinidad normal. Su edad corresponde al intervalo Pliensbachiense-Toarciense en su tramo basal, mientras que el tramo superior de la unidad correspondería ya a la base del Aalenense.

En general este nivel se puede considerar que tiene escasa transmisividad. Asimismo, se observa la existencia de pequeños rezumes en los contactos por debajo de las calizas de la unidad J<sub>4</sub>.

#### **J<sub>4</sub>. Calizas tableadas.**

Esta unidad en general aflora como resaltes escarpados sobre el terreno, en la zona central de la sierra. Se le puede considerar equivalente a la Fm Carbonatada de Chelva de edad Jurásico Medio de Gómez y Goy (1976).

Esta unidad está representada por unos 50 m de calizas de carácter bioclástico a oolítico. En la base se observan calizas *wackestone* nodulosas con restos bioclásticos entre los que se intercalan algunos niveles oolíticos. Dentro de los mismos, y en las cercanías de la pista que lleva a las antenas de la Peña de Santorcuator, se observan una serie de calizas bioclásticas con frecuentes *hardgrounds* y relleno de bioclastos y ooides ferruginosos, que corresponde a la serie del límite Aalenense-Bajociense, descrita por García-Frank (2004) en este sector de la Sierra de la Demanda.

Por encima se sitúan calizas en facies *packstone* a *grainstone*, con niveles oolíticos a bioclásticos en paquetes métricos a decimétricos, con bases erosivas y estratificación cruzada planar y en surco, que dan lugar a clinofomas y acuñamientos que se reconocen fácilmente en afloramiento. Estas calizas oolíticas alternan con niveles de calizas *wackestone* con restos de esponjas, en los cuales se identifican pequeños montículos con restos bioclásticos (bivalvos, gasterópodos, esponjas, corales y equinodermos), así como peloides e intraclastos de fragmentos de esponjas.

El tramo superior está compuesto por una alternancia de bancos de calcarenitas finas con algunos restos bioclásticos y estratificación ondulada, en cuyo techo se dispone un nivel ferruginoso de concentración de fauna de ammonites y braquiópodos, con escasas intercalaciones de calizas margosas limosas y margas limosas.

Por comparación con áreas próximas de la Sierra de la Demanda, se puede atribuir esta unidad una edad comprendida entre desde el Aalenense-Bajociense al Bathoniense.

El depósito de estos materiales se realizó en una plataforma carbonatada abierta en la que tuvo lugar la entrada de material terrígeno fino, y con la existencia de una zona de alta energía con desarrollo de barras bioclásticas. Al abrigo de las mismas, el fondo fue colonizado por organismos, dando lugar a los montículos de esponjas.

Dentro esta unidad se observan indicios de karstificación, así como de una intensa fracturación y diaclasado, que puede facilitar la circulación de aguas, sobre todo en los tramos oolíticos y las facies de montículos de esponjas.

#### **J5. Margas y Calizas limosas y arenosas.**

Estos materiales se localizan en una serie de pequeños afloramientos que se disponen fundamentalmente en el núcleo de la sierra.

Se corresponden a tramos decimétricos de calizas limosas y calcarenitas que alternan con niveles de margas limosas de color pardo-verdoso, cuyo espesor no sobrepasa los 40 a 50 m.

Dentro de los niveles calcáreos se observan estructuras sedimentarias con estratificación planar horizontal a ondulada, ocasionalmente nodulosas. Sus condiciones de depósito posiblemente correspondan a un ambiente de carácter litoral en una etapa de regresión, debido al contenido progresivo en terrígenos de tamaño limo y arena.

Por correlación regional se han datado estas margas como de edad Bathoniense-Calloviense.

Se trata de un nivel cuya litología margosa, hace que tenga una baja permeabilidad y una escasa transmisividad. Observándose solo alguna circulación de aguas a favor de las fracturas.

#### **4.3.6. Cenozoico.**

Se incluyen aquí materiales de edad Oligoceno a Mioceno, se corresponden con los sedimentos del Surco Riojano de relleno de la Cuenca del Ebro. Dentro de los mismos se han observado materiales de carácter detrítico que varían entre conglomerados, areniscas y limolitas, producidos por la erosión de los materiales de la Sierra de la Demanda de manera coetánea al levantamiento de la misma, por lo que tienen un carácter sin-orogénico en su mayor parte.

### **T<sub>3</sub>. Conglomerados, areniscas, limolitas y arcillas**

Esta unidad aflora fundamentalmente en la zona del valle del río Tirón. En cuanto su litología, está compuesta por conglomerados con limolitas arenosas de colores rojizos y areniscas. Los conglomerados son mayoritarios en las áreas más próximas al frente de la sierra.

Estos conglomerados están formados por cantos heterogéneos de morfología subredondeada a subangulosa, procedentes de las calizas y dolomías jurásicas, y en menor proporción de las cuarcitas y esquistos paleozoicos. Los bancos conglomeráticos suelen presentar bases erosivas y estructuras tractivas de tipo estratificación cruzada planar y estratificación paralela de alto nivel energético, formando secuencias positivas granodecipientes, hacia el techo de las capas. Las limolitas son de tonos rojizos con espesores de hasta 1,5 m. Así mismo las areniscas son de tipo sublitoarenita con colores de tonos pardos.

Estos depósitos se originaron por procesos de corrientes acuosas tractivas, de tipo *braided*, siendo también probables la presencia de coladas de derrubios (*debris-flow*) y coladas de fango (*mud-flow*) de zonas proximales de abanicos aluviales.

La unidad presenta un espesor máximo de unos 400 m. Los materiales más jóvenes de este conjunto tienen una edad probablemente Chattiense (Oligoceno) de acuerdo con Muñoz, 1992 y Angulo, 2001. Se puede atribuir a las unidades tectosedimentaria UTS T3 o T4a de Pardo *et al.* (2004).

### **T<sub>4</sub> y T<sub>4cg</sub>. Conglomerados areniscas y lutitas, y conglomerados con lutitas**

De estas dos unidades, la inferior (T<sub>4cg</sub>), está formada por conglomerados fundamentalmente calcáreos, dispuestos en niveles masivos con escasas intercalaciones de lutitas, que se encuentran adosados al frente de cabalgamiento. Estos conglomerados pasan lateralmente a una serie distal de areniscas y limolitas con frecuentes niveles de conglomerados, que se han diferenciado en la cartografía como unidad T<sub>4</sub>. Estas unidades afloran al N de la sierra, principalmente en los alrededores de la localidad de Eterna y en la zona del valle del río Tirón, disponiéndose mediante paraconformidad o leve discordancia sobre la unidad T<sub>3</sub>.

Los conglomerados son masivos con bloques y cantos de calizas y dolomías jurásicas, areniscas del *Buntsandstein*, y esquistos y cuarcitas paleozoicas. Estos cantos presentan un carácter heterométrico con un tamaño muy variable, con un centil de más de 1 m de diámetro y una moda entre 5-7 cm. Se presentan fuertemente cementados por carbonatos y con una matriz arenosa.

Estos conglomerados masivos pasan, hacia el N, a las facies distales de la unidad, donde alternan términos arenosos y limolíticos de tonos rojizos (T<sub>4</sub>), presentando el conjunto una tendencia a constituir una megasecuencia positiva. Las estructuras sedimentarias son escasas, siendo los más frecuentes las cicatrices erosivas internas que amalgaman las capas masivas de conglomerado.

El conjunto de la unidad presenta una evolución en sentido S→N, correspondiendo a partes proximales de abanicos aluviales con desarrollo de coladas de detritus (*debris-flow*) procedentes de la Sierra de la Demanda.

Los datos bibliográficos apuntan a un espesor total para este conjunto superior a los 400 m. Su edad es probablemente Chatiense-Ramblense (Muñoz, 1992; Angulo, 2001). Se puede atribuir a la unidad tectosedimentaria UTS T4 o T4b de Pardo *et al.* (2004).

### **T<sub>5</sub>. Conglomerados carbonatados**

Esta unidad corresponde a los denominados Conglomerados de Ojacastro. Afloran al norte de la sierra, principalmente en los alrededores de la localidad de Eterna y en el valle del Oja a su paso por Ojacastro.

Son conglomerados compuestos por bloques y cantos de caliza, en mayor proporción que los identificados en la unidad anterior, que hacia techo evolucionan a una litología de los cantos más diversa, con restos de materiales cuarcíticos paleozoicos y del *Buntsandstein*. Presentan una fuerte heterometría que disminuye hacia techo, con estructura de *debris flow* hacia la parte inferior del tramo, mientras que en la vertical empiezan a aparecer estructuras canaliformes típicas de un depósito de abanico aluvial más desarrollado.

Se trata de cuerpos de conglomerados de aspecto masivo con cemento calcáreo o matriz limosa arcillosa, que alternan con restos de lutitas y limolitas pardas con intercalaciones de arenas, y que dan paso lateral a las facies más distales de T<sub>5s</sub> en la zona del valle del río Oja.

La unidad en su conjunto, al igual que la unidad anterior, presenta una evolución en sentido S→N, correspondiendo a partes proximales de abanicos aluviales con desarrollo de coladas de detritus (*debris-flow*) procedentes de la Sierra de la Demanda que evoluciona en la vertical a un mayor desarrollo de los abanicos aluviales.

Su edad es Ramblense-Aragoniense Inferior (Muñoz, 1992; Angulo, 2001). Se puede atribuir a la unidad tectosedimentaria UTS T5 de Pardo *et al.* (2004).

### **T<sub>5s</sub>. Areniscas y limolitas con intercalaciones de conglomerados**

Este conjunto litológico representa un cambio lateral de facies de la unidad anterior. Esta unidad está compuesta por arcillas de tonos grises y rojizos entre las que se intercalan niveles de areniscas de grano medio-grueso, así como gravas y conglomerados de cantos calcáreos o cuarcíticos y, eventualmente hacia techo, a niveles de lutitas y bancos de calizas con nódulos silíceos y margas de 0,40-1 m de espesor.

Como estructuras sedimentarias más frecuentes aparecen las superficies erosivas y las superficies de reactivación en los conglomerados, y bases canalizadas y estratificaciones cruzadas planares y en surco y *ripples* en las areniscas. Las secuencias suelen ser granodecrecientes, aunque en los tramos inferiores aparecen secuencias negativas.

Corresponden a depósitos de abanicos aluviales en los que ocurre una evolución de facies desde las más proximales con sedimentos de *mud-flow* y *debris-flow*, hasta las más distales de llanura de inundación con desarrollo de pequeños encharcamientos con precipitación de carbonatos, pasando por redes fluviales canalizadas posiblemente de tipo *braided*.

Su edad es similar a la de la unidad anterior, Ramblense Aragoniense inferior, y se puede atribuir a la unidad tectosedimentaria UTS T5 de Pardo *et al.* (2004).

### **T<sub>5</sub>-T<sub>6</sub>. Conglomerados carbonatados**

Esta unidad está compuesta por conglomerados calcáreos, que afloran adosados a los relieves jurásicos de la margen este del río Oja, al norte de la aldea de Turza.

Se trata de brechas y conglomerados monogénicos y heterométricos de cantos escasamente redondeados a angulosos de naturaleza calcárea, procedentes de las unidades jurásicas. Estos conglomerados se disponen en cuerpos decimétricos a métricos de aspecto caótico o sin ordenación aparente, con cemento carbonatado y matriz arenosa arcillosa, que evolucionan en la vertical a niveles conglomeráticos sueltos, intercalados con limos que se presentan en la mayor parte de los casos erosionados y con un aspecto caótico.

El espesor de esta serie es pequeño, con un desarrollo de no más de 60 m, presentándose en parte plegado por efecto del empuje del cabalgamiento frontal. Estos conglomerados representan un episodio de sedimentación sintectónico y contemporáneo, en parte, con la generación de los cabalgamientos.



En cuanto a su edad, esta se puede atribuir, al ser posterior a la unidad UTS 5 en parte, y disponerse por debajo de la unidad UTS 6 de Pardo *et al.* (2004), al Aragoniense Inferior-Medio (Aragoniense).

#### **T<sub>6</sub>. Conglomerados con matriz arcillosa parda**

Estos conglomerados se sitúan en las partes culminantes de los relieves situados en ambas márgenes del río Oja y se corresponden con depósitos postorogénicos de desmantelamiento de la Sierra de la Demanda.

Esta unidad se ha descrito como una unidad formada por conglomerados con cantos y bloques redondeados a subangulosos, de cuarcitas y esquistos paleozoicos, con una matriz limo-arenosa y arcillosa de colores pardos, crema y beige apenas cementada, y con un aspecto general masivo y desorganizado, que alternan con niveles limo-arenosos. Se estima que se trata de una potente formación de al menos 250 m de espesor.

Se interpretan como parte proximales de un sistema de abanicos aluviales con desarrollo S→N, observándose como hacia el N aumentan los niveles de arcillas limosas.

En cuanto a su edad, esta se puede atribuir, por correlación con la unidad UTS 6 de Pardo *et al.* (2004), al Aragoniense Superior-Vallesiense Inferior (Mioceno).

#### **T<sub>7</sub>. Conglomerados silíceos con matriz arcillosa**

Dentro de esta unidad se han incluido una serie de afloramientos de escasa entidad que se observan en discordancia por encima de los materiales del Jurásico, entre el río Tirón y la zona de la Laguna de la Dehesa. Se trata de conglomerados de morfología horizontal, muy cubiertos, que topográficamente se encuentran por encima de las cotas de la unidad anterior T<sub>6</sub>.

Estos afloramientos están compuestos litológicamente por bloques y cantos exclusivamente paleozoicos, con una matriz arcillosa limosa de tonos rojizos. Al estar cubiertos por la vegetación o afectados por el desarrollo de un perfil edáfico es difícil observar estructuras. Su espesor no supera los 10-15 m.

En cuanto a su edad, por su posición estratigráfica se encontrarían situados por encima de los materiales unidad UTS 6 de Pardo *et al.* (2004) de edad Aragoniense Superior-Vallesiense Inferior, siendo al menos posteriores a ésta, sin que sea posible determinar la misma con mayor precisión.

#### 4.3.7. Cuaternario.

Dentro de los materiales correspondientes a los depósitos de los procesos activos cuaternarios, se distinguen varios tipos de naturaleza variada.

##### **Qa. Gravas y limos no consolidados. Depósitos Aluviales**

Aquí se incluyen los fondos de valle. Están constituidos por una serie de depósitos de bolos y cantos de cuarzo y cuarcita, procedentes fundamentalmente del Paleozoico y Triásico (facies *Buntsandstein*) que se encuentra suelto o con una escasa matriz areno-arcillosa. En los depósitos de fondo de algunos barrancos se observa como lateralmente se pasa a depósitos arcillosos que engloban cantos de tamaño variable y cuya litología, carbonatada o siliciclástica, depende fuertemente de las características de los entornos más cercanos.

Son depósitos propios del Holoceno o del Pleistoceno Superior.

##### **Qt. Gravas con matriz arcillosa limosa. Depósitos de Terrazas**

Se trata de depósitos conformados por cantos y bloques cuarcítico-pizarrosos mayoritarios, matriz limo-arenosa y arcillosa y con escaso cemento carbonatado. Están constituidos mayoritariamente por los depósitos de terraza de los ríos Tirón y Oja que presentan un espesor máximo de unos 20 m. Dentro de este conjunto de terrazas, debido a su origen a partir de cauces fluviales de carácter *braided* es difícil diferenciar, diferentes niveles por lo que se han cartografiado como un nivel continuo. Sin embargo, en el entorno de algunos barrancos o ligados a depósitos de coluviones, ha sido posible identificar restos de un nivel de edad más antigua que se encuentra colgado sobre el río, a unos 5 a 10 m. Este último nivel tiene una litología similar al resto, aunque es más común la presencia de niveles arcillosos a limosos.

La edad de estos depósitos es variable, entre el Pleistoceno inferior y Superior.

##### **Qcd. Arenas, gravas y limos. Depósitos de cono de deyección**

Se trata de depósitos de gravas con escasas arenas y una matriz limoso-arenosa, que pueden presentar cierta estructuración y granoselección. La naturaleza de los cantos (cuarcíticos y/o calcáreos) y su grado de redondeamiento depende tanto del área fuente como del recorrido de los barrancos al final de los que se encuentran.

Estos depósitos proceden de los depósitos de final de los barrancos y valles, y responden a procesos de alternancia de periodos áridos y secos, con la presencia de episodios de flujo turbulento.

Se sitúan generalmente en los desagües de los barrancos situados al N de la sierra, correspondiendo los más importantes a los que desembocan en el valle del río Oja.

Su edad es indeterminada de Pleistoceno a Holoceno.

### **Qco. Arenas, gravas y limos. Depósitos coluviales**

Se agrupan en esta unidad los depósitos coluviales identificados. En general, están constituidos por bloques y cantos angulosos de dolomías y calizas jurásicas, con una matriz arenoso-arcillosa de colores pardos y ocres. Estos depósitos presentan una amplia extensión, dispuestos en una orla alrededor de los relieves jurásicos y triásicos, donde la cubierta vegetal es menor que en los relieves paleozoicos. Los depósitos observados presentan, en ocasiones, un depósito ordenado, pero en la mayoría de los casos es de carácter caótico, con ocasionales laderas de bloques sobre los depósitos coluviales.

Su edad es indeterminada de Pleistoceno a Holoceno.

### **Qtr. Calizas travertínicas**

Dentro de esta unidad se han agrupado los depósitos carbonatados tanto de naturaleza calcárea, como margoso-calcárea e incluso limosa, resultado de procesos kársticos y ligados a antiguas descargas fluviales, o a la presencia de fuentes y manantiales.

Destacan, por su extensión, los identificados en la Ermita de Nuestra Señora de Allende en Ezcaray, o los situados en las inmediaciones de la Laguna de la Dehesa de Valgañón.

Su edad es indeterminada de Pleistoceno a Holoceno.

### **Qfd. Lutitas rojizas limosas con cantos. Depósitos de fondo de dolina**

Dentro de estos depósitos se han incluido los materiales de relleno de las depresiones kársticas, dolinas y simas que se han identificado en la cartografía y con entidad suficiente para ser representados.

Se sitúan fundamentalmente sobre los materiales calcáreos de la serie jurásica, generalmente dentro de los términos inferiores de la misma. Así mismo se incluyen aquí los depósitos lacustres acumulados dentro del *polje* donde se encuentra la Laguna de la Dehesa de Valgañón.

Su edad es indeterminada de Pleistoceno a Holoceno.

#### **4.4. Geomorfología.**

Dentro de la zona cartografiada, se pueden diferenciar dos dominios geomorfológicos, definidos por los materiales que forman el sustrato litológico donde se desarrollan los procesos activos.

##### **DOMINIO NORTE**

En el dominio norte predominan los materiales del Terciario de la Cuenca del Ebro. Está caracterizado por una predominancia de los procesos de carácter fluvial-aluvial, con el desarrollo de superficies de erosión ligadas a la presencia de materiales detríticos con disposición subhorizontal.

En este sector los procesos activos han dado lugar a un relieve caracterizado por cerros alomados con desniveles importantes sobre los valles fluviales que los drenan. Hacia el N de la zona cartografiada y fuera de ésta, en las cercanías de Santo Domingo de la Calzada, los abanicos aluviales y glacis están cortados por la erosión, originando un paisaje de graderíos escalonados y de cerros testigo, bordeado por las extensas llanuras aluviales de los ríos Oja y Tirón y sus sistemas de terrazas (Pérez Gómez- *et al.* 1988). Sin embargo, este tipo de relieve no se aprecia claramente en nuestra cartografía al estar situado más norte.

En general, la zona cartografiada está caracterizada por un relieve contrastado donde predominan los procesos erosivos de incisión lineal, originando una densa red fluvial. Los cauces de primer orden han modelado morfologías en “espina de pescado” sobre las divisorias orográficas con barrancos y cauces secundarios con morfologías aluviales de valles de fondo plano. En la confluencia de los cauces secundarios con los de primer orden, fundamentalmente en el río Oja, se desarrollan depósitos de conos de deyección que a menudo han sido erosionados por el río principal. Este proceso se manifiesta claramente en la zona entre Ezcaray y Ojacastro, así como entre este último lugar y el borde N de la zona cartografiada.

En esta área, en el cauce del río Oja, confluyen extensos conos de deyección que el río es incapaz de erosionar, siendo buena parte del año su circulación subálvea por debajo del cauce actual. A esto hace referencia el otro nombre del río, Glera, ya que salvo en las épocas de crecida su lecho es una extensa llanura pedregosa donde se observan los cantos erosionados predominantemente de litologías paleozoicas y triásicas.

Los depósitos de terraza de este río y de sus afluentes, parecen presentar un desarrollo asimétrico en algunos puntos, tal y como se pone de manifiesto en las cercanías de la localidad de Ezcaray, probablemente por efecto de una diferente erosión diferencial sobre el sustrato, lo que condiciona el diferente espesor de

estos depósitos, que en esta zona supera los 15 m. En general, en el área al S de Ezcaray se identifica únicamente un nivel de estos depósitos, si bien se observan retazos de terrazas algo más antiguas, y situadas a mayor altura respecto al cauce, que pueden estar relacionadas lateralmente con depósitos de vertiente (coluviones).

## DOMINIO SUR

El dominio sur del área cartografiada se encuentra ocupado principalmente por los relieves de la Sierra de la Demanda, las primeras estribaciones de esta sierra están conformadas por relieves constituidos por materiales carbonatados jurásicos que se ponen en contacto con límite del cabalgamiento de la Sierra de la Demanda sobre la cuenca terciaria del Ebro.

En esta zona, la respuesta a los procesos activos cuaternarios se ve también condicionada por la estructura y litología de las diversas litologías, generando una erosión diferencial de los diversos materiales, que viene condicionada por la orientación de las estructuras tectónicas que presentan. Dentro de la serie jurásica aparecen distintas unidades, algunas consistentes en alternancia de calizas y margas (Toarciense, Bajociense, Calloviense), otras calizas bien estratificadas (Hettangiense-Sinemuriense), y finalmente, las que dan lugar a los relieves más espectaculares, calizas masivas o en estratos de varias decenas de metros de espesor (Bathonense). Esta erosión diferencial da lugar a la generación de lineaciones de las capas más competentes de la serie jurásica, que alterna con morfologías más suaves o depresiones en los tramos más margosos, que pueden presentar un fuerte desarrollo de niveles edáficos o incluso de depósitos de coluviones en las zonas de relieve más acusados.

Se observan también en las unidades jurásicas formas de relieves kársticos como pequeñas dolinas y *uvalas* formadas por disolución de los carbonatos, así como formas de mayor relieve como el *polje* donde se emplaza la Laguna de la Dehesa de Valgañón. Las formas más comunes, sin embargo, son las geometrías de menor entidad, como *rillkarren* o lapiaces, que afectan a los carbonatos mesozoicos. También es frecuente la generación de depósitos de travertinos asociados a las surgencias que producen los contrastes de permeabilidad entre los materiales carbonatados permeables o los impermeables (yesos del Triásico y niveles margosos jurásicos).

En la base de la serie jurásica aparecen las carniolas de Cortes de Tajuña que son relativamente poco potentes en La Rioja, y sólo localmente dan relieves contrastados cuando se encuentran aflorando por la acción tectónica englobados entre los niveles del *Keuper*.

Los yesos del Triásico, son relativamente fáciles de erosionar y, por tanto, dan relieves bajos. El paisaje asociado a los yesos triásicos es muy particular, ya que la denudación de los mismos se produce en muchos casos por disolución en superficie, dando lugar a regueros y lapiazes, o subaérea, que tiene como consecuencia la formación de dolinas o depresiones cerradas. La colonización por parte de la vegetación es, en general, difícil, debido a la propia composición de la roca (sulfato cálcico), por lo que una vez perdida la cobertura vegetal los suelos sobre yesos no suelen regenerarse.

En cuanto a las formas del relieve en la zona donde afloran las rocas paleozoicas, son diferentes de los de tramos mesozoicos y cenozoicos, debido fundamentalmente a la homogeneidad litológica, ya que prácticamente toda la serie paleozoica está formada por alternancias de areniscas y lutitas en estratos de espesor relativamente homogéneo. Este condicionante, así como la existencia de una fábrica planar o esquistosidad asociada a los pliegues, da lugar a que los relieves paleozoicos sean relativamente redondeados con la aparición de algunos niveles guías, de las litologías más gruesas o de dolomías, con un frecuente desarrollo de la vegetación y de perfiles edáficos de cierta entidad. Predominan los procesos de vertiente, los coluviones, así como el desarrollo de ríos y barrancos de escasa anchura, rellenos por materiales aluviales formados por cantos de cuarcita con escaso redondeamiento, indicativos de un transporte mínimo.

#### **4.5. Geología estructural.**

Dentro del área cartografiada, se pueden distinguir 3 zonas con distintas características estructurales que responden a la diferente litología de los materiales que los conforman. Estas zonas son: la zona norte, constituida por los materiales cenozoicos de la Depresión del Ebro, la zona central, donde afloran los materiales mesozoicos (triásicos y jurásicos) en una estrecha banda entre el río Tirón y las proximidades de la localidad de Pazuengos y, por último, la zona sur, configurada por los materiales paleozoicos de la Sierra de la Demanda.

La estructura general de este sector responde a una gran unidad paleozoica (sierra de la Demanda) que incorpora una cobertura mesozoica en su zona frontal, que se dispone de forma alóctona sobre los sedimentos cenozoicos continentales de la Cuenca del Ebro. Esta superposición se realiza por medio de una superficie de cabalgamiento que presenta un desplazamiento muy importante, estimado en varios Km hacia el norte.

La primera zona está caracterizada por la presencia de los materiales del Terciario de la Depresión del Ebro, que presentan una disposición general subhorizontal. Las unidades superiores (unidad T6), en el contacto con el cabalgamiento, tienen un carácter sintectónico mostrando ligeros buzamientos

hacia el norte por el efecto de empuje del cabalgamiento. De igual manera, en esta misma área, la base de la unidad T5-T6, se encuentra plegada en ligero sinclinal debido al movimiento de esta misma estructura. Las unidades superiores, como T7, se encuentran ya depositadas en una fase postectónica, mosteando una disposición horizontal por encima de los materiales cenozoicos subyacentes. En cuanto a la fracturación, se observa de manera general una serie de fallas normales o inversas paralelas a la traza del cabalgamiento y que afectan tanto a la unidad T6, como a las inferiores T5 y T4. Estas estructuras se interpretan como una respuesta a los efectos compresivos del cabalgamiento.

En la zona central afloran los materiales mesozoicos del área cartografiada entre los ríos Tirón y Oja que se prolongan desde las inmediaciones de la Ermita de San Torcuator hasta las cercanías de la localidad de Pazuengos. En esta zona, el Jurásico presenta una estructura general sinforme, cabalgando sobre los materiales del Terciario de la Cuenca del Ebro a través de un nivel de despegue en el Triásico Superior. En la zona occidental, este cabalgamiento se puede seguir parcialmente desde las inmediaciones del río Tirón hasta las cercanías de la localidad de Eterna (Burgos), a partir de la cual, se encuentra cubierto por los materiales del Mioceno Superior de la unidad T6. Hacia el río Oja, el cabalgamiento vuelve a "aflorar" presentando al oeste de Ezcaray un buzamiento no muy elevado. Esta falla vuelve a estar cubierto por las unidades del Terciario T5 y T6 a partir de la Peña de Santorcuator, hasta la localidad de Pazuengos.

La estructura general de toda la banda de materiales mesozoicos entre los Oja y Tirón se corresponde con un sinforme de amplio radio, con una orla de materiales triásicos en la mayor parte de su contorno, y que presenta una inmersión general hacia el río Oja, como se muestra en el corte V-V'. Este sinforme está estructurado en un tren de sinclinales y anticlinales muy apretados, que llegan a tener sus flancos invertidos y están afectados por fallas inversas, que se pueden corresponder, en ocasiones, con fracturas de tipo normal que actuaron como inversas a consecuencia de la compresión alpina.

Estas fracturas relacionadas con las estructuras compresivas, suelen ser paralelas al cabalgamiento, con una orientación W-E. Entre ellas, destaca una falla que aflora desde las cercanías del río Tirón hasta la Laguna de la Dehesa de Valgañón. Esta fractura, que puede afectar incluso al nivel de despegue del Triásico, separa una zona meridional con una estructura de sinclinal, de una zona septentrional caracterizada por una estructura comprimida con flancos verticalizados o invertidos formado por una serie anticlinal-sinclinal-anticlinal que puede observarse en el corte III-III' y en las cercanías de la localidad de Eterna. Hacia el este y desde el norte de la localidad de Zorraquín hasta las proximidades de Ezcaray, esta estructuración parece simplificarse dando lugar a una estructura de anticlinal-sinclinal-anticlinal apretado con flancos verticalizados o ligeramente invertidos. Estos materiales están afectados por fallas inversas de

pequeño salto como resultado de la compresión de los materiales mesozoicos. Todo el conjunto está afectado por una serie de fracturas de dirección NE-SW, o su conjugada SE-NE, generalmente de carácter normal, que contribuyen a la compresión de la estructura.

En los bordes sur y este de esta estructura se observa como los materiales de la base del Jurásico se presentan replegados y, habitualmente, en contacto mecánico con los materiales de la facies *Keuper*. Es frecuente que en esta zona de contacto se observen, en ocasiones, afloramientos aislados de las calizas de la base del Jurásico entre los materiales del *Keuper*, por efecto de la fracturación. Los materiales jurásicos en este sector, corresponden de este modo a fragmentos aislados, separados por contactos mecánicos de las unidades lutíticas de las facies *Keuper* y por tanto son masas de escasa continuidad lateral.

Así, entre las localidades de Zorraquín y Turza, afloran bloques de Jurásico con buzamientos verticalizados, invertidos o formando pequeños anticlinales, que se encuentran separados por fallas inversas o cabalgamientos entre los que afloran lutitas con yesos de la facies *Keuper* y ofitas del Triásico Superior. Hacia la zona meridional, y entre las localidades de Valgañón y Ezcaray, los materiales del *Keuper* están estructurados en forma de pequeños anticlinales en cuyos núcleos llegan a aflorar los materiales carbonatados del Triásico en facies *Muschelkalk*.

El tercer dominio estructural está conformado por los afloramientos de los materiales paleozoicos, que cabalgan sobre los materiales del Triásico. El borde norte de este dominio está formado por una serie invertida del Triásico en facies *Buntsandstein*, que se dispone de verticalizado a invertido, y deja aflorar a techo los materiales de la facies carbonatada del *Muschelkalk*. El Paleozoico que aflora al sur de esta banda presenta una estructura compleja caracterizada por la superposición de las fases Varisca y Alpina. Los pliegues tienen una orientación diferente a la Alpina (tendente a N-S) y se observan a todas las escalas en función de la litología. A microescala se observa una esquistosidad de pliegue y de flujo, muy bien desarrollada especialmente en las pizarras cámbricas. Todas estas estructuras Variscas de acortamiento se acentuaron durante la posterior fase Alpina, que se manifiesta en este dominio por la presencia de contactos mecánicos, fallas inversas o cabalgamientos de dirección paralela o subparalela a la dirección del cabalgamiento.

#### **4.6. Descripción de los cortes realizados.**

Se han realizado un total de 5 cortes para ayudar en la interpretación general de la estructura de la zona estudiada (Ver Tomo II de anexos y mapas). Los cuatro primeros (I-I', II-II', III-III' y IV-IV') cortan la estructura de S a N, comenzando en el Paleozoico o en la base de la serie mesozoica, atraviesan el Jurásico y



finalizando en el Terciario una vez superado el cabalgamiento frontal de la Sierra de la Demanda. El corte V-V' es un corte transversal a los anteriores y cruza la sierra por la serie jurásica. La situación de los cortes se muestra en la figura 4.6.1.

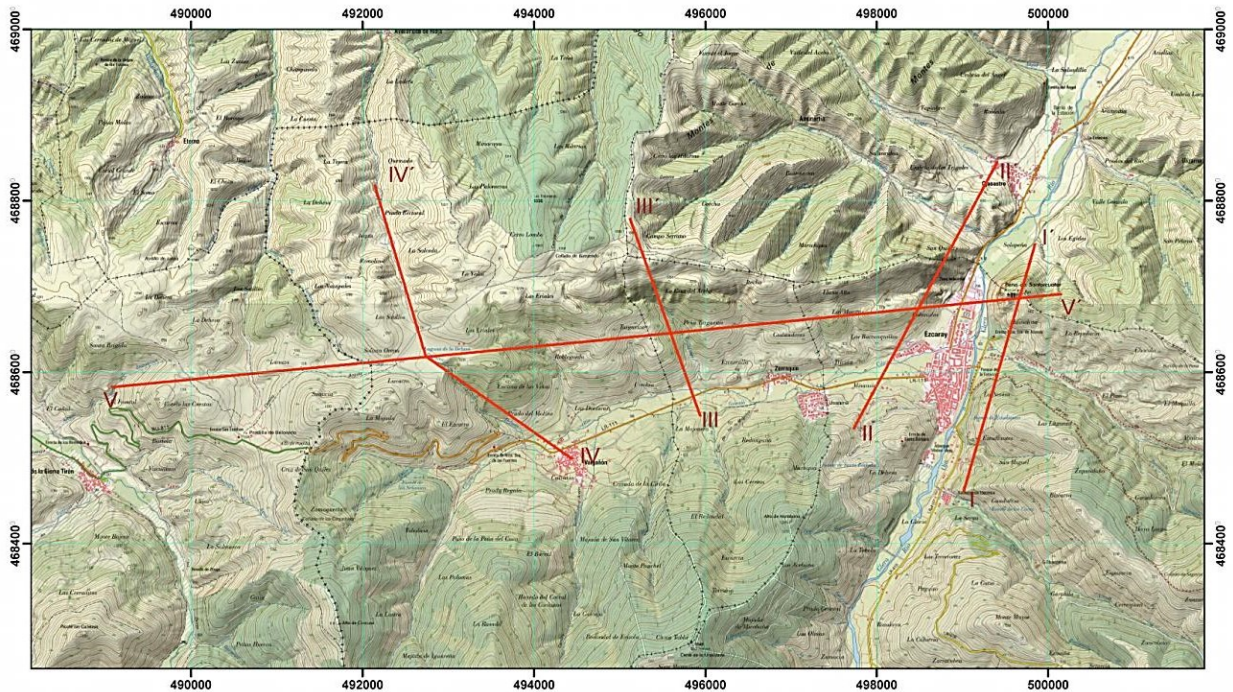


Fig. 4.6.1. Situación de los cortes realizados.

#### CORTE I-I'

Este corte está realizado en la margen derecha del río Oja, cruzando la peña de Santorcuator, y tiene una traza de dirección N016 (NNE-SSO). Sus extremos se sitúan (Fig. 5), al sur (I) cerca de la desembocadura del río Gilbarrena en el río Oja y, al norte (I') en la salida del barranco de Santorcuator, al norte de la peña del mismo nombre

Se pueden distinguir en el mismo al menos 2 zonas con diferente comportamiento estructural.

En la zona sur afloran los materiales paleozoicos del Cámbrico, que se disponen fuertemente replegados y en contacto con los materiales del Triásico en facies *Buntsandstein* y *Muschelkalk* por medio de una falla inversa o cabalgamiento. Los materiales triásicos se encuentran invertidos y están afectados por estructuras compresivas del tipo falla inversa. La serie continúa invertida hacia el N, donde aflora el Triásico en facies *Keuper*, que se encuentra, probablemente, afectado por un plegamiento complejo debido a su comportamiento dúctil respecto a los esfuerzos compresivos.

Siguiendo hacia el N, y mediante un contacto normal, o en ocasiones mecanizado, se dispone la serie jurásica (J1 a J3 Jurásico Inferior y Medio) estructurado mediante un tren de pliegues muy apretados, en forma de sinclinorio-anticlinorio-sinclinorio, con buzamientos en general elevados y una vergencia norte. Esta estructura se encuentra cortada por fallas de orientación E-O y buzamiento hacia el sur, paralelas a la superficie de cabalgamiento principal, pero con mucha mayor pendiente, que entroncan con este último en profundidad. El desplazamiento de estas fallas en la transversal del corte responde a movimientos con componente de falla normal, hundiendo el flanco sur de la estructura.

En la zona norte, los materiales de la serie jurásica se encuentran cabalgando sobre el Terciario, cabalgamiento en el cual se observa la presencia de una cuña que afecta al Jurásico Inferior. Este cabalgamiento tiene vergencia norte, un elevado buzamiento y se produce sobre materiales del Mioceno pertenecientes a la unidad T5. Aunque no se observa directamente sobre la transversal de este corte, más al oeste este cabalgamiento se encuentra parcialmente fosilizado por los materiales de las unidades superiores (T6).

En el contacto con el cabalgamiento los materiales detríticos cenozoicos presentan un ligero buzamiento hacia el norte que se pierde progresivamente hacia áreas más septentrionales.

#### CORTE II-II'

Este corte está realizado en la margen izquierda del río Oja Su traza de dirección N028 (NNE-SSO) pasa por las cercanías de los sondeos perforados en la cantera de Ezcaray (Sondeo Superior Cantera GLR, Sondeo La Cantera IGME y Sondeo La Cantera IGME Ezcaray 3). Sus extremos se localizan (Fig. 5), al sur (II) en el barranco situado al oeste de la Ermita de Santa Bárbara y, al norte (II') en Ojastro, en el arroyo de La Corraiva.

Dentro del corte se observa una zona sur, donde los materiales del Triásico (Tb y Tm) afloran en los flancos de un anticlinorio ligeramente invertido con núcleo paleozoico, que se encuentra afectado por fallas inversas. Hacia el norte aparecen los materiales del nivel de despegue del Triásico (Tk, facies *Keuper*), que se observan en campo, fuertemente plegados y afectados por estructuras de acortamiento del tipo falla inversa; sobre ellos se disponen los materiales del Jurásico inferior mediante un contacto normal o ligeramente mecanizado.

La estructura de los materiales jurásicos en la parte frontal del cabalgamiento principal está constituida por una serie de estrechos pliegues ligados a fallas inversas de alto buzamiento, paralelas a la superficie de despegue principal. Las estructuras de plegamiento tienen una vergencia norte y corresponden a una sucesión de sinclinorio-anticlinorio-sinclinorio-anticlinorio muy apretados.

Algunos de los afloramientos meridionales de la base del Jurásico en la transversal del corte forman masas enraizadas en profundidad entre los materiales del *Keuper*, cortadas por cabalgamientos en su límite septentrional.

Toda esta franja de materiales mesozoicos cabalga sobre los depósitos cenozoicos de la Cuenca del Ebro de edad Mioceno T5 y parcialmente fosilizados por los materiales de la unidad T6.

#### CORTE III-III'

Este corte se ha realizado en la margen derecha del Arroyo de Callejones con una orientación SE-NW a S-N. Desde las proximidades de la carretera LR-111 entre Zorraquín y Valgañón, hasta el norte del cabalgamiento principal, pasando por los sondeos perforados de Zorraquín.

La parte meridional de esta sección está ocupada por los materiales del Triásico en facies *Keuper*. Su observación directa en el campo muestra una deformación por plegamiento muy intensa. Hacia el norte se disponen sobre ellos, en contacto concordante, los materiales del Jurásico inferior, unidades J1, J2 y J3, que se presentan estrechamente plegados, con un vergencia general de la estructura hacia el N. En detalle, de norte a sur la estructura está compuesta por un apretado anticlinal vergente al norte seguido de un sinclinal y un nuevo anticlinal muy estrecho. La parte meridional de los afloramientos jurásicos está constituida por un flanco sinclinal de buzamiento medio cortada por un cabalgamiento de buzamiento hacia el sur.

Esta banda mesozoica se dispone cabalgando sobre el terciario de la unidad T5 y se encuentra fosilizada por los materiales de la unidad T6.

#### CORTE IV-IV'

Este corte se ha realizado con una orientación SE-NW desde el sur de la localidad de Valgañón, hasta la Laguna de la Dehesa, pasando en este punto a tener una orientación más noroeste llegando hasta la localidad de Anguta y el pueblo de Eterna.

En este corte se observa como desde las cercanías de las Fuentes de los tres caños, que se sitúa en el contacto entre el Triásico (facies *Keuper*) Tk y la unidad inferior jurásica J1 hasta la Laguna de la Dehesa afloran materiales del Jurásico inferior y medio. Estos presentan una disposición de sinclinal-anticlinal de vergencia norte, con un flanco septentrional localmente invertido. A partir del norte de la laguna de la Dehesa, se encuentra una falla inversa que afecta a toda la estructura implicando probablemente el ascenso del nivel de despegue del Triásico Tk, como se observa más hacia el oeste. A partir de este punto la serie

jurásica se estructura formando un tren de pliegues, compuesto por una sucesión anticlinal-sinclinal-anticlinal que presentan flancos verticalizados e incluso invertidos. Este conjunto se encuentra cabalgando sobre el Terciario (Mioceno) T5 y parcialmente fosilizado por la unidad T6.

#### CORTE V-V'

Este corte responde a una sección longitudinal de la estructura, realizado con el apoyo de los cortes transversales con el objetivo de comprobar la disposición general de la franja cabalgante mesozoica. De este modo, su traza tiene una orientación W-E desde las cercanías del río Tirón pasando por la Laguna de la Dehesa hasta el río Oja la localidad Ezcaray y los pozos de Santorcuator.

En la sección, paralela a la estructura general, la estructura de los materiales del Jurásico se muestra como una serie de anticlinales-sinclinales muy suaves, que afectan al Jurásico inferior. La integración de las secciones transversales sobre la traza del perfil muestra una suave inclinación general de la serie jurásica hacia el Este, que se dispone sin mayores rupturas sobre los materiales del Triásico en facies *Keuper*, de carácter impermeable. Esta disposición va a dar lugar a un condicionamiento del flujo hídrico y de las descargas subterráneas hacia el Este, hacia la zona del río Oja.

El conjunto de la serie jurásica, solidaria por encima de los materiales del Triásico en facies *Keuper* se encuentra cabalgando sobre los materiales del Terciario de edad Miocena unidad T5.

## **5. GEOFÍSICA**

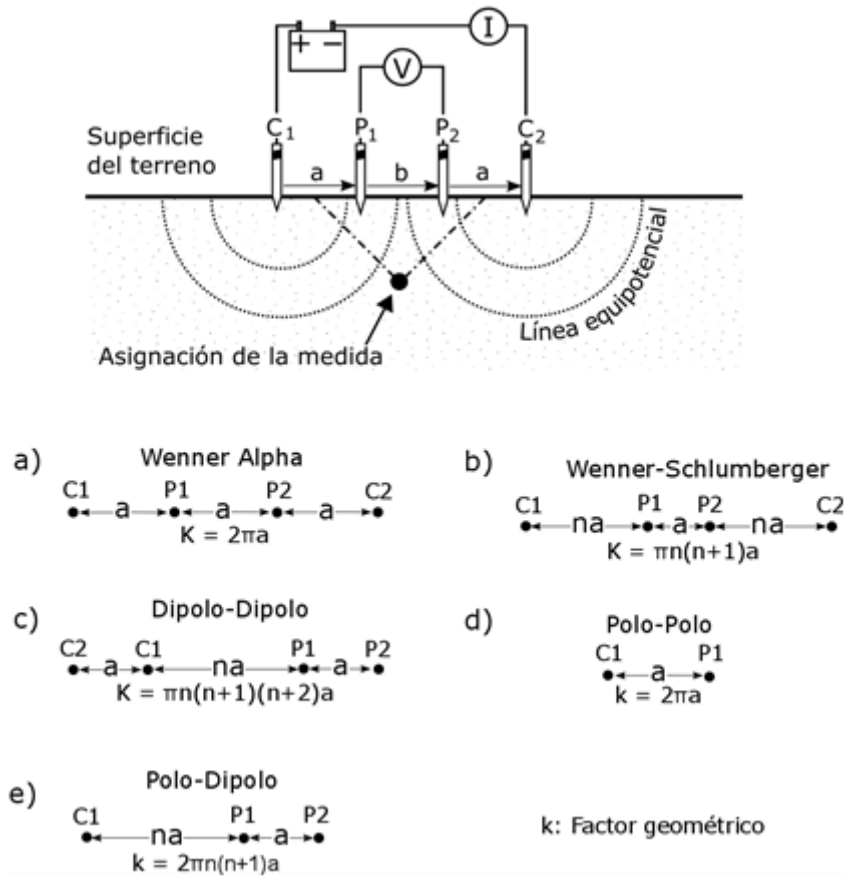


## 5. GEOFÍSICA.

### 5.1. Metodología y fundamentos de la tomografía eléctrica.

Los métodos eléctricos, y en concreto la Tomografía Eléctrica, pueden utilizarse en todos aquellos casos en los que exista un contraste de resistividades entre el objeto de estudio y sus alrededores, lo que permite (entre otras soluciones) estimar la profundidad de un acuífero, localizar zonas fracturadas, o distinguir entre unidades litológicas. La resistividad de las rocas del subsuelo está relacionada con diversos parámetros: los minerales contenidos, la porosidad, el fluido que rellena los poros, el grado de saturación de agua de la roca, la temperatura, etc.

El dispositivo básico de medida (parte superior de la Figura 5.1.1) se compone de dos electrodos a través de los cuales se inyecta una corriente de intensidad  $I$  al terreno (C1 y C2 en la figura), y dos electrodos en los que se mide la caída de potencial  $V$  (P1 y P2 en la figura). A partir de la intensidad de corriente  $I$  inyectada al terreno y el voltaje medido  $V$  se calcula un valor de resistividad aparente mediante la expresión  $\rho_a = k V/I$  donde  $k$  es un factor geométrico que depende de la disposición y distancia entre los electrodos. La medida de resistividad se asigna en el centro del dispositivo, a una profundidad que dependerá del tipo de dispositivo electródico utilizado. En la parte inferior de la Figura 5.1.1 se muestran los dispositivos más comunes junto con su factor geométrico. Los valores de resistividad calculados mediante esta expresión corresponden a la resistividad que mediría el mismo dispositivo electródico en un terreno homogéneo de resistencia equivalente. Para obtener la resistividad real del terreno a partir de la resistividad aparente es necesario invertir los datos de campo. En los métodos de inversión estándar 1D se supone que el subsuelo está formado por un modelo de capas horizontales en las que la resistividad es constante y solo varía de una capa a otra en profundidad; es el modelo utilizado por los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV). Las mediciones de los Perfiles Eléctricos (ERT) permiten utilizar modelos del subsuelo en 2D, donde la resistividad varía no solo con la profundidad, sino que también lo hace lateralmente; si bien se asume que la resistividad es constante en dirección perpendicular a la línea de medida (sección o corte del terreno). El uso de perfiles eléctricos 2D, permite por lo tanto estudiar áreas con una geología moderadamente compleja.



**Figura 5.1.1. Superior: esquema del dispositivo básico de medición en campo. I: Amperímetro. V: Voltímetro. Inferior: dispositivos comunes utilizados en campañas eléctricas y sus factores geométricos.**

En estas campañas se trata de ir muestreando la resistividad del subsuelo a diferentes niveles,  $n$ , en puntos cuya equidistancia depende del dispositivo electródico utilizado (Figura 2). Para llevarlas a cabo se utiliza un gran número de electrodos conectados mediante un cable multiconductor (cable con varios hilos conductores). En la Figura 5.1.2 se muestra un esquema típico de la forma de llevar a cabo las mediciones en 2D, con los electrodos dispuestos en un perfil según una línea recta.

Para representar los datos de la campaña 2D, se utiliza normalmente la pseudosección. La localización horizontal de un dato se establece en el punto medio del juego de electrodos utilizados para hacer la medida. La localización vertical del dato se sitúa a una profundidad proporcional a la separación de los electrodos de emisión de corriente. Otro método consiste en situar la posición vertical del dato en la profundidad media de investigación, o seudopropundidad del dispositivo empleado. El valor de la seudopropundidad está basado en los valores de sensibilidad o derivadas de Frechet para un semiespacio homogéneo. Puesto que este último tiene una base matemática, es el que normalmente se



emplea. No obstante, conviene enfatizar que la pseudosección es simplemente una manera de representación que proporciona una imagen aproximada de la distribución de resistividad del subsuelo, que puede estar distorsionada debido a que las isolíneas dependen del tipo de dispositivo empleado, así como de la verdadera resistividad del subsuelo. La pseudosección es útil como un medio de representar la resistividad aparente medida, y sirve como un modelo inicial para la interpretación cuantitativa. Sería un error utilizar la pseudosección como una representación final de la resistividad real del terreno (Figura 5.1.3).

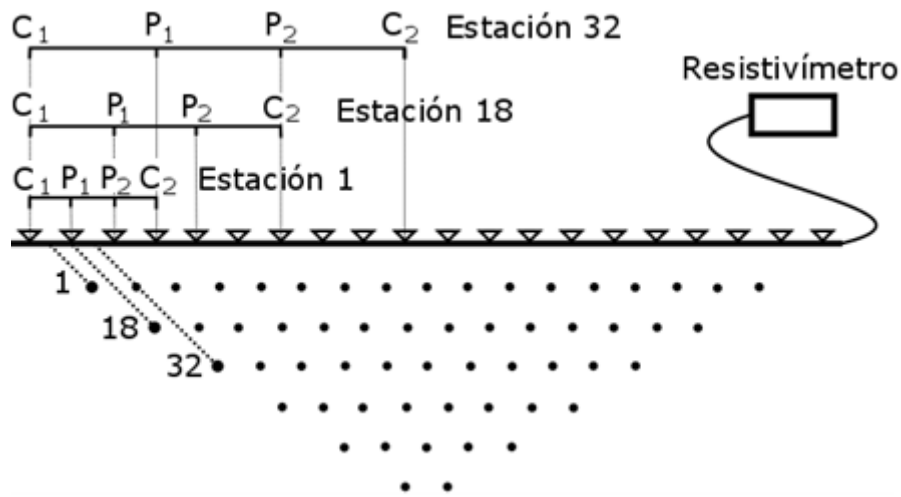


Figura 5.1.2. Disposición de electrodos y secuencia de medición para construir una pseudosección en una campaña eléctrica 2D.

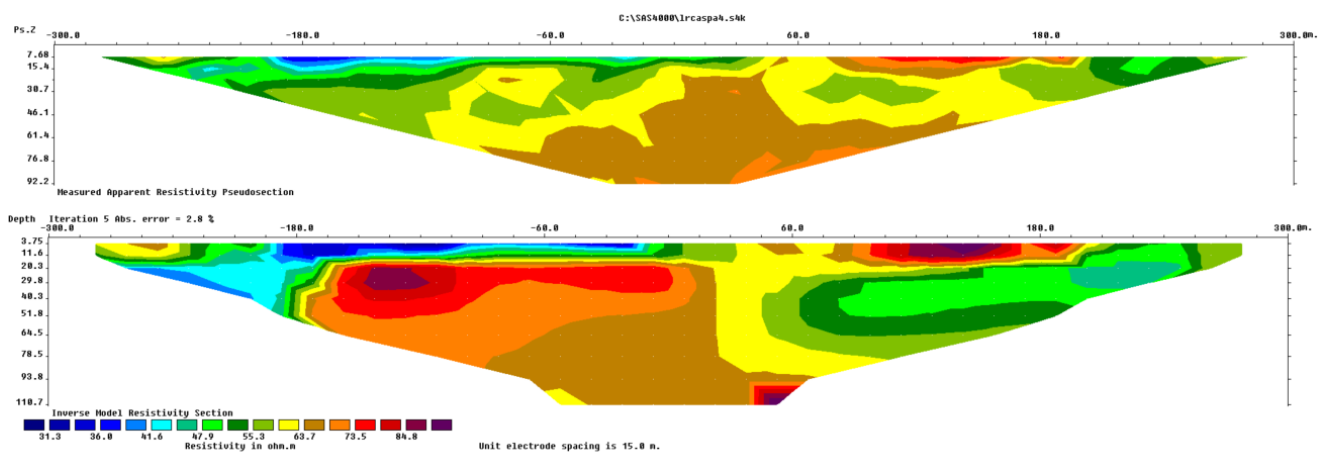


Figura 5.1.3. Ejemplo de diferencia entre pseudosección (parte superior) y modelo de resistividad obtenido tras la inversión de los datos (parte inferior).

El uso de diferentes dispositivos puede proporcionar para la misma estructura geológica formas diferentes en las pseudosecciones. Cada tipo de dispositivo tiene sus ventajas y sus desventajas, entre las características a tener en cuenta a la hora de elegir un dispositivo están: la sensibilidad del dispositivo a cambios laterales y/o verticales del subsuelo, la profundidad de investigación, la cobertura horizontal del dispositivo y la intensidad de la señal.

Los dispositivos más comúnmente empleados son (Figura 5.1.1): Wenner, Wenner-Schlumberger, Polo-Polo, Dipolo-Dipolo o Polo-Dipolo. El dispositivo Wenner es el más adecuado para investigar estructuras horizontales, es decir, cambios de resistividad con la profundidad en la vertical del centro del dispositivo y resistividad relativamente homogénea en la horizontal. Comparado con otros dispositivos permite una moderada profundidad de investigación con la mayor intensidad de señal, lo que puede ser un aspecto determinante en áreas de alto ruido de fondo. Una desventaja de este dispositivo es su relativamente pobre cobertura horizontal.

El dispositivo Wenner-Schlumberger es moderadamente sensible a estructuras verticales (sobre todo profundas) y horizontales (para menor profundidad). La profundidad de investigación de este dispositivo es alrededor de un 10% mayor que para el dispositivo Wenner y la intensidad de la señal es menor que la del dispositivo Wenner.

A la hora de realizar la inversión de los datos hay que tener en cuenta que la solución no es única: para los mismos datos medidos existen un amplio rango de modelos que pueden dar lugar a los mismos valores calculados de resistividad. En el caso de que las estructuras del subsuelo posean cambios graduales de resistividad el programa de inversión puede utilizar el algoritmo de inversión de *smoothnes constrain*, el cual trata de minimizar el cuadrado de las diferencias entre los valores de resistividad medidos y calculados. En los casos en que las estructuras presenten cambios bruscos de resistividad (estructuras casi homogéneas internamente y con límites netos), el algoritmo de inversión apropiado es el *robust constrain*, que trata de minimizar al valor absoluto de las diferencias entre los valores medidos y calculados de resistividad.

El equipo de Tomografía Eléctrica empleado en todos los casos ha sido el SAS4000 de la firma sueca ABEM utilizando el sistema multielectrónico Lund Imaging System. En este sistema es posible implantar hasta 60 electrodos, habiéndose utilizado en esta campaña los dispositivos Wenner y Wenner-Schlumberger. La inversión de los datos de campo y la obtención de los perfiles de resistividad se ha llevado a cabo con el programa RES2DINV de M.H. Loke



Figura 5.1.5. Imagen del equipo de resistividad empleado en la campaña

## 5.2. Trabajos realizados en el cauce del río Oja.

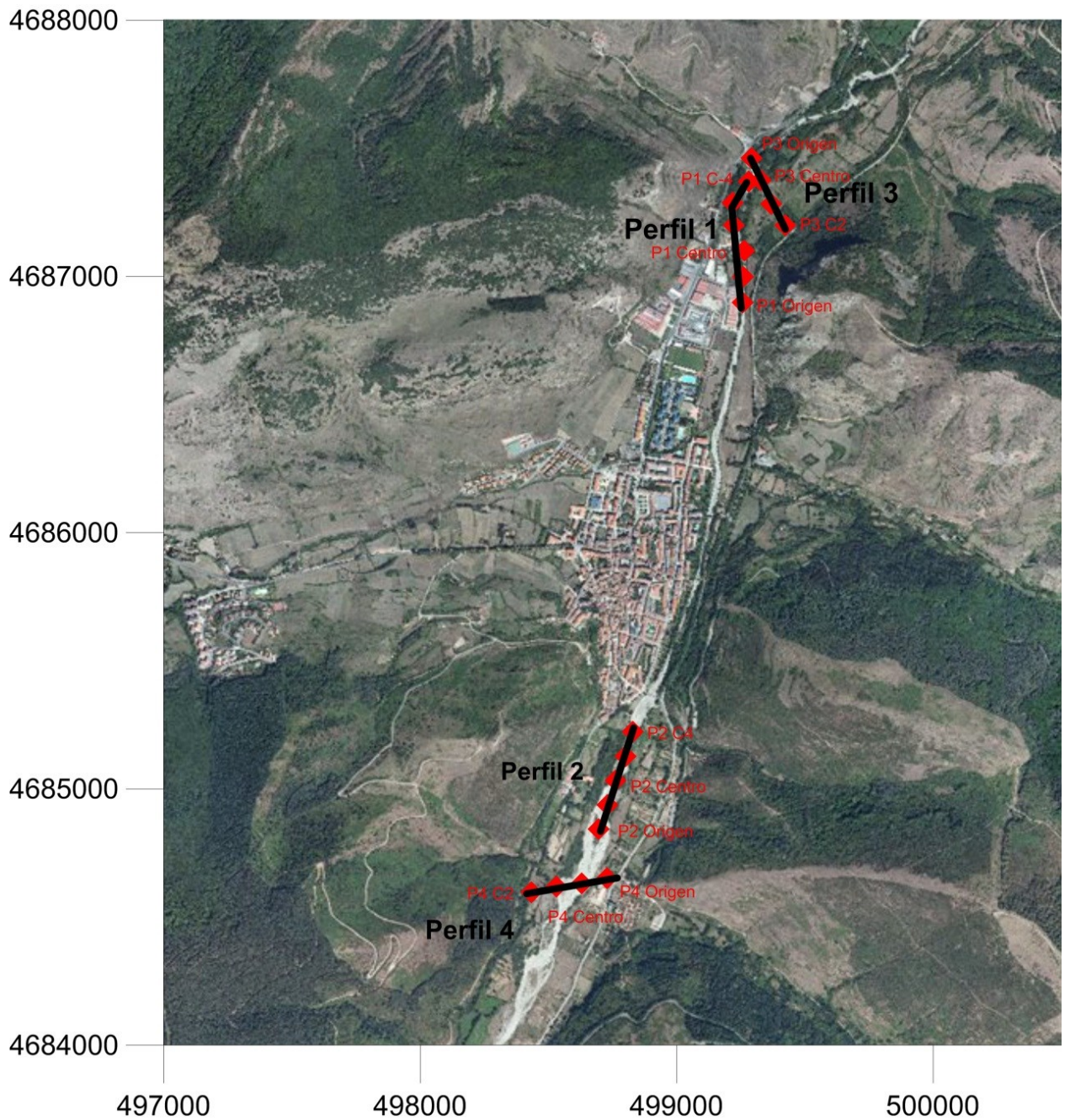
En la zona de Ezcaray se han medido cuatro perfiles, todos ellos desplegados sobre el cauce del río Oja, aprovechando su falta de agua. Sus características se indican en la tabla 5.2.1 y su posición en la figura 5.2.1.

Tabla 5.2.1. Características de los perfiles de tomografía realizados en el cauce del río Oja

| Perfil   | x      | y       | Z   | Punto    | Dispositivo          | Espaciado<br>electrodos | Longitud<br>(m) |
|----------|--------|---------|-----|----------|----------------------|-------------------------|-----------------|
| perfil 1 | 499257 | 4686898 | 800 | ORIGEN   | Wenner- Schlumberger | 5                       | 500             |
|          | 499259 | 4686999 | 798 | P1C-1    |                      |                         |                 |
|          | 499256 | 4687102 | 795 | P1CENTRO |                      |                         |                 |
|          | 499223 | 4687198 | 795 | P1C-2    |                      |                         |                 |

| Perfil   | x      | y       | Z   | Punto       | Dispositivo | Espaciado<br>electrodos | Longitud<br>(m) |
|----------|--------|---------|-----|-------------|-------------|-------------------------|-----------------|
|          | 499218 | 4687287 | 797 | P1C-3       |             |                         |                 |
|          | 499281 | 4687370 | 793 | P1C-4       |             |                         |                 |
| Perfil 2 | 498696 | 4684843 | 826 | P2-ORIGEN   | Wenner      | 5                       | 400             |
|          | 498729 | 4684937 | 828 | P2-C1       |             |                         |                 |
|          | 498761 | 4685033 | 828 | P2-CENTRO   |             |                         |                 |
|          | 498800 | 4685128 | 828 | P2-C2       |             |                         |                 |
|          | 498829 | 4685223 | 824 | P2-C3       |             |                         |                 |
| Perfil 3 | 499292 | 4687462 | 798 | P3 - ORIGEN | Wenner      | 5                       | 300             |
|          | 499327 | 4687375 | 797 | P3-CENTRO   |             |                         |                 |
|          | 499368 | 4687283 | 797 | P3-C1       |             |                         |                 |
|          | 499424 | 4687200 | 800 | P3-C2       |             |                         |                 |
| Perfil 4 | 498728 | 4684651 | 828 | P4 -ORIGEN  | Wenner      | 5                       | 300             |
|          | 498629 | 4684632 | 827 | P4-CENTRO   |             |                         |                 |
|          | 498531 | 4684619 | 829 | P4-C1       |             |                         |                 |
|          | 498433 | 4684597 | 831 | P4-C2       |             |                         |                 |





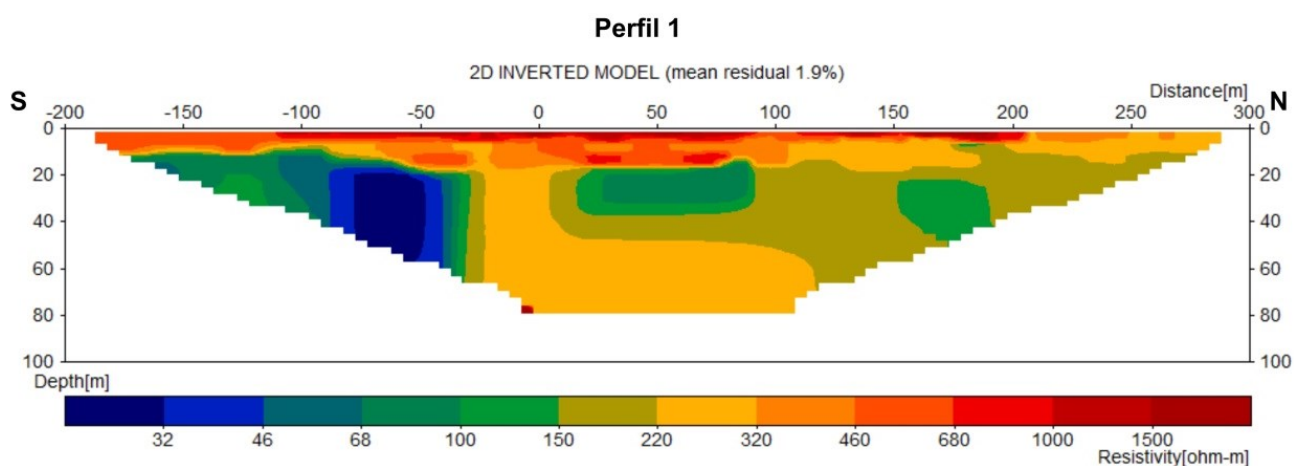
**Figura 5.2.1. Posición de los perfiles sobre foto aérea procedente del visor Iberpix del IGN (Coordenadas UTM Huso 30N, ETRS89)**

Los cuatro perfiles se han medido con un espaciado de 5 metros entre electrodos y con dispositivo Wenner excepto el perfil 1 que se ha medido con dispositivo Wenner-Schlumberger.

Los perfiles se han interpretado empleando los mismos parámetros de inversión, y se han representado con la misma paleta de color para poder compararlos.

## Perfil 1.

Se ha medido al norte de la población con dirección sur-norte. Su posición se muestra en la figura 4 y su interpretación en la figura 5.2.2.



**Figura 5.2.2. Resultado de la inversión del Perfil 1.**

Este perfil comienza a la salida de la población de Ezcaray y sigue el cauce del río en dirección norte hacia la población de Ojastro. En el perfil se observa un fuerte resistivo superficial que se asocia al relleno del cauce, compuesto de grandes bolos. Este resistivo aumenta su espesor, alcanzando casi los 20 m hacia el centro del perfil (aproximadamente entre las posiciones -50 y 100 del perfil). El espesor de este nivel se adelgaza hacia el norte, disminuyendo su resistividad hacia el final del perfil, según se aproxima al manantial que existe antes de Ojastro.

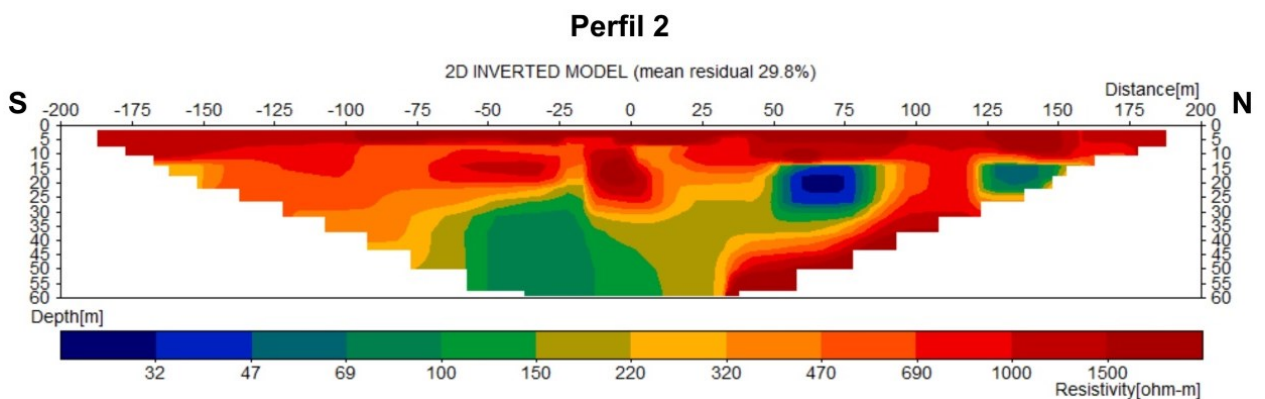
Por debajo de este nivel resistivo se observan dos ambientes; hacia el sur claramente conductor, representado por un nivel de baja resistividad relativa localizado bajo la posición -50. Desde la posición -25 y hacia el norte se observa un nivel más resistivo, con un núcleo algo más conductor que parece tener continuidad a lo largo del perfil hacia el norte. Este cambio podría estar asociado al tránsito entre el sustrato calizo al sur del perfil y el sustrato conglomerático en el resto.

Se podría interpretar que el nivel resistivo superficial correspondería con el tramo aluvial seco. Los niveles conductores por debajo indicarían niveles con agua o con más presencia de arcilla. Según este modelo el sustrato calizo es más conductor que los conglomerados y de mayor continuidad en profundidad.

## Perfil 2

Este perfil está medido al sur de la población de Ezcaray, figura 5.2.3. Comienza aguas arriba y llega hasta unos 100 m del puente romano localizado a la entrada

de la población. Su centro se localiza en las proximidades de una zona que se piensa pueda existir de umbral de entrada de agua. Todo él se ha dispuesto a lo largo del cauce del río Oja. Este perfil, figura 5.2.3, presenta un alto error de ajuste, muy superior al del perfil anterior, indicación de un mayor nivel de ruido durante su medida. En él se distingue el nivel resistivo superficial con mayor continuidad que en el perfil 1; al sur del perfil muestra un mayor espesor de estos materiales, aunque puede ser también un efecto de borde. En la parte central parece que estos materiales alcanzan hasta 30 de espesor.



**Figura 5.2.3. Resultado de la inversión del Perfil 2.**

Por debajo del nivel resistivo superficial se observa, como en el perfil anterior, un nivel más conductor; en este conductor parece que no se ha alcanzado su muro entre las posiciones -50 a 25, y muestra una fuerte anomalía conductora entre las posiciones 50 y 75 con un espesor de unos 25 m. Todo ello en las proximidades del centro del perfil donde se piensa pueda situarse la zona de umbral.

El sustrato en este perfil es diferente al del perfil 1, situándose sobre materiales cámbricos. Su modelo de interpretación es el mismo que en el perfil anterior, asociando el nivel resistivo a materiales secos y el conductor a niveles con agua.

### Perfil 3

Este es un perfil transversal al río con orientación oeste-este, situado al norte del perfil 1, figura 4. Este perfil realmente se ha medido en dos tramos independientes que constituyen los perfiles 3\_1 y 3\_2. El primero parte del oeste desde la zona donde se encuentra una fábrica de muebles; por problemas logísticos no se ha dispuesto el primer tramo de cable, por eso no hay valores entre las posiciones -100 y -200. El segundo perfil ya situado en el cauce, se ha medido sin el último tramo de cable, por eso faltan valores entre las posiciones



100 y 200. En la figura 5.2.4. se muestran los dos perfiles y su situación entre ellos.

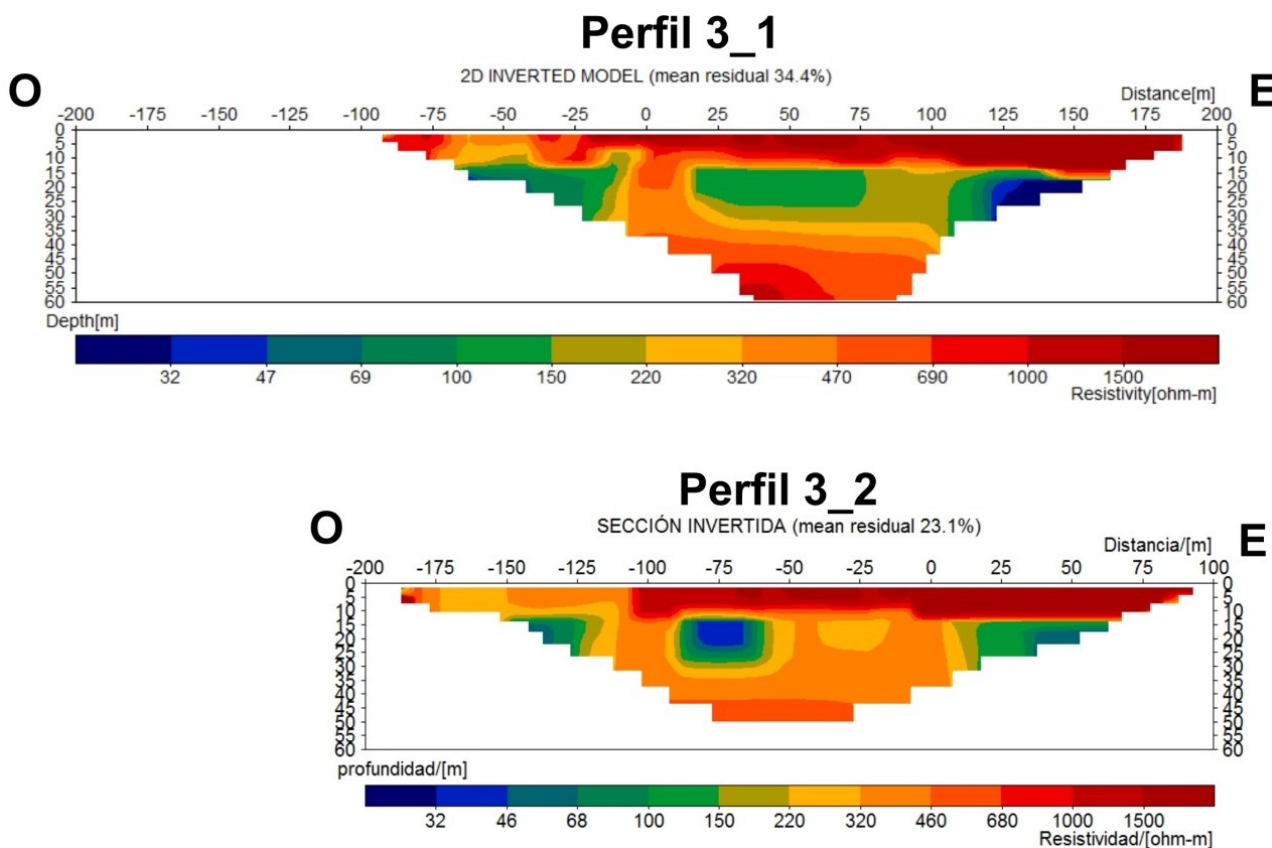


Figura 5.2.4. Resultado de la inversión de los tramos que constituyen el perfil 3.

Ambos perfiles coinciden en su parte central y como se aprecia en la figura 5.2.4 muestran una interpretación muy similar. Se manifiesta el nivel resistivo asociado en principio al aluvial seco con mayor potencia hacia el este, alcanzando los 10-15 m de espesor. En los perfiles se muestra como este nivel resistivo parece que se va amortiguando hacia el oeste, según se aproxima al manantial existente en esa zona. Por debajo del nivel resistivo y a lo largo de los dos perfiles se observa la existencia de un nivel más conductor (¿presencia de agua?) que alcanza hasta una profundidad de unos 40 m, mostrando por debajo un sustrato resistivo.

#### Perfil 4

Este perfil es el más meridional de toda la campaña del río Oja y se localiza al sur del anterior, figura 4; se ha medido con orientación este a oeste, cruzando el río. Este perfil muestra las mismas características que el perfil 2, figura 5.2.5. El resistivo superficial se observa a lo largo de todo el perfil, alcanzando en algunos tramos los 20 m de espesor. Por debajo se vuelve a observar la presencia de materiales más conductores. En este perfil destaca la presencia del fuerte resistivo que se observa entre las posiciones 35 y 100; este resistivo puede



atribuirse a la presencia de una zona de río antigua, con acumulación de materiales más resistentes.

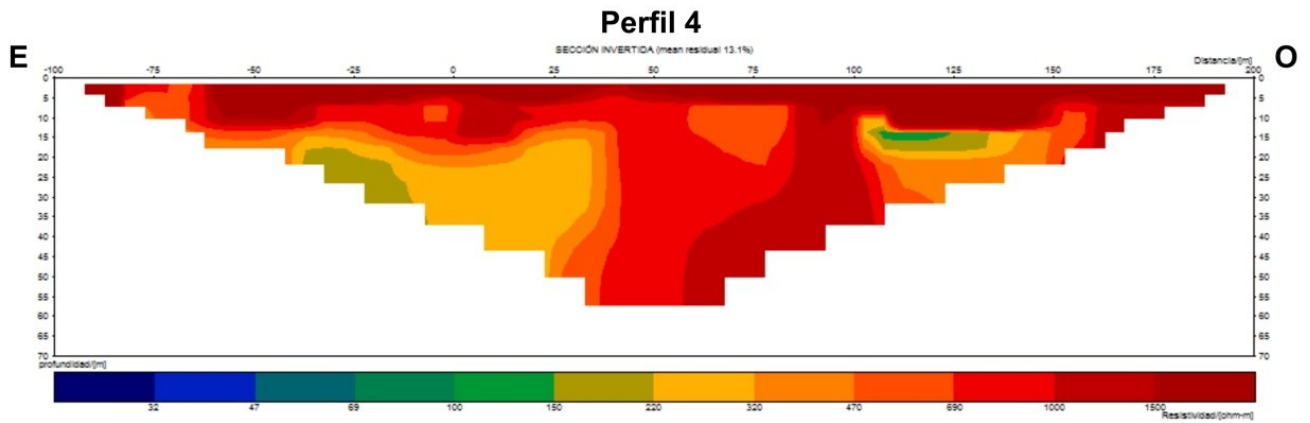


Figura 5.2.5. Resultado de la inversión del Perfil 4.



Figura 5.2.6 Línea de cable y varillas en el cauce del río Oja

### 5.3. Perfiles medidos en la laguna de Anguta o de La Dehesa

En la zona de la Laguna de la Dehesa se han medido dos perfiles eléctricos perpendiculares, con centro en el borde de la laguna (Figura 5.3.1).



Figura 5.3.1. Posición de los perfiles medidos en la Laguna de la Dehesa. Imagen de fondo procedente del servicio Iberpix del IGN. Coordenadas UTM WGS84 Huso 30N

**Tabla 5.3.1. Características de los perfiles realizados en la Laguna de la Dehesa.**

| Perfil   | x      | y       | z    | Punto<br>(distancia en<br>m) | Dispositivo | Espaciado<br>(m) | Longitud<br>(m) |
|----------|--------|---------|------|------------------------------|-------------|------------------|-----------------|
| Perfil 7 | 492804 | 4686396 | 1230 | p7origen (-200)              | Wenner      | 5 m              | 400 m           |
|          | 492787 | 4686298 | 1232 | p7C1 (-100)                  |             |                  |                 |
|          | 492773 | 4686201 | 1226 | centro (0)                   |             |                  |                 |
|          | 492751 | 4686102 | 1230 | p7C2 (100)                   |             |                  |                 |
|          | 492737 | 4686000 | 1229 | P7final (200)                |             |                  |                 |
| Perfil 8 | 492963 | 4686153 | 1235 | p8origen (-200)              | Wenner      | 5 m              | 400 m           |
|          | 492863 | 4686175 | 1236 | p8c1 (-100)                  |             |                  |                 |
|          | 492773 | 4686201 | 1226 | centro (0)                   |             |                  |                 |
|          | 492671 | 4686225 | 1236 | p8c2 (100)                   |             |                  |                 |
|          | 492577 | 4686294 | 1238 | p8c3final (200)              |             |                  |                 |

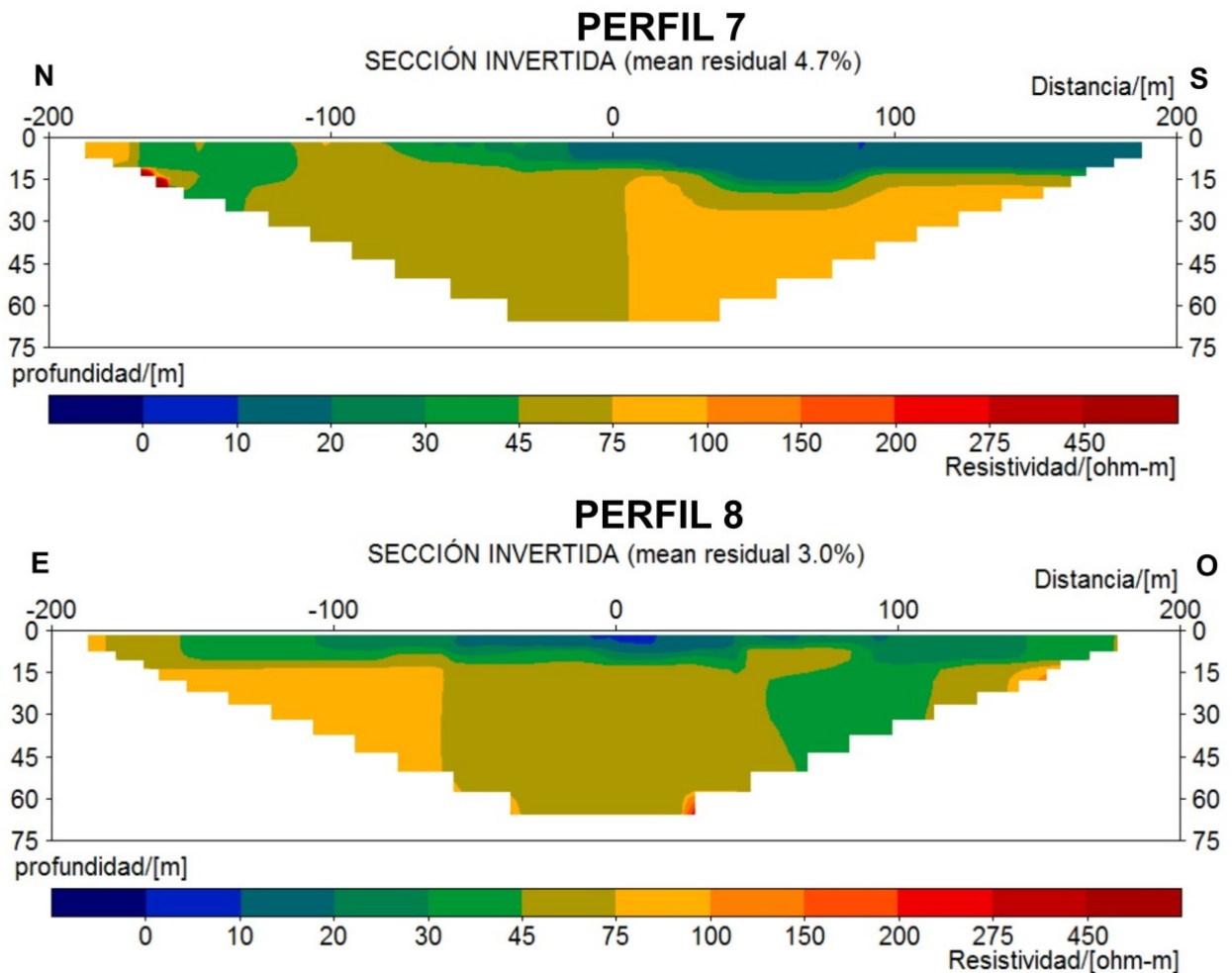
Los perfiles se han medido con un espaciado de 5 metros entre electrodos y con dispositivo Wenner. En la tabla 5.3.1 se indican sus características.

Los perfiles se han interpretado empleando los mismos parámetros de inversión y se han representado con la misma paleta de color para poder compararlos. Esta paleta es diferente a la utilizada en los perfiles del Rio Oja.

#### *Interpretación de los perfiles*

En la figura 5.3.2 se muestra la interpretación obtenida de los dos perfiles. En ella se indica la orientación de los mismos. Los dos perfiles son perpendiculares y se cruzan en su centro, como se observa en la figura 5.3.1, localizándose el punto de cruce sobre el extremo noroeste de la laguna.





**Figura 5.3.2. Resultado de la inversión de los dos perfiles realizados en la Laguna de la Dehesa.**

Observando los dos perfiles destaca la existencia de un tramo conductor (resistividad inferior a  $45 \Omega \cdot m$ ), que se deposita sobre materiales más resistivos, dispuestos en bloques verticales con resistividad creciente hacia el E y S de la zona.

El bloque conductor superficial parece que se hace más potente hacia el final del perfil 7, alcanzando su mayor espesor en el tramo entre las ubicaciones 30 y 100, donde supera los 15 m. En este perfil, desde su comienzo hasta la posición -100 se observa un tramo conductor que no tiene el mismo carácter que el superficial anteriormente comentado; este conductor tiene continuidad en profundidad y está entre un fuerte resistivo que se ve al norte y el resistivo que continua por debajo del conductor superficial hacia el sur.

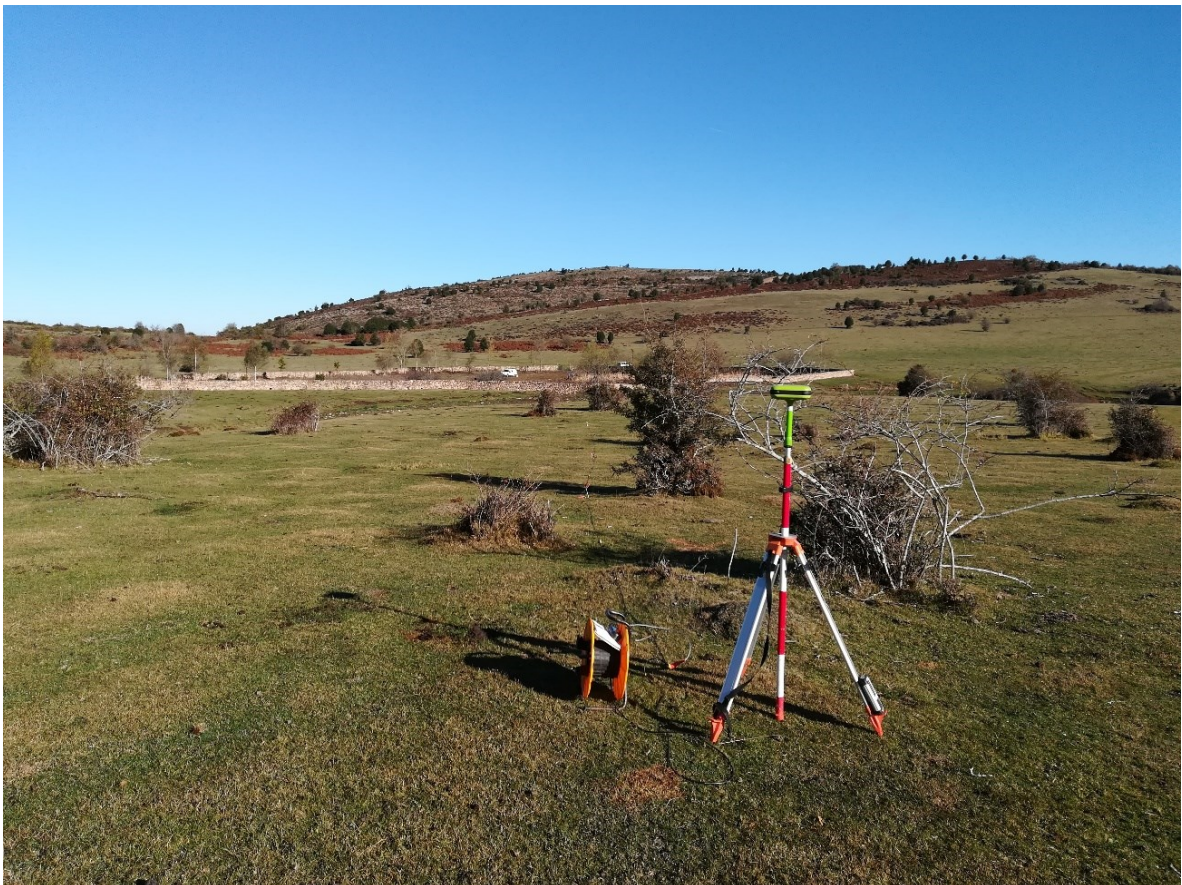
En el perfil 8 el conductor superficial se muestra en todo el perfil, si bien los valores más conductores los alcanza hacia el centro del perfil, coincidiendo con la localización de la laguna. Bajo la posición 100, hacia el oeste del perfil, se observa un conductor con el mismo carácter que es observado al comienzo del

perfil anterior, con continuidad en profundidad y entre el resistivo de basamento. El conductor superficial parece que se va perdiendo hacia el este, al comienzo del perfil.

### *Conclusiones.*

Estos perfiles cartografían muy bien una zona conductora superficial, que se piensa asociada a la existencia de niveles saturados, coincidentes con la laguna, y que se desarrollan principalmente en el sureste de la misma, correspondiendo con la ubicación del arroyo de la dehesa.

Por debajo de este conductor se observa una dinámica de bloques, el más conductor al comienzo del perfil 7 y al final del 8 (Norte y oeste de la zona lagunar), y que aumentan su resistividad hacia el sur y este de la zona. En el perfil 7, al norte de la zona parece vislumbrarse un fuerte resistivo en profundidad.



**Figura 5.3.2. Extremo perfil realizado. Al fondo la zona vallada de la laguna**

#### 5.4. Conclusiones.

A la vista de los perfiles interpretados podemos concluir que en todos ellos se observa la presencia de un fuerte resistivo superficial con valores por encima de los 500  $\Omega$ .m. Este nivel varía su espesor a lo largo de los perfiles, siendo en la parte sur del perfil 2 y la parte este del perfil 4 donde alcanza valores entre 20 y 35 m.

Por debajo de este nivel resistivo en todos los perfiles se observa la presencia de un nivel más conductor, por debajo de los 150  $\Omega$ .m., de forma tabular y con espesores del orden de 20 m, en los perfiles 1 y 3 y más heterogéneo en los perfiles 2 y 4; este nivel muestra en algunas zonas valores muy conductores, color azul en los perfiles y se observa situado en muchos casos dentro un medio más resistivo (150 a 500  $\Omega$ .m).

El sustrato en los perfiles presenta un carácter muy resistivo.

Los datos disponibles de la zona son los siguientes:

El basamento en los perfiles 1 y 3 es distinto al de los perfiles 2 y 4. En los perfiles 1 y 3 el aluvial se asienta sobre conglomerados y calizas. Mientras que los perfiles 2 y 4 presentan un carácter más heterogéneo y el aluvial se asienta sobre materiales cámbricos.

Cerca del punto 0 del perfil 4 se localiza un sondeo de unos 30 m de profundidad, perforado todo él, en aluvial.

El perfil 1 finaliza en una zona de transición entre conglomerados y calizas, y próximo a una zona de manantial con agua en el momento de la medición.

Basándonos en estos datos se asocia el nivel resistivo superficial al aluvial seco, con poca o nula presencia de agua, o sin continuidad en la formación. Esta hipótesis conlleva que este resistivo no refleja el verdadero espesor del aluvial, sino solo la parte seca, y por lo tanto se supone un mayor espesor del mismo que el que se pensaba a priori.

El nivel más conductor correspondería a niveles saturados, bien del aluvial o bien del material sobre el que se encuentra. También la presencia de mayores niveles arcillosos podría influir en estos valores de resistividad, pero estos contrastes en general no se asocian a cambios de formación. En el caso del perfil 1 sí parece observarse la transición de conglomerados a calizas, reflejada por el cambio de resistividad que se produce en la posición -25 del perfil y que se mantiene en todo el final sur del perfil. Los conductores en los perfiles 2 y 4 tienen un aspecto más local y en algún caso sin que se alcance su muro, lo que puede indicar zonas con agua que proceden de mayor profundidad. También pueden indicar presencia de canales con agua dentro de la formación.

Como ya se ha dicho, la inversión de datos geofísicos no tiene solución única, la geofísica es una buena herramienta para validar modelos más que para generarlos. El modelo de interpretación que se ha adoptado en este informe es uno de los posibles y se basa en los datos disponibles en este momento. Cualquier nuevo dato puede provocar la reconsideración del mismo, siendo los datos geofísicos válidos en todo momento.





## **6. CLIMATOLOGÍA**



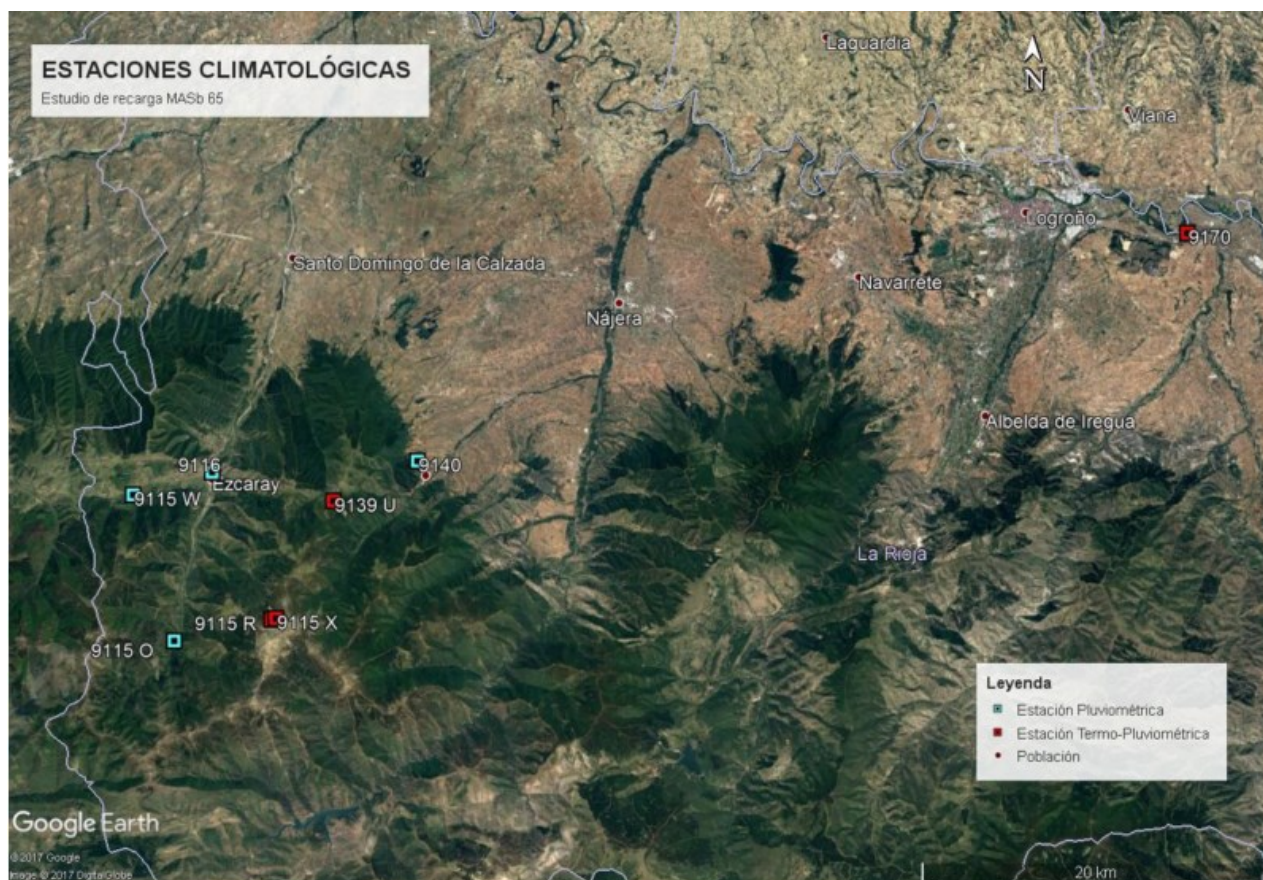
## 6. CLIMATOLOGÍA

### 6.1. Información meteorológica

La información meteorológica para el periodo de estudio (01/10/1980 – 30/09/2017) fue suministrada por la AEMET. Esta información corresponde a 4 estaciones termo-pluviométricas y 4 estaciones pluviométricas (Tabla 6.1-1, Figura 6.1-1).

**Tabla 6.1-1. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.**

| Código estación | Nombre estación                      | Cota (m s.n.m.) | X UTM (ETRS89) | Y UTM (ETRS89) | TIPO                |
|-----------------|--------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|---------------------|
| 9116            | Ezcaray (Iberduero)                  | 813             | 498937         | 4686446        | Pluviométrica       |
| 9115W           | Valgañón                             | 927             | 494381         | 4685152        | Pluviométrica       |
| 9139U           | Pazuengos                            | 1162            | 505918         | 4684813        | Termo-Pluviométrica |
| 9115R           | Ezcaray (Valdezcaray)                | 1620            | 502373         | 4678026        | Termo-Pluviométrica |
| 9115X           | Valdezcaray                          | 1630            | 502612         | 4678090        | Termo-Pluviométrica |
| 9115O           | Posadas Central (Iberduero)          | 965             | 496758         | 4676792        | Pluviométrica       |
| 9140            | San Millan de la Cogolla (Iberduero) | 728             | 510745         | 4687102        | Pluviométrica       |
| 9170            | Logroño-Agoncillo                    | 353             | 555002         | 4700205        | Termo-Pluviométrica |



**Figura 6.1-1. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.**

## 6.2. Análisis de correlación

La serie de precipitación que se utilizó en la modelación del Balance Hídrico fue la correspondiente a la estación 9115 W, debidamente rellena. Sólo dos estaciones con registros de precipitaciones se encuentran en las inmediaciones de la zona de estudio: 9116 “Ezcaray” y 9115W “Valgañón” (Fig. 6.1-1). Sin embargo, sólo la serie de la estación 9115 W ofrece correlaciones aceptables con las series de las restantes estaciones y existen suficientes datos como para rellenarla con una garantía adecuada (Tabla 6.2-1). Las estaciones utilizadas para el relleno de la serie de la 9115 W fueron, en este orden: 9115R “Ezcaray-Valdezcaray”; 9140 “San Millán de la Cogolla”; 9115X “Valdezcaray”; 9115O “Posadas Central” y 9139 “Pazuengos”. Finalmente, se realizó un estudio de correlación Precipitación-Cota y Precipitación-Latitud, para obtener un factor de ponderación de la serie 9115W, dado que la tanto la cota de la estación (927 m s.n.m.) difería de la cota media de la zona de estudio (1200 m s.n.m.), como la latitud de la estación (42°19'07") difería de la latitud media del bloque carbonatado (42° 20' 3").

**Tabla 6.2-1. Correlaciones de las series de precipitación diaria.**

|       | 9116 | 9115W | 9139U | 9115R | 9115X | 9115O | 9140  | 9170  |
|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 9116  | 1    | NC    | 0,298 | 0,449 | NC    | 0,586 | 0,347 | 0,324 |
| 9115W |      | 1     | 0,651 | 0,751 | 0,728 | 0,721 | 0,737 | 0,544 |
| 9139U |      |       | 1     | 0,594 | NC    | 0,385 | 0,506 | 0,364 |
| 9115R |      |       |       | 1     | NC    | 0,735 | 0,605 | 0,497 |
| 9115X |      |       |       |       | 1     | NC    | 0,669 | 0,512 |
| 9115O |      |       |       |       |       | 1     | 0,449 | 0,422 |
| 9140  |      |       |       |       |       |       | 1     | 0,565 |
| 9170  |      |       |       |       |       |       |       | 1     |

La serie de temperatura que se utilizó en la modelación del Balance Hídrico fue la correspondiente a la estación 9115X debidamente rellena. Se debe observar que la estación 9139U “Pazuengos” se situaba más cerca de la zona de estudio, así como la estación 9115R “Ezcaray (Valdezcaray)” (Figura 6.1-1), y ofrecían coeficientes de correlaciones algo más altos que los de la 9115X “Valdezcaray” (Tabla 6.2-2). Sin embargo, la serie de la estación 9139U sólo llega hasta el 30/09/2002 y la de 9115R hasta el 31/12/2008. Esto hace que prácticamente no se tengan valores en el período de calibración, por lo que, al rellenar la serie con los datos del resto de estaciones, quedarán días sin completar. Por ello, se consideró más riguroso para la modelación, seleccionar la serie de la estación 9115X, utilizando para rellenarla los datos de la estación 9170 “Logroño-Agoncillo”. Finalmente, se realizó un estudio de correlación Temperatura-Cota, para obtener un factor de ponderación de la serie 9115X, dado que la cota de la

estación (1630 m s.n.m.) difería de la cota media de la zona de estudio (1200 m s.n.m.).

**Tabla 6.2-2. Correlaciones de las series de temperatura diaria.**

|       | 9139U | 9115R | 9115X | 9170  |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 9139U | 1     | 0,935 | NC    | 0,922 |
| 9115R |       | 1     | NC    | 0,908 |
| 9115X |       |       | 1     | 0,897 |
| 9170  |       |       |       | 1     |

La precipitación nival no se ha tenido en cuenta en este estudio, debido a que no se disponía de datos.

### 6.3. Identificación de ciclos climáticos y tipificación climática.

Una vez completada la serie de precipitaciones de la estación 9115 W se ha adoptado como representativa de la zona de estudio y a partir de ésta, se identificaron los ciclos climáticos interanuales húmedos y secos, así como se tipificaron hidroclimáticamente los años. Para ello se siguió la siguiente metodología:

- La identificación de ciclos climáticos húmedos y secos se basó en la desviación acumulada respecto a la media de la precipitación anual.
- La tipificación climática de los años se basó en la frecuencia acumulada de la precipitación anual:

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>Año muy seco</b>   | $P_{anual} < P_{15\% \text{ de probabilidad de ocurrencia}}$  |
| <b>Año seco</b>       | $P_{15\% \text{ de probabilidad de ocurrencia}} < P_{anual} < P_{35\% \text{ de probabilidad de ocurrencia}}$ |
| <b>Año medio</b>      | $P_{35\% \text{ de probabilidad de ocurrencia}} < P_{anual} < P_{65\% \text{ de probabilidad de ocurrencia}}$ |
| <b>Año húmedo</b>     | $P_{65\% \text{ de probabilidad de ocurrencia}} < P_{anual} < P_{85\% \text{ de probabilidad de ocurrencia}}$ |
| <b>Año muy húmedo</b> | $P_{85\% \text{ de probabilidad de ocurrencia}} < P_{anual}$  |

El análisis se ha realizado considerando la serie de precipitaciones anuales (Fig. 6.3-1). La identificación de ciclos climáticos interanuales permite contextualizar la recarga natural del acuífero. Esto tiene especial importancia cuando se trata, como en el presente estudio, de analizar la satisfacción de la demanda, ya que permite realizar matizaciones en el análisis.

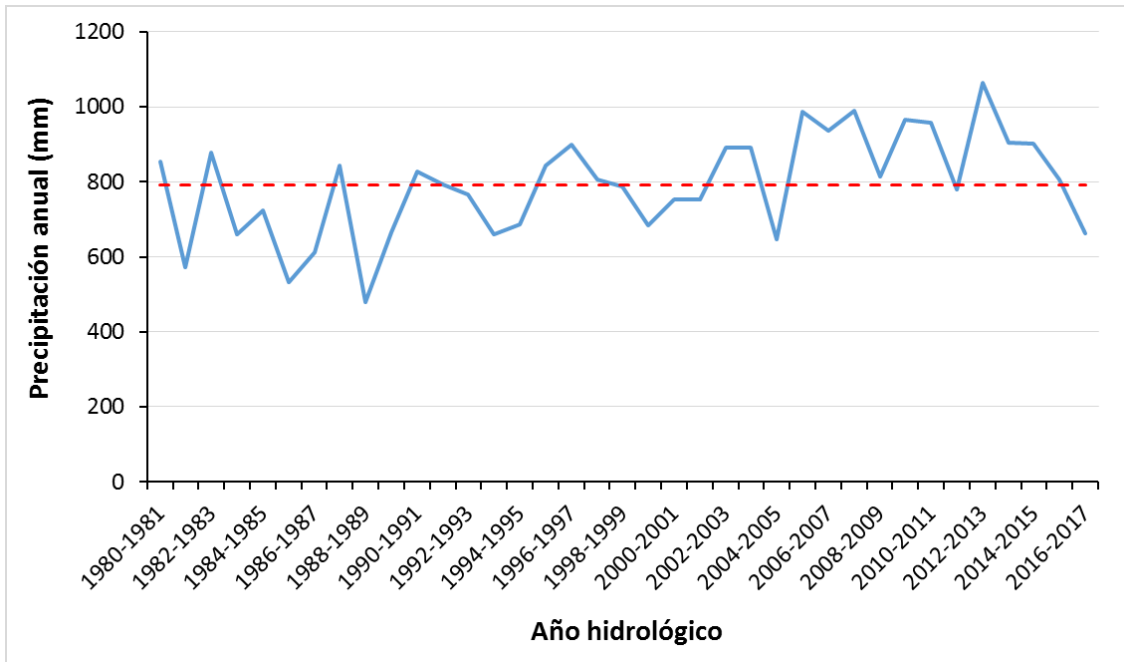


Figura 6.3-1. Precipitación anual en el período de estudio 1980/1981-2016/2017.

Al analizar la sucesión de ciclos climáticos se puede observar que existe uno seco en el período comprendido entre los años hidrológicos 1981/1982 y 1994/1995, y uno húmedo entre los años 2002/2003 y 2015/2016. Entre los años 1995/1996 y 2001/2002 se aprecia un período en el que no existe una tendencia hidroclimática definida (figura 6.3.2).

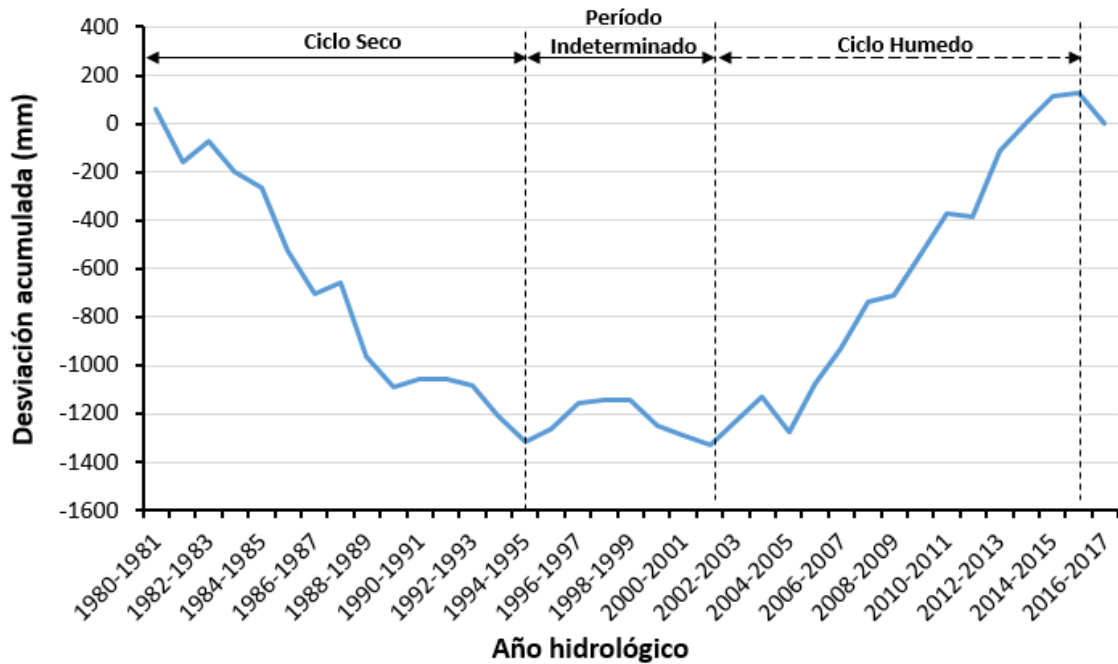


Figura 6.2-2. Ciclos de precipitación anual en el período de estudio 1980/1981-2016/2017.

La curva de frecuencia acumulada de las precipitaciones anuales (Figura 6.3-3) permite definir los rangos de precipitación anual (Tabla 6.3-1) para la tipificación de los años de la serie.

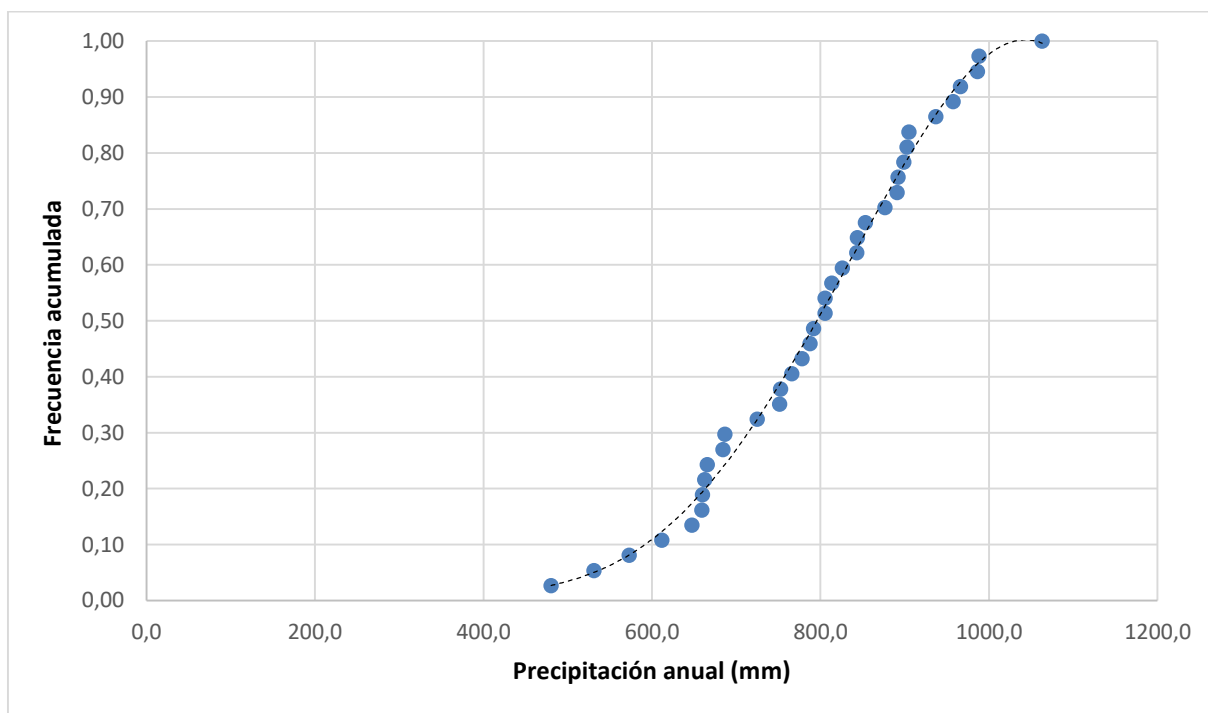


Figura 6.3-3. Curva de frecuencia acumulada de las precipitaciones anuales.

Tabla 6.3-1. Tipificación hidroclimática de años: rangos de precipitación anual.

| Tipo de año según las precipitaciones: |            |  |
|--|------------|--|
| 0-15%                                  | Muy seco   | $P_{\text{anual}} < 653 \text{ mm}$                  |
| 15-35%                                 | Seco       | $653 \text{ mm} < P_{\text{anual}} < 752 \text{ mm}$ |
| 35-65%                                 | Normal     | $752 \text{ mm} < P_{\text{anual}} < 848 \text{ mm}$ |
| 65-85%                                 | Húmedo     | $848 \text{ mm} < P_{\text{anual}} < 921 \text{ mm}$ |
| 85-100%                                | Muy húmedo | $921 \text{ mm} < P_{\text{anual}}$                  |

La tipificación de años permite identificar dos extensos ciclos, uno seco y otro húmedo, y a su vez, también permite identificar ocurrencias de años extremos secos y húmedos (Tabla 6.3-2).



Tabla 6.3-2. Período de estudio: Ciclos hidroclimáticos interanuales y años tipo.

| <b>Años hidrológicos</b> | <b>Precipitación anual (mm)</b> | <b>Tipo de año</b> | <b>Ciclos</b>    |
|--------------------------|---------------------------------|--------------------|------------------|
| 1980-1981                | 853,3                           | Año húmedo         | Ciclo indefinido |
| 1981-1982                | 572,9                           | Año muy seco       | Ciclo seco       |
| 1982-1983                | 876,7                           | Año húmedo         | Ciclo seco       |
| 1983-1984                | 659,9                           | Año seco           | Ciclo seco       |
| 1984-1985                | 725,0                           | Año seco           | Ciclo seco       |
| 1985-1986                | 531,1                           | Año muy seco       | Ciclo seco       |
| 1986-1987                | 611,7                           | Año muy seco       | Ciclo seco       |
| 1987-1988                | 843,9                           | Año medio          | Ciclo seco       |
| 1988-1989                | 480,1                           | Año muy seco       | Ciclo seco       |
| 1989-1990                | 665,7                           | Año seco           | Ciclo seco       |
| 1990-1991                | 826,1                           | Año medio          | Ciclo seco       |
| 1991-1992                | 791,9                           | Año medio          | Ciclo seco       |
| 1992-1993                | 766,2                           | Año medio          | Ciclo seco       |
| 1993-1994                | 659,4                           | Año seco           | Ciclo seco       |
| 1994-1995                | 686,6                           | Año seco           | Ciclo seco       |
| 1995-1996                | 843,3                           | Año medio          | Ciclo indefinido |
| 1996-1997                | 898,9                           | Año húmedo         | Ciclo indefinido |
| 1997-1998                | 805,4                           | Año medio          | Ciclo indefinido |
| 1998-1999                | 787,8                           | Año medio          | Ciclo indefinido |
| 1999-2000                | 684,2                           | Año seco           | Ciclo indefinido |
| 2000-2001                | 752,6                           | Año medio          | Ciclo indefinido |
| 2001-2002                | 751,6                           | Año seco           | Ciclo indefinido |
| 2002-2003                | 892,1                           | Año húmedo         | Ciclo húmedo     |
| 2003-2004                | 891,0                           | Año húmedo         | Ciclo húmedo     |
| 2004-2005                | 647,3                           | Año muy seco       | Ciclo húmedo     |
| 2005-2006                | 986,3                           | Año muy húmedo     | Ciclo húmedo     |
| 2006-2007                | 936,9                           | Año muy húmedo     | Ciclo húmedo     |
| 2007-2008                | 988,3                           | Año muy húmedo     | Ciclo húmedo     |
| 2008-2009                | 813,3                           | Año medio          | Ciclo húmedo     |
| 2009-2010                | 966,3                           | Año muy húmedo     | Ciclo húmedo     |
| 2010-2011                | 957,6                           | Año muy húmedo     | Ciclo húmedo     |
| 2011-2012                | 778,2                           | Año medio          | Ciclo húmedo     |
| 2012-2013                | 1063,1                          | Año muy húmedo     | Ciclo húmedo     |
| 2013-2014                | 905,2                           | Año húmedo         | Ciclo húmedo     |
| 2014-2015                | 902,8                           | Año húmedo         | Ciclo húmedo     |
| 2015-2016                | 805,4                           | Año medio          | Ciclo húmedo     |
| 2016-2017                | 662,5                           | Año seco           | Ciclo indefinido |



**7. INVENTARIO DE PUNTOS  
ACUÍFEROS.**



## **7. INVENTARIO DE PUNTOS ACUÍFEROS**

Se han revisado los antecedentes técnicos y las bases de datos disponibles para disponer de los inventarios de puntos de agua llevados a cabo en distintos trabajos. Se han contrastado los datos de las distintas bases institucionales a las que se ha tenido acceso en la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y en la Base de puntos del agua del IGME. Se considera que la base de datos más actualizada y completa es el Inventario de Puntos de Agua (IPA) de la CHE. Igualmente se ha consultado la base de captaciones de la encuesta de infraestructuras y equipamiento locales disponible en la web de Infraestructura de Datos Espaciales del Gobierno de La Rioja (<https://www.iderioja.larioja.org/>)

Partiendo de la información básica reflejada en la tabla y figura 7.1.1, se realizó una consulta atendiendo a los criterios de estar incluido en la masa de agua subterránea 09.65 Pradoluengo-Anguiano y, además, pertenecer a los términos municipales de Pazuengos, Ezcaray, Zorraquín, Valgañón y Ojacastro. Atendiendo a su naturaleza se presentan: 17 pozos, 8 sondeos, 10 manantiales y 1 galería. En el siguiente cuadro y mapa se recogen las captaciones de aguas subterráneas obtenidas de las citadas bases de datos, y que serán tratadas por grupos en los siguientes apartados.

No se ha identificado ningún pozo o sondeo nuevo relevante, pero si se ha detectado que algunos puntos no estaban inventariados. En relación con los manantiales se han hecho recorridos de campo, acompañados por personal técnico cualificado conocedor del entorno.

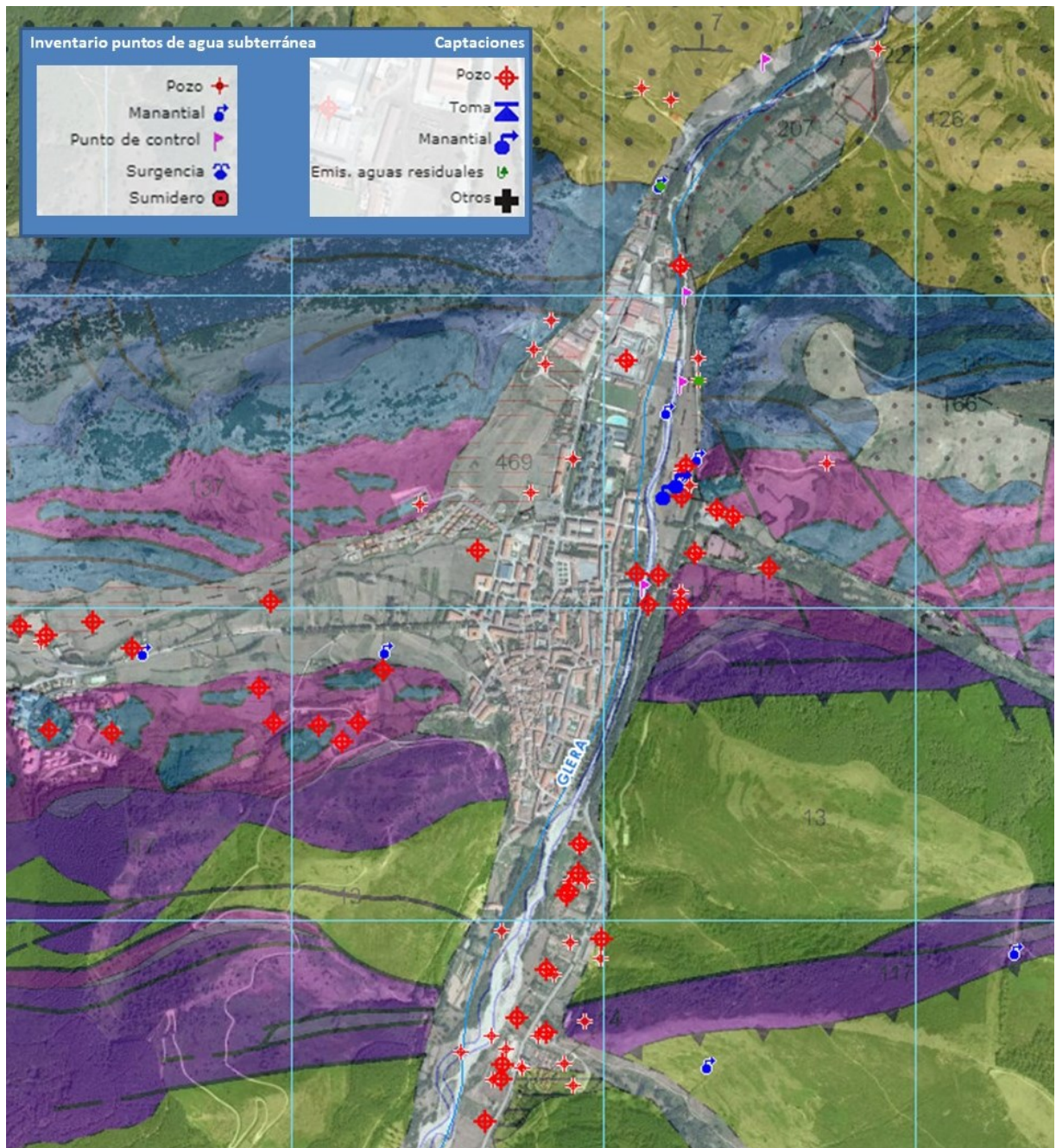


Figura 7.1.1 Puntos acuíferos y captaciones obtenidas inicialmente de la revisión de las bases de datos de la CHE y del IGME en la zona de estudio

Tabla 7.1.1 Puntos acuíferos obtenidos inicialmente de la revisión de las bases de datos de la CHE y del IGME en la zona de estudio.

| Nº Inventario | Nº Expediente | Nombre                        | Tipo Captación | Prof. (m) |
|---------------|---------------|-------------------------------|----------------|-----------|
| 2110-7-0084   | 1986-P-0067   |                               | POZO           | 5         |
| 2110-7-0149   |               | Sondeo superior Cantera       | SONDEO         | 289,8     |
| 2111-2-0001   |               | Tres Fuentes                  | MANANTIAL      |           |
| 2111-2-0013   |               |                               | MANANTIAL      |           |
| 2111-2-0015   |               |                               | MANANTIAL      |           |
| 2111-2-0017   |               |                               | GALERÍA        |           |
| 2111-2-0019   |               |                               | POZO           |           |
| 2111-2-0021   | 1987-P-0071   |                               | POZO           | 9         |
| 2111-2-0022   | 1985-P-0069   |                               | POZO           | 6         |
| 2111-2-0042   | 2010-P-1203   | Torres                        | POZO           | 155       |
| 2111-2-0044   |               | Sondeo Zorraquin CARE GLR     | SONDEO         | 211       |
| 2111-2-0045   |               | Pozo de explotación Zorraquín | POZO           | 190       |
| 2111-3-0001   |               | La Cantera. IGME              | SONDEO         | 151,4     |
| 2111-3-0014   |               | Peña San Torcuato             | MANANTIAL      |           |
| 2111-3-0016   |               |                               | POZO           | 9         |
| 2111-3-0017   |               |                               | MANANTIAL      |           |
| 2111-3-0020   |               | Cantera. IGME                 | SONDEO         | 153       |
| 2111-3-0032   |               | Pozo San Torcuato-1           | SONDEO         | 160       |
| 2111-3-0033   |               |                               | MANANTIAL      |           |
| 2111-3-0034   |               |                               | MANANTIAL      |           |
| 2111-3-0036   | 1966-A-0405   |                               | POZO           | 6,5       |
| 2111-3-0037   | 1966-A-0406   |                               | POZO           | 4,5       |
| 2111-3-0038   | 1966-A-0537   |                               | POZO           | 6,5       |
| 2111-3-0041   | 1971-A-0527   |                               | POZO           | 11        |
| 2111-3-0043   | 1988-P-0258   |                               | POZO           | 3,6       |
| 2111-3-0044   | 1988-P-0259   |                               | POZO           | 4         |
| 2111-3-0045   | 1989-P-0201   |                               | POZO           | 9,4       |
| 2111-3-0046   | 1988-P-0466   |                               | POZO           |           |
| 2111-3-0047   | 1988-P-0466   |                               | POZO           | 7,7       |
| 2111-3-0051   |               | Abto. Turza                   | MANANTIAL      |           |
| 2111-3-0068   | 2010-P-1230   | Parque Maquinaria. ETAP       | SONDEO         | 209       |
| 2111-3-0078   |               | Sondeo Ermita Allende GLR     | SONDEO         | 303       |
| 2111-3-0079   | 2015-P-0610   | Pozo Ezcaray San Torcuato 2   | POZO           | 99,5      |
| 2111-3-0080   |               | Sondeo Medio Ambiente         | SONDEO         | 30        |
| 2111-4-0034   |               | Manantial Untetas             | MANANTIAL      |           |
| 2111-4-0035   |               | Sondeo Pazuengos              | SONDEO         | 73,6      |

Los puntos acuíferos finales obtenidos de la revisión de las bases de datos de la CHE y del IGME en la zona de estudio se presentan en la figura 7.1.2



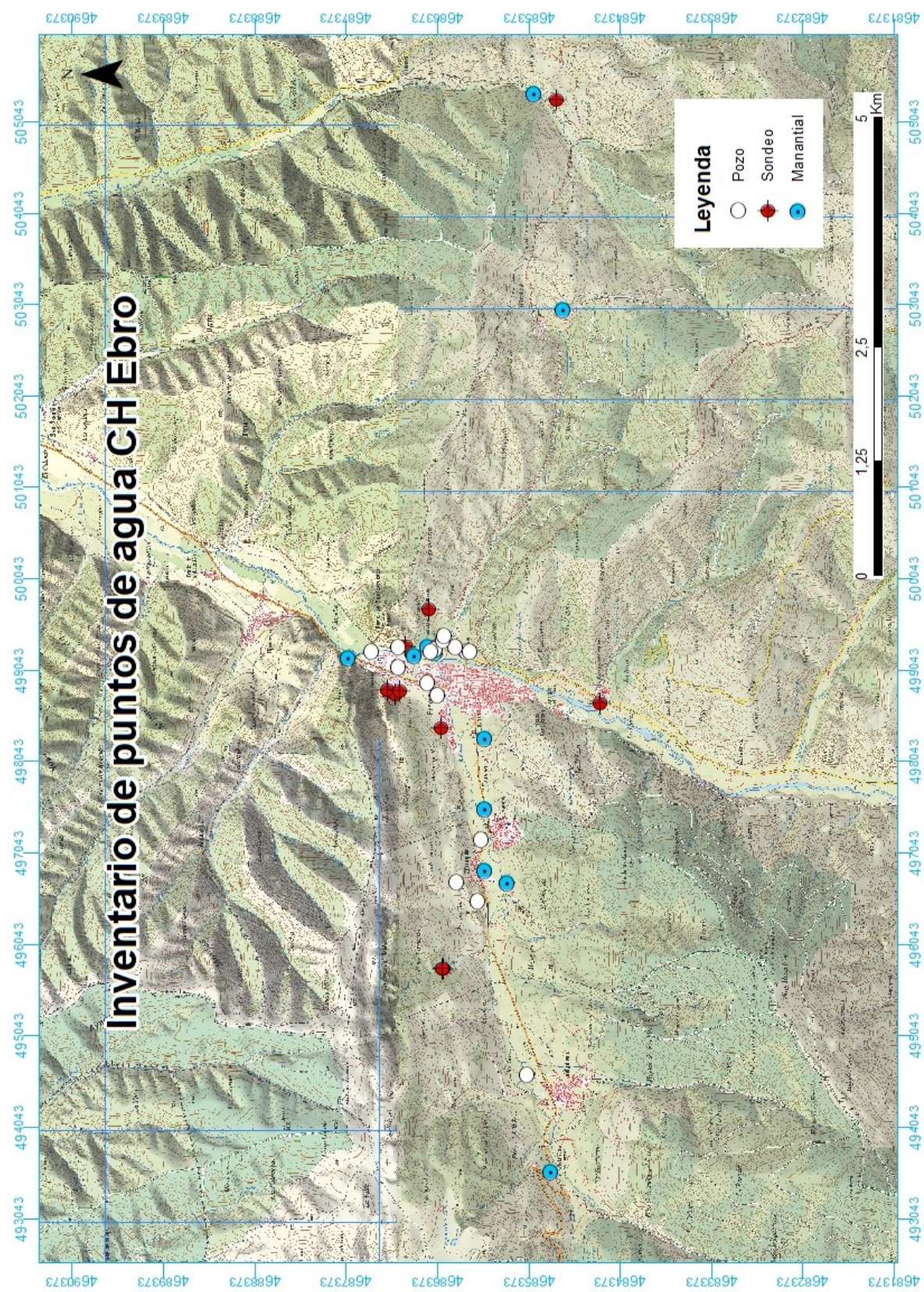


Figura 7.1.2 Puntos acuíferos finales obtenidos de la revisión de las bases de datos de la CHE y del IGME en la zona de estudio.



### 7.1. Puntos acuíferos tipo zanja o dren

Existen una serie de captaciones de aguas superficiales, que detraen recursos superficiales y subsuperficiales en zonas de barrancos del río Oja y Ciloría, y de sus afluentes, aguas arriba de la captación subterránea de la Mancomunidad de Aguas del Oja-Tirón (Pozos de San Torcuato en Ezcaray), independientemente de situarse en la masa de agua subterránea 09.65 Pradoluengo-Anguiano. Según la información de la Consejería de Obras Públicas del Gobierno de la Rioja, obtenida del visualizador regional del IDE (Infraestructura de datos espaciales) las captaciones de agua existentes son:

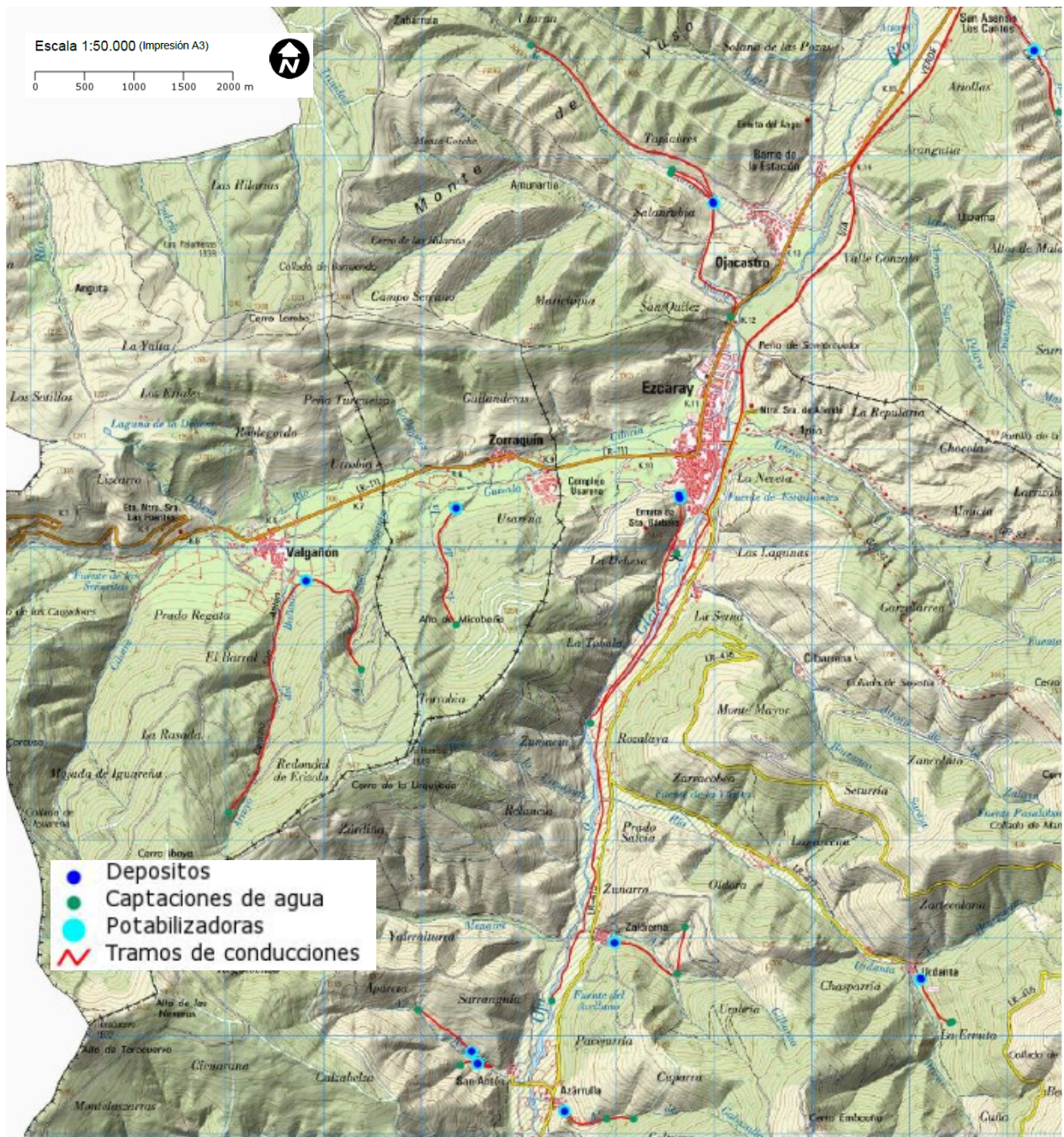
**Tabla 7.1.1 Inventario de captaciones urbanas. IDE-La Rioja**

| Identificador            | Nombre                                 |
|--------------------------|--|
| 260611101                | Captación 1 DE AZÁRRULLA (EZCARAY)     |
| 260611102                | Captación 2 DE AZÁRRULLA (EZCARAY)     |
| 260612101 <sup>(*)</sup> | Captación del río Oja EZCARAY          |
| 260612102                | Captación 2 DE EZCARAY                 |
| 260613101                | Captación DE POSADAS (EZCARAY)         |
| 260614101                | Captación DE SAN ANTÓN (EZCARAY)       |
| 260615101                | Captación DE URDANTA (EZCARAY)         |
| 260616101                | Captación 1 DE ZALDIERNA (EZCARAY)     |
| 260616102                | Captación 2 DE ZALDIERNA (EZCARAY)     |
| 261711102                | Captación MANCOMUNIDAD DE LA ESPERANZA |

<sup>(\*)</sup> Esta captación se trata de un pozo junto al río Oja, en las instalaciones del Albergue Molino Viejo.

Las captaciones tipo zanja más importantes construidas en el propio cauce de río Oja en el acuífero aluvial cuaternario, corresponden a las propias captaciones de abastecimiento a Ezcaray y la de la Mancomunidad de La Esperanza.

La captación de la Mancomunidad de La Esperanza, formada por los municipios de Villarejo, Villar de Torre, Cañas, Canillas de Río Tuerto y Cordovín, Cirueña y Manzanares, se encuentra 700 m aguas arriba de Zaldierna y se ubica en la margen derecha del río Oja. Consiste en dos casetas situadas muy próximas entre sí. La más antigua que coge el agua por gravedad desde el pozo de captación y la otra, más moderna, alberga un grupo de presión que en la actualidad no se encuentra en funcionamiento por no ser necesario según el Proyecto de mejora en la conducción de abastecimiento de agua a la Mancomunidad de la Esperanza realizado por el Gobierno de La Rioja en 2017. Según los datos proporcionados por el Consorcio de Aguas, en el año hidrológico 2016-2017 (desde octubre de 2016 a octubre de 2017) el volumen total derivado por esta captación a la ETAP de Ezcaray es de unos 0,123 hm<sup>3</sup> (ver figura 7.1.3). El cálculo de los “volúmenes diarios” se ha realizado restando los valores diarios totales del contador de entrada a la ETAP.



**Figura 7.1.2 Captaciones de agua subsuperficiales. IDE-La Rioja. Consejería de Obras públicas, Política Local y Territorial. Octubre 2017.**





**Figura 7.1.3. Principales captaciones superficiales de abastecimiento urbano.**

Se obtuvieron más datos de volúmenes de agua de entrada a la ETAP desde la captación de La Esperanza, hasta enero de 2018, facilitados por la empresa Aguas de Valencia (figura 7.5). Cabe destacar que, a partir del mes de octubre, la utilización de recursos superficiales es casi nula de entrada a la ETAP, en contra de lo que cabría esperar al finalizar la época de estío y coincidiendo con el restablecimiento paulatino del flujo superficial en la cuenca del río Oja (figura 7.1.5)

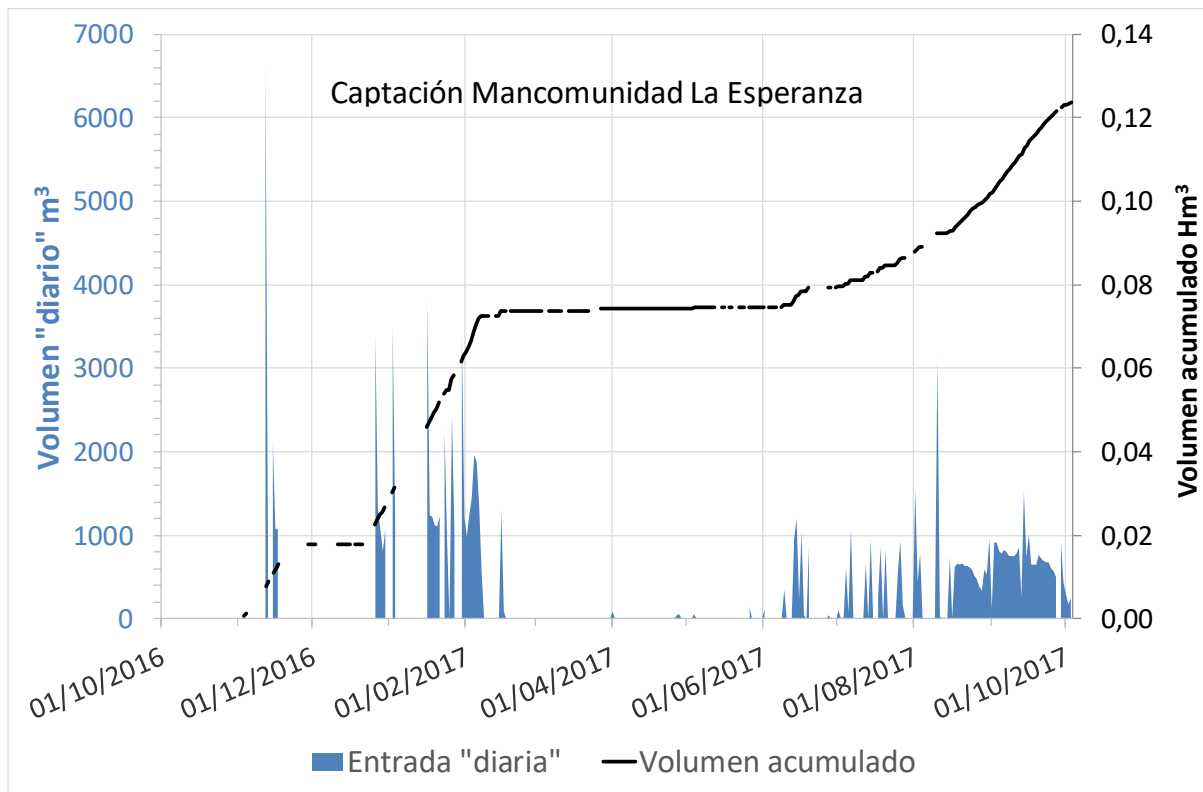


Figura 7.1.4 Volúmenes diarios de la captación de la Mancomunidad La Esperanza a la ETAP de Ezcaray en el año hidrológico 2016/17.

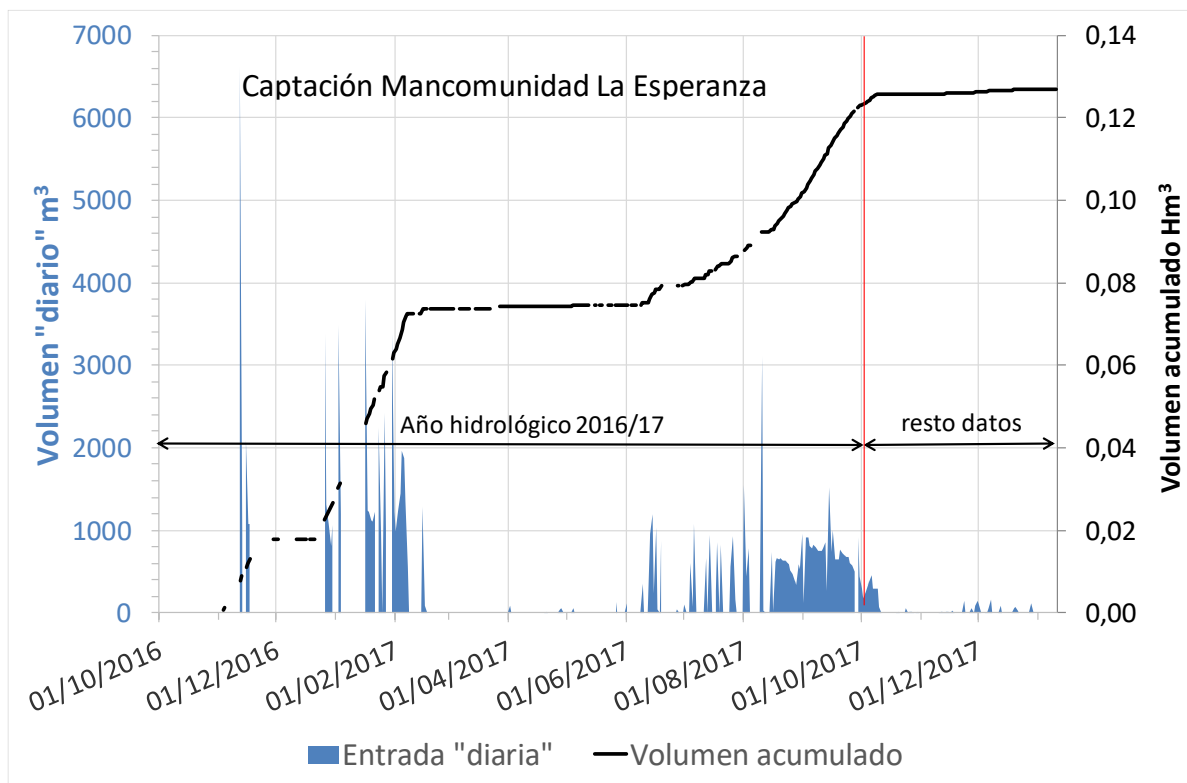


Figura 7.1.5 Volúmenes diarios disponibles de la captación de la Mancomunidad La Esperanza a la ETAP de Ezcaray (octubre 2016-enero 2018) (Fuente: Aguas de Valencia S.A)



La captación para abastecimiento de Ezcaray (2111-2-0030) consiste en una caseta con arqueta que recoge las aguas de una galería de hormigón de 1000 mm de diámetro y 100 metros de longitud enterrada a 5 metros transversalmente al cauce del río Oja. Se desconoce si existen datos de caudales y volúmenes captados o derivados hacia el depósito municipal de Ezcaray. En octubre de 2017, se llevó a cabo una actuación de emergencia consistente en una excavación en el propio cauce de unos 5 m de profundidad frente a la caseta para bombear agua. Según información facilitada por el Ayuntamiento, el bombeo funcionó muy pocos días por no necesitarse más. El nivel del agua se encontraba a unos 3-4 metros de profundidad (ver figuras 7.1.6 y 7.1.7).



**Figura 7.1. 6. Captación abastecimiento a Ezcaray en el río Oja.**





**Figura 7.1.7. Captación de emergencia en río Oja frente a caseta. Octubre 2017.**

## 7.2. Manantiales

Para este trabajo se han actualizado y/o inventariado 12 manantiales, algunos de los cuales no existe certeza de la correspondencia entre los manantiales inventariados y los que figuran en el Inventario de Puntos de Agua de la Confederación Hidrográfica del Ebro y en la base del IGME, debido a los errores en las coordenadas y a la falta de información general sobre los puntos. Estos puntos inventariados son los más significativos de los existentes en la zona de estudio (Figura 7.2) Las fichas de inventario de estos puntos se recogen en el Anejo del informe *“Instrumentación y toma de datos para la mejora del conocimiento hidrogeológico de la MASb Pradoluengo-Anguiano y las masas de agua superficiales relacionadas”* realizado por Z-AMALTEA en noviembre de 2017.

Los manantiales inventariados son los siguientes:

**Tabla 7.2.1 Manantiales actualizados o inventariados en la zona de estudio.**

| <b>Nombre</b>        | <b>Nº inventario</b> | <b>Municipio</b> |
|----------------------|----------------------|------------------|
| Tres Fuentes         | 2111-2-001           | Valgañón         |
| Fuente Las Señoritas | -                    | Valgañón         |
| Fuente de La Dehesa  | -                    | Valgañón         |
| Fuente de Anguta     | -                    | Valgañón         |
| En Ciloría           | 2111-2-013           | Zorraquín        |
| Abto. a Turza        | 2111-3-051           | Ezcaray          |
| Correlagua           | -                    | Ezcaray          |
| Azulla               | -                    | Ezcaray          |
| Nacedero río Turza   | -                    | Ezcaray          |
| Untetas              | 21114-034            | Ojacastro        |
| Los Trapos           | 2110-7-138           | Ojacastro        |
| Cuezo Masoga         | -                    | Ojacastro        |

Previamente a esta revisión en campo se han mantenido encuentros con responsables municipales y con personas conocedoras del entorno sobre las antiguas captaciones de manantiales para abastecimiento urbano. Algunos de ellos tienen aprovechamiento para usos agrarios, ganaderos y de abastecimiento. A pesar de las condiciones extremas de sequía del año en curso el bajo caudal, o muy bajo de estos manantiales, guarda significado hidrogeológico por ser de caudal permanente.



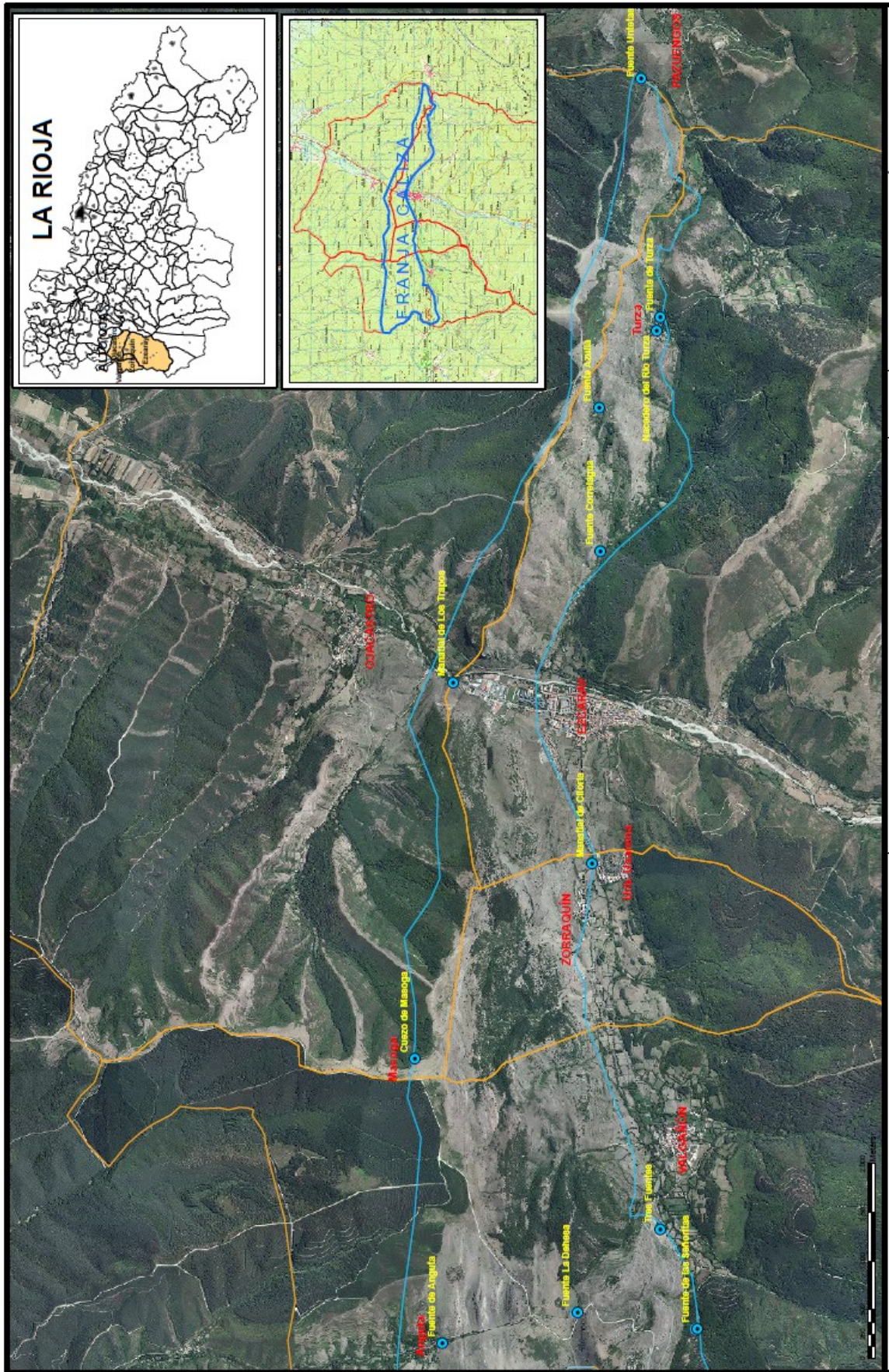




Figura 7.2.1 Mapa de manantiales actualizados y/o inventariados en la zona de estudio



Figura 7.2.1 Interior de la captación del manantial de Tres Fuentes de Valgañón.

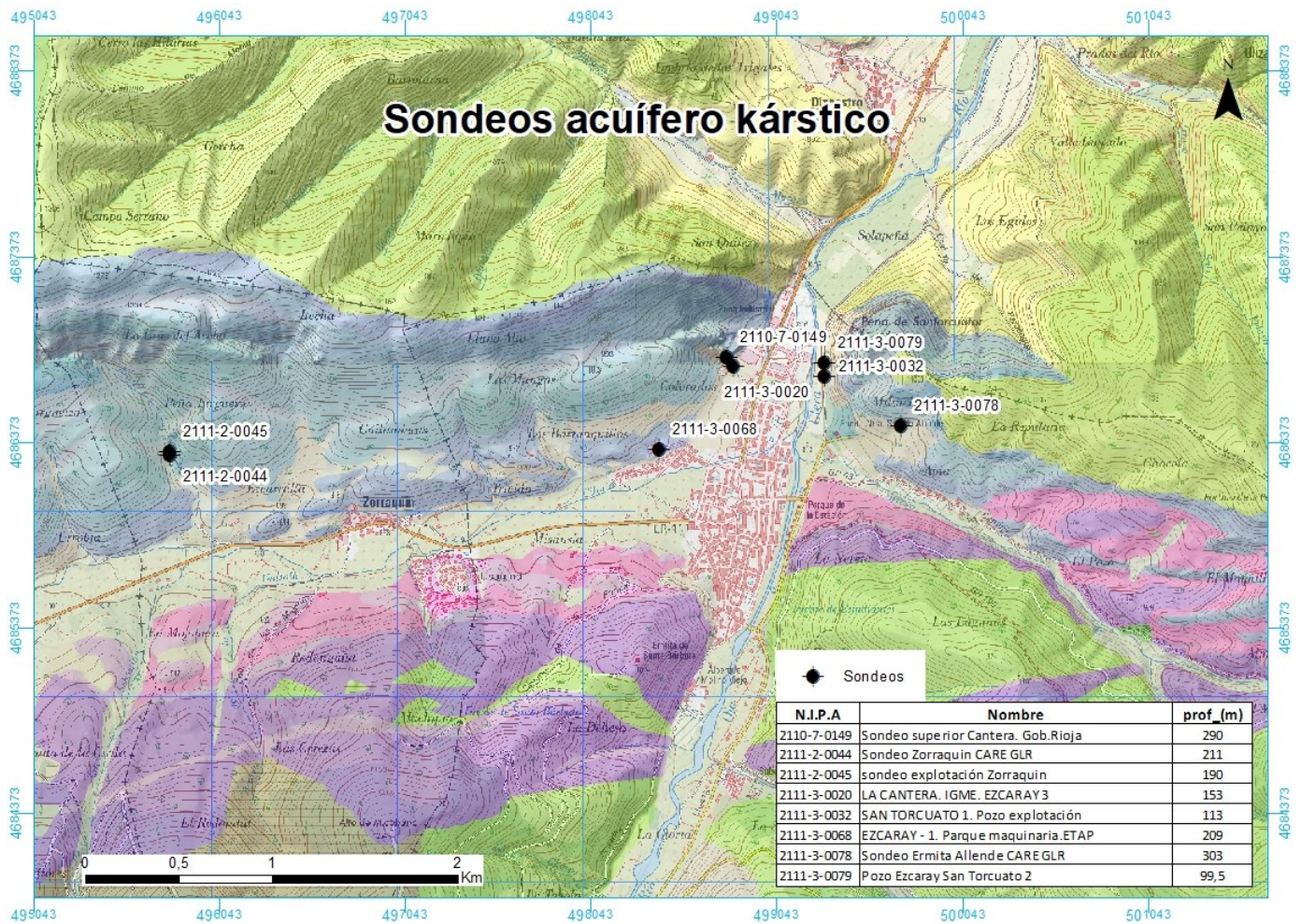
### 7.3. Sondeos y pozos en el acuífero Jurásico

Se han diferenciado por su interés, y al tratarse del principal acuífero objeto de estudio, los sondeos que captan el acuífero calizo kárstico del acuífero (ver tabla 7.3.1) Los datos recopilados de los ensayos realizados anteriormente en los mismos, como los datos de evoluciones de los niveles de agua se ofrecen en los capítulos de hidrodinámica y de piezometría. Apuntar que de los sondeos existentes tan sólo los dos pozos de San Torcuato y el de La Cantera IGME se encuentran instalados con equipos de bombeo, funcionando únicamente los de San Torcuato de manera alterna, según información facilitada por la empresa Aguas de Valencia contratada por el Consorcio de Aguas y Residuos de La Rioja para la gestión del abastecimiento urbano. El resto de sondeos o pozos no están instalados, y en el caso del sondeo 2110-7-0149 en la zona de la cantera, no ha sido localizado. Las fichas de los principales puntos se encuentran en el apartado de Anejos para su consulta.



**Tabla 7.3.1 Sondeos en el acuífero kárstico en la zona de estudio.**

| N.I.P.A     | Nombre                           | Año de construcción | Prof. (m) | Cota m s.n.m (nivelada) |
|-------------|----------------------------------|---------------------|-----------|-------------------------|
| 2110-7-0149 | Sondeo superior Cantera. G.Rioja | 2003                | 290       | -                       |
| 2111-2-0044 | Sondeo Zorraquin CARE GLR        | 2013                | 211       | 942,9                   |
| 2111-2-0045 | Sondeo explotación Zorraquin     | 2014                | 190       | -                       |
| 2111-3-0020 | Sondeo La Cantera- IGME          | 1989                | 153       | 805,91                  |
| 2111-3-0032 | Pozo San Torcuato-1              | 1987                | 113       | 801,43                  |
| 2111-3-0068 | Piezómetro P.maquinaria-ETAP     | 2002                | 209       | 831,16                  |
| 2111-3-0078 | Sondeo Ermita Allende CARE GLR   | 2013                | 303       | -                       |
| 2111-3-0079 | Pozo San Torcuato- 2             | 2013                | 99,5      | -                       |
| 2111-4-0035 | Sondeo de Pazuengos.             | -                   | 74        | -                       |



**Figura 7.3.1 Sondeos existentes en el acuífero kárstico en la zona de estudio.**



#### 7.4. Sondeos y pozos en otros acuíferos

Para la revisión en campo se descartaron los pozos someros inventariados en la base de datos del IGME e igualmente en la de la Confederación Hidrográfica del Ebro por tratarse, en la mayoría de los casos de aprovechamientos desconocidos de los que apenas existe información y corresponden a usos inferiores a 7.000 m<sup>3</sup>/año acogidos al Artículo 54.2 del Texto Refundido de la Ley de Aguas. Casi todos estos aprovechamientos corresponden a pozos de pequeña profundidad y gran diámetro revestidos con anillos de hormigón que captan aguas subterráneas de los acuíferos aluviales cuaternarios del río Oja y Ciloría. Se llevaron a cabo unas comprobaciones aleatorias de campo que revelaron errores de coordenadas y nombres de propietarios, lo que hace muy dificultosa, además de poco útil, la búsqueda de los mismos.

Por otra parte, se llevó a cabo un inventario de estos pozos someros en el acuífero detrítico aluvial para establecer un control periódico de la posible afección que la explotación del pozo de San Torcuato puede tener sobre los pozos situados en el aluvial de los ríos Oja y Ciloría. Con la aprobación del Gobierno de La Rioja, se contó con la ayuda del personal técnico y de mantenimiento del Ayuntamiento de Ezcaray para la localización de posibles pozos a medir. Los pozos elegidos disponibles son los siguientes:

**Tabla 7.4.1 Pozos someros inventariados para la red piezométrica acuífero aluvial cuaternario**

| <b>N.I.P.A IGME</b> | <b>Nombre</b>          | <b>Prof.(m)</b> | <b>Cota nivelada (m s.n.m)</b> | <b>Fecha nivelación</b> |
|---------------------|------------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------|
| 2111-3-0043         | Vivero Urdanta         | 9,12            | -                              | -                       |
| 2111-3-0044         | Sondeo Medio Ambiente  | 21,30           | 828,22                         | 08/11/2017              |
| 2111-3-0018         | Campamento-Albergue    | 6,13            | 823,47                         | 08/11/2017              |
| 2111-3-0039         | Parque Tenorio         | 7,45            | 814,69                         | 20/10/2017              |
| 2111-3-0042         | Parque Alameda m.dcha. |                 | 817,30                         | 08/11/2017              |
| 2111-3-0036         | Parking Ayuntamiento   | 6,80            | 807,89                         | 08/11/2017              |
| 2111-3-0041         | Estación ferrocarril   |                 | 807,39                         | 08/11/2017              |
| 2111-3-0040         | Parque margen izda.    | 7,75            | 805,30                         | 20/10/2017              |
| 2111-3-0037         | Cementerio             | 9,90            | 806,99                         | 20/10/2017              |
| 2111-3-0045         | Josemaría (particular) | 4,15            | -                              | -                       |
| 2111-3-0038         | Piscina municipal      | 5,90            | 801,35                         | 08/11/2017              |

Las fichas de inventario se adjuntan en el Anejo correspondiente al documento. En la figura 7.4.1 se representan los pozos medidos.



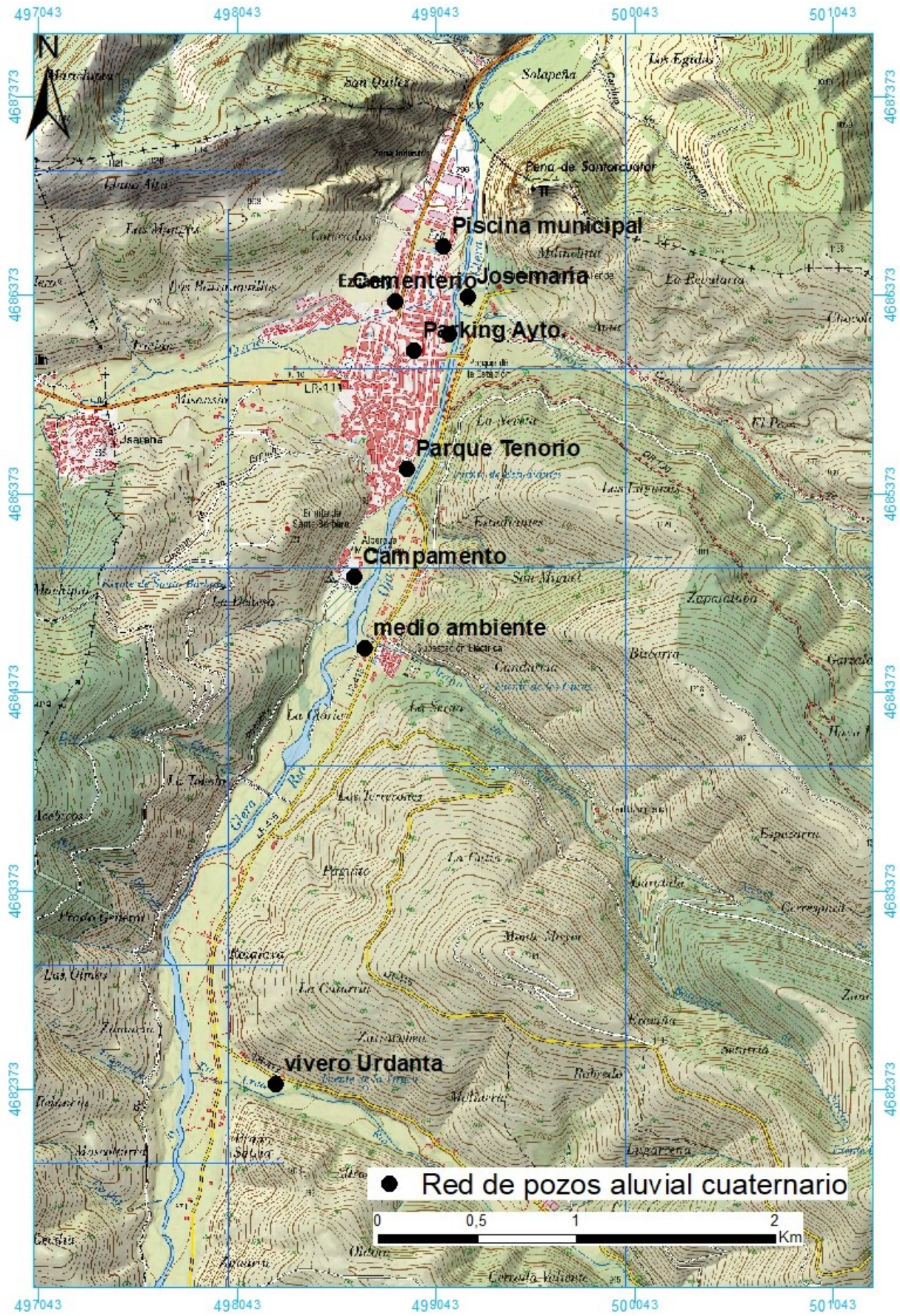


Figura 7.4.1 Pozos someros inventariados para la red piezométrica acuífero aluvial cuaternario



## **8. HIDROMETRÍA**



## 8. HIDROMETRÍA

### 8.1 Recopilación de datos históricos

#### 8.1.1. Caudales circulantes por la acequia de Ojacastro.

Se han analizado los datos disponibles de alturas limnimétricas y caudales circulantes por la acequia de Ojacastro.

Dichos datos abarcan tres períodos, en los cuales se ha tomado un dato diario:

- Del 1 de enero de 1985 al 31 de agosto de 1985. (con excepción de los días 5 a 11 de junio (7 días), en los cuales no hay dato). Esto supone, apara el período completo, un total de 266 datos.
- Del 1 de enero de 1986 al 28 de febrero de 1986. Un total de 59 datos.
- Del 1 de julio de 1986 al 30 de junio de 1987. Un total de 365 datos.

En total, se dispone de una cantidad de 690 datos.

El análisis de los caudales se ha realizado por separado para cada uno de los dos intervalos (1985 y 1986-87). La razón es que, a la vista de los pares de datos altura – caudal, parece que la curva de gastos utilizada para cada uno de los periodos es diferente, puesto que, a iguales alturas, el caudal no coincide en ambos.

#### PERÍODO 1 DE ENERO DE 1985 A 31 DE AGOSTO DE 1985

En la figura 8.1.1 se muestra, para el período 1 de enero de 1985 al 31 de agosto de 1985, los caudales diarios circulantes por la acequia:

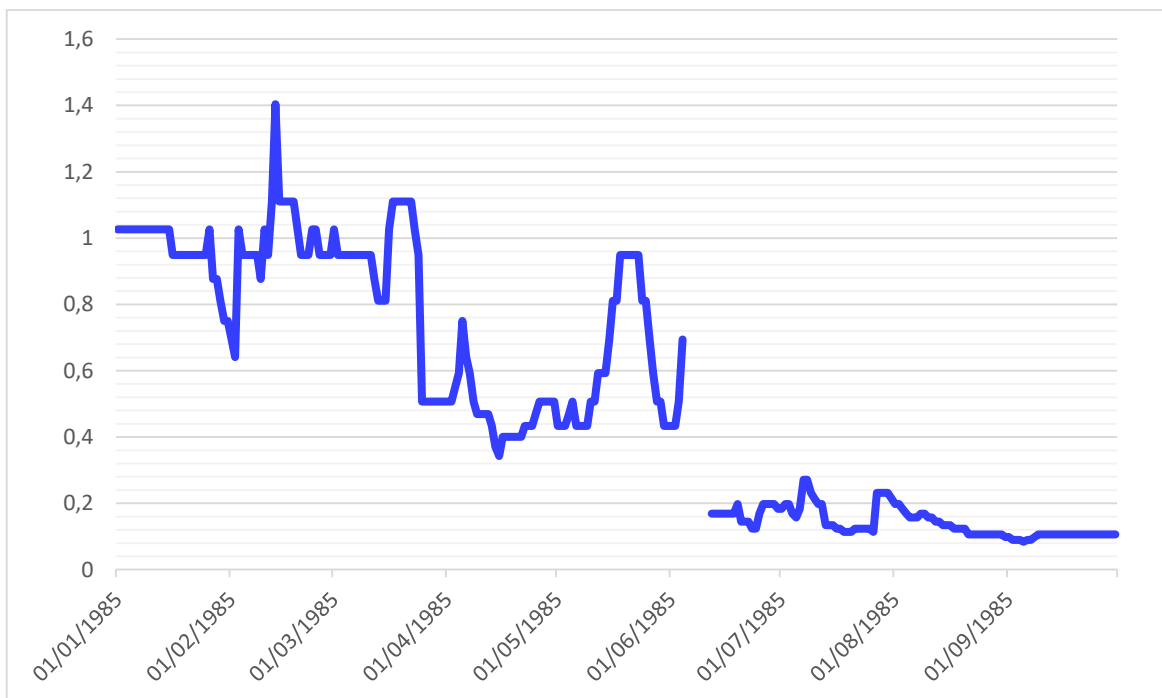


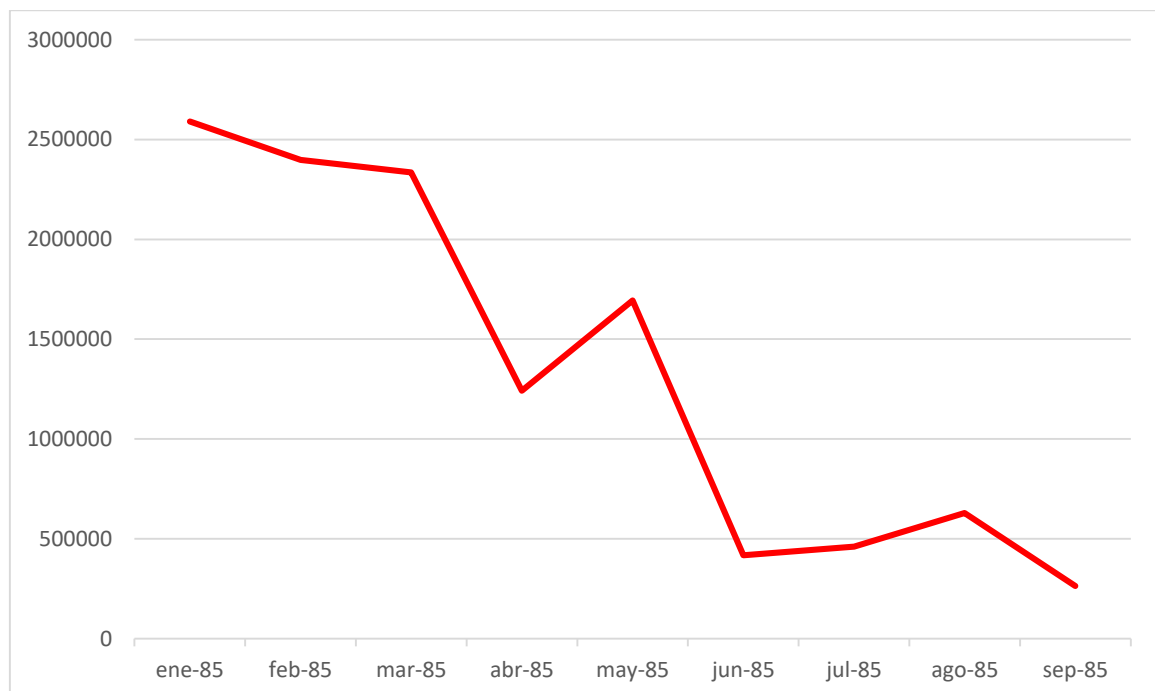
Figura 8.1.1. Caudales diarios (m³/s)

De los datos que aporta esta figura, se deduce que el caudal medio, para este período, es de 0,5136 m<sup>3</sup>/s, (o, lo que es lo mismo, 513 l/s), con un máximo de 1,404 m<sup>3</sup>/s el 13 de febrero, y un mínimo de 0,084 m<sup>3</sup>/s el día 5 de septiembre.

Para completar el análisis, se han agrupado los datos mensualmente, resultando de la siguiente manera:

| Mes    | Caudal              |     |
|--------|---------------------|-----|
|        | m <sup>3</sup> /mes | l/s |
| ene-85 | 2589494             | 999 |
| feb-85 | 2396995             | 925 |
| mar-85 | 2335910             | 901 |
| abr-85 | 1242259             | 479 |
| may-85 | 1693353             | 653 |
| jun-85 | 418348              | 161 |
| jul-85 | 461376              | 178 |
| ago-85 | 628905              | 243 |
| sep-85 | 264556              | 102 |

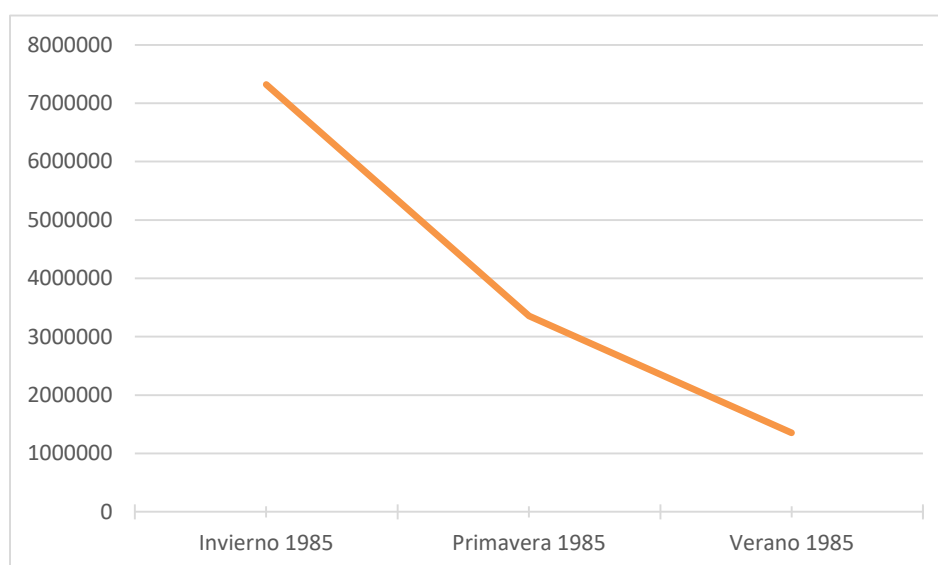
El resultado obtenido se muestra en la figura 8.1.2:



**Figura 8.1.2. Caudales mensuales (m<sup>3</sup>)**

Y si los datos se agrupan estacionalmente, se obtienen los siguientes resultados:

| ESTACIÓN       | CAUDAL              |     |
|----------------|---------------------|-----|
|                | m <sup>3</sup> /mes | l/s |
| Invierno 1985  | 7322400             | 942 |
| Primavera 1985 | 3353961             | 431 |
| Verano 1985    | 1354838             | 174 |



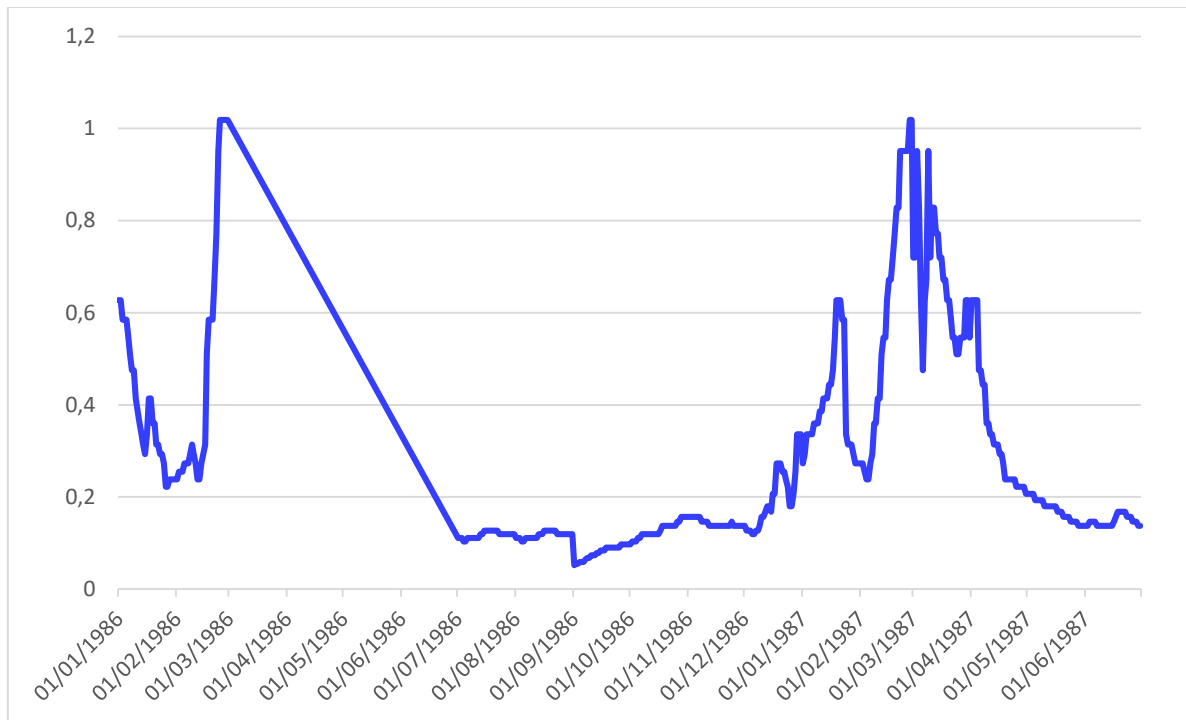
**Figura 8.1.3. Caudal correspondiente a cada estación (m<sup>3</sup>)**

Los datos que aportan las dos figuras anteriores se resumen del siguiente modo:

- Los caudales invernales (enero a marzo) suponen una media de 942 l/s. Esta cantidad supone un volumen total de agua de 7,32 hm<sup>3</sup> para todo el invierno.
- De igual manera, el volumen medio en primavera es de 431 l/s, lo que supone un total de 3,35 hm<sup>3</sup> para toda la estación.
- Los datos del verano indican que el caudal medio es de 174 l/s, lo que supone un volumen total de 1,35 hm<sup>3</sup> para toda la estación.
- Por meses, el mes que más caudal aporta es enero (2,59 hm<sup>3</sup> con una media de 999 l/s), seguido de febrero (2,39 hm<sup>3</sup> con una media de 925 l/s) y marzo (2,33 hm<sup>3</sup> con una media de 901 l/s),
- Los meses que menos caudal aportan son septiembre (0,26 hm<sup>3</sup> con una media de 102 l/s), seguido de junio (0,41 hm<sup>3</sup> con una media de 161 l/s), y julio (0,46 hm<sup>3</sup> con una media de 178 l/s).

**PERÍODO 1 DE ENERO DE 1986 A 30 DE JUNIO DE 1987.**

En la figura 8.1.4. se muestra, para el período 1 de enero de 1986 al 30 de junio de 1987, los caudales diarios circulantes por la acequia:



**Figura 8.1.4. Caudales diarios (m<sup>3</sup>/s)**

De los datos que aporta esta figura, teniendo en cuenta que hay un período de marzo a junio de 1986 en que no se tomaron medidas, y que la serie de datos abarca un período de tiempo más largo, se deduce que el caudal medio, para este período, es de 0,283 m<sup>3</sup>/s, (283 l/s) con un máximo de 1,019 m<sup>3</sup>/s el 13 de febrero, y un mínimo de 0,084 m<sup>3</sup>/s el día 5 de septiembre.

Agrupando los datos mensualmente, se obtiene el siguiente resultado:

| Mes    | Caudal  |     |
|--------|---------|-----|
|        | m3/mes  | l/s |
| ene-86 | 1026864 | 396 |
| feb-86 | 1218758 | 470 |
| jul-86 | 314582  | 121 |
| ago-86 | 313891  | 121 |
| sep-86 | 204854  | 79  |
| oct-86 | 342230  | 132 |
| nov-86 | 371088  | 143 |
| dic-86 | 534816  | 206 |
| ene-87 | 1067386 | 412 |
| feb-87 | 1460592 | 564 |
| mar-87 | 1785370 | 689 |
| abr-87 | 888538  | 343 |
| may-87 | 459389  | 177 |
| jun-87 | 381629  | 147 |



Los datos representados gráficamente se acompañan en la figura 8.1.5:

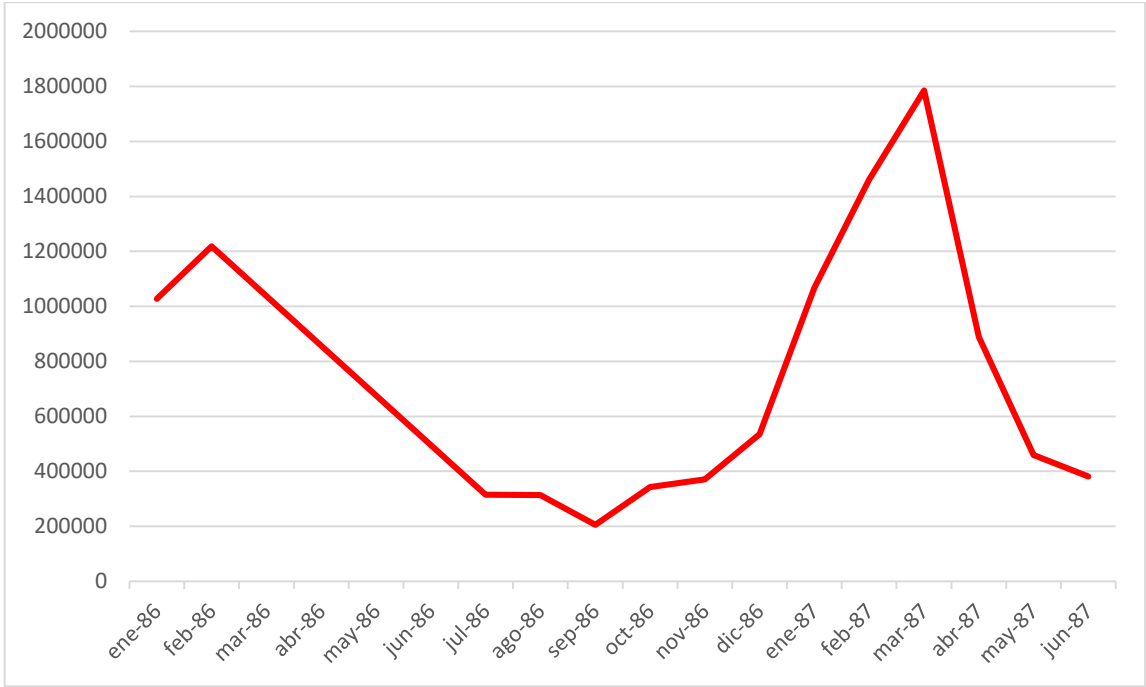


Figura 8.1.5. Caudales mensuales (m³)

Y si los datos se agrupan estacionalmente, se obtienen los siguientes resultados:

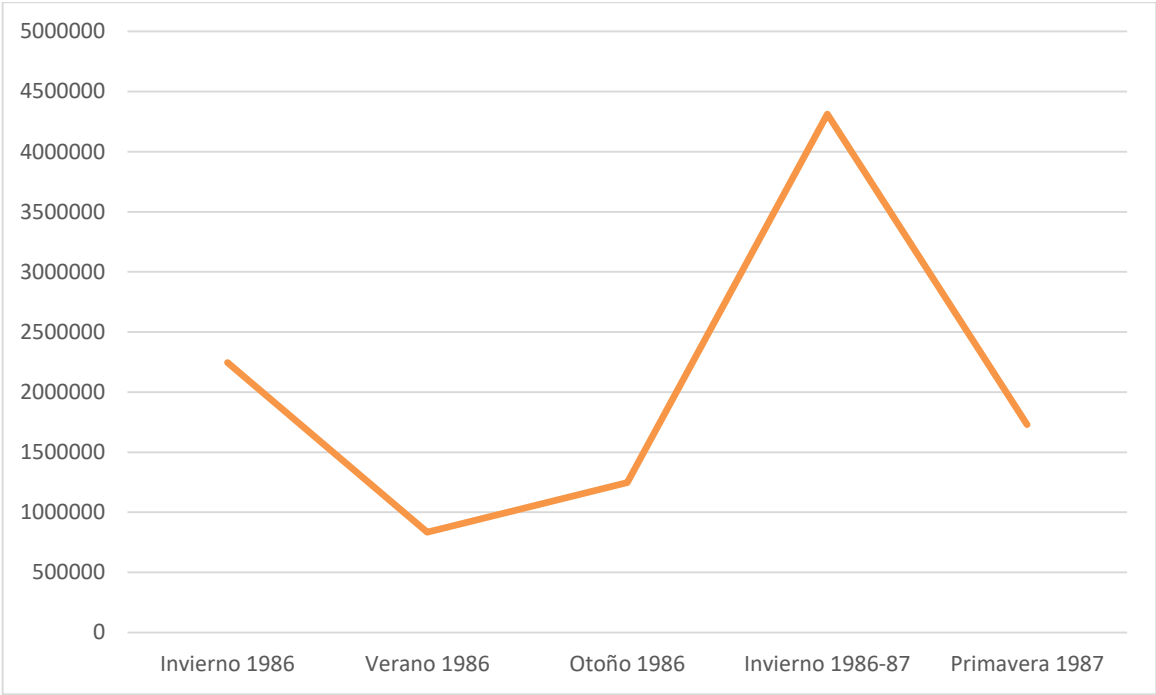


Figura 8.1.6. Caudal estacional (m³)

| ESTACIÓN         | CAUDAL              |     |
|------------------|---------------------|-----|
|                  | m <sup>3</sup> /mes | l/s |
| Invierno 1986    | 2245622             | 289 |
| Verano 1986      | 833328              | 107 |
| Otoño 1986       | 1248134             | 161 |
| Invierno 1986-87 | 4313347             | 555 |
| Primavera 1987   | 1729555             | 222 |

Los datos que aportan las dos figuras anteriores se resumen del siguiente modo:

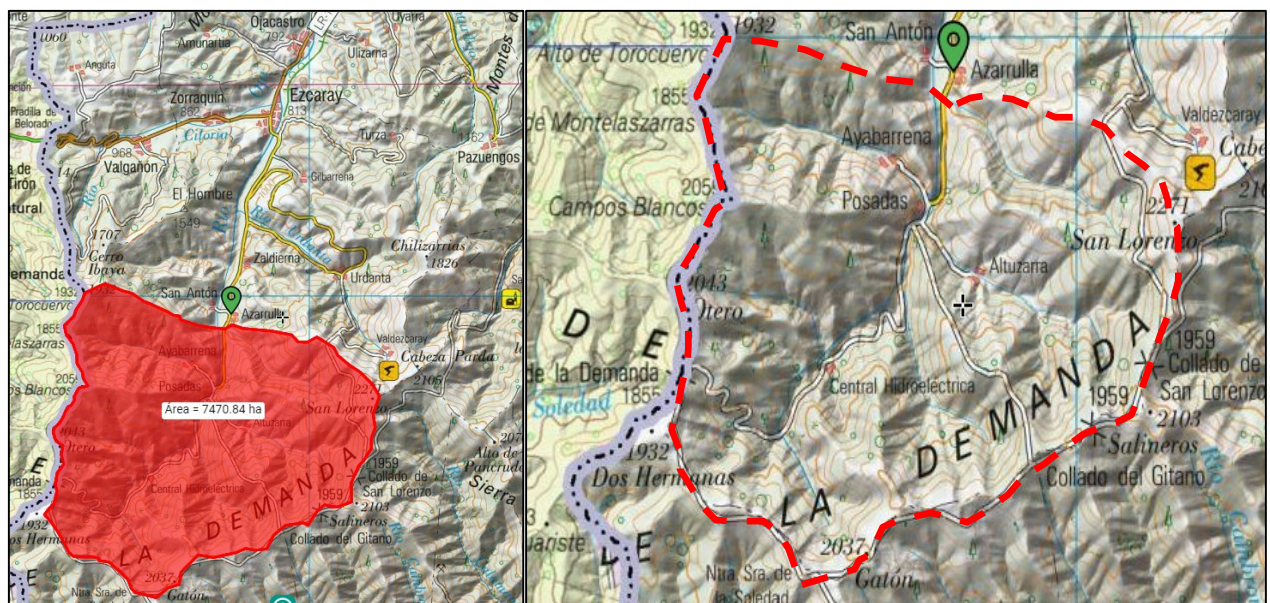
- Los caudales invernales (enero a marzo) suponen una media de 289 l/s para el invierno de 1986 y de 555 l/s para el del año siguiente. Esta cantidad supone un volumen total de agua, respectivamente, de 2,24 hm<sup>3</sup> y de 4,31 hm<sup>3</sup> para cada uno de los dos inviernos considerados en el análisis.
- De igual manera, el volumen medio en primavera es de 222 l/s, lo que supone un total de 1,73 hm<sup>3</sup> para toda la estación.
- Los datos del verano indican que el caudal medio es de 107 l/s, lo que supone un volumen total de 0,83 hm<sup>3</sup> para toda la estación.
- Por meses, el mes que más caudal aporta es marzo 1987 (1,78 hm<sup>3</sup> con una media de 689 l/s), seguido de febrero 1987 (1,46 hm<sup>3</sup> con una media de 564 l/s), febrero 1986 (1,22 hm<sup>3</sup> con una media de 470 l/s), y enero 1987 (1,07 hm<sup>3</sup> con una media de 412 l/s).
- Los meses que menos caudal aportan son septiembre 1986 (0,20 hm<sup>3</sup> con una media de 79 l/s), seguido de julio y agosto 1986 (ambos 0,31 hm<sup>3</sup> con una media de 121 l/s), y octubre 1986 (0,34 hm<sup>3</sup> con una media de 132 l/s).

## 8.2. Caudales circulantes por la estación de aforos de Azárrulla e interpretación de su hidrograma.

### 8.2.1. Emplazamiento de la estación.

En esta sección se analizará la serie foronómica de la estación de aforo 9157 Azárrulla, perteneciente a la red de la Confederación Hidrográfica del Ebro. Esta estación controla el caudal circulante en el río Oja -Glera, en este sector- y se sitúa aproximadamente a 7.7 km aguas arriba de Ezcaray, en dirección sur. El caudal es el resultante de la subcuenca de cabecera del río Oja que posee una extensión de 74,7 km<sup>2</sup> (Fig. 8.2.1-1a) Su altitud varía entre los 924 m s.n.m. de la estación y los 2271 m s.n.m. del Cerro de San Lorenzo, estando su cota media en torno a los 1500 m s.n.m.. La orografía de la subcuenca se caracteriza por valles muy encajados, la divisoria de aguas la limita al Este, Sur y Oeste con alturas del orden de los 2000 m s.n.m. que varían entre los 1860 m s.n.m. de los Altos de las Neveras y los 2271 m s.n.m. del Cerro de San Lorenzo (Fig. 8.2.1-1b). Las características de la estación de aforo se indican en la ficha de la misma (Fig. 8.2.1-2).

Existe un estudio previo realizado por la empresa Zeta Amaltea, donde se analiza, entre otras cosas, la evolución de los caudales en la EA de Azárrulla entre los años 2007 y 2013.



a. Superficie de la cuenca.

b. Límites de la cuenca

Figura 8.2.1-1. Cuenca aportante de la estación de Aforo 9157. Subcuenca de cabecera del río Oja

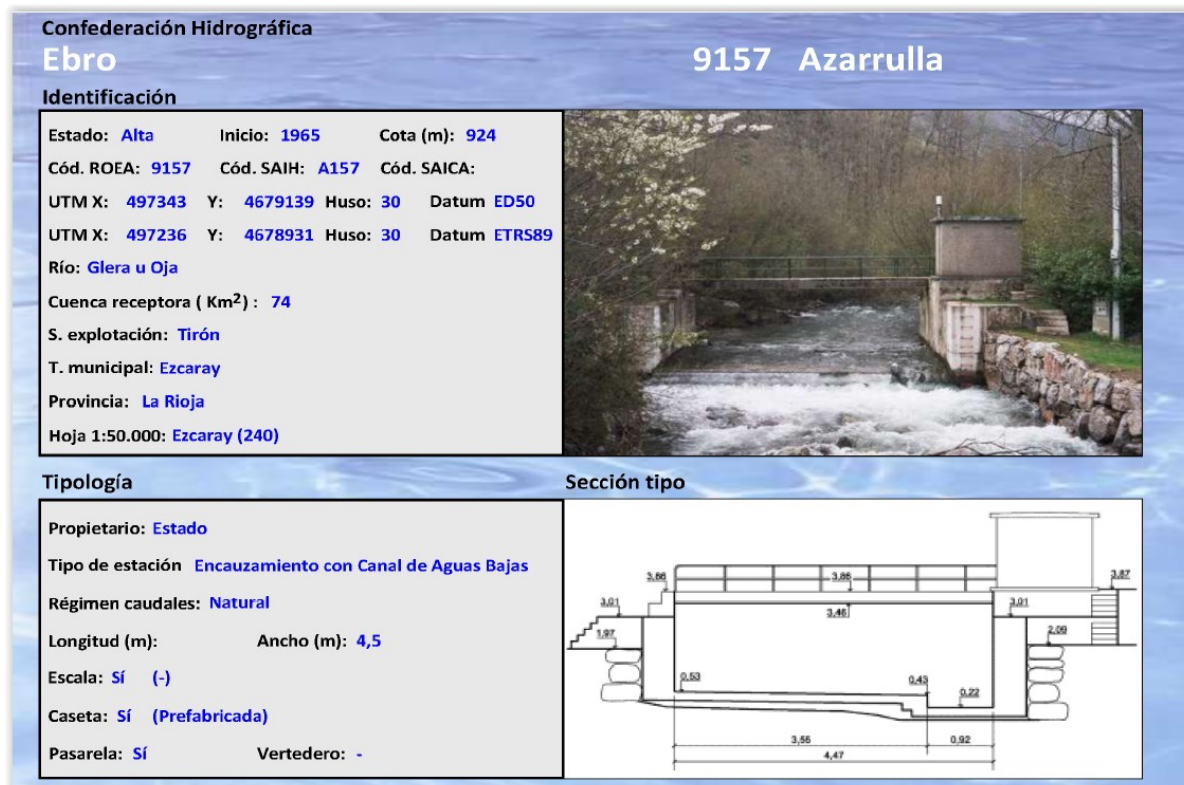


Figura 8.2.1-2. Ficha técnica de la estación de Aforo 9157.

### 8.2.2. La serie foronómica de Azárrulla y los ciclos climáticos de la Estación 9115 W.

La serie foronómica se extiende desde el 1 de octubre de 1965 al 30 de septiembre de 2014. Ésta comprende 48 años hidrológicos (1965/66 – 2013/14), de los que están incompletos 12 años. Si bien, la mayor parte de los meses sin mediciones (53 sobre 576) se concentran en 4 años, desde 1984/85 a 1987/88 (33 meses) (Fig. 8.2.2-1). La serie foronómica resultante con los caudales medios diarios mensuales se presenta en la Figura 8.2.2-2, superpuesta a la serie restituida de precipitaciones mensuales de la Estación 9115 W que se extiende desde 1980/81 – 2016/17.

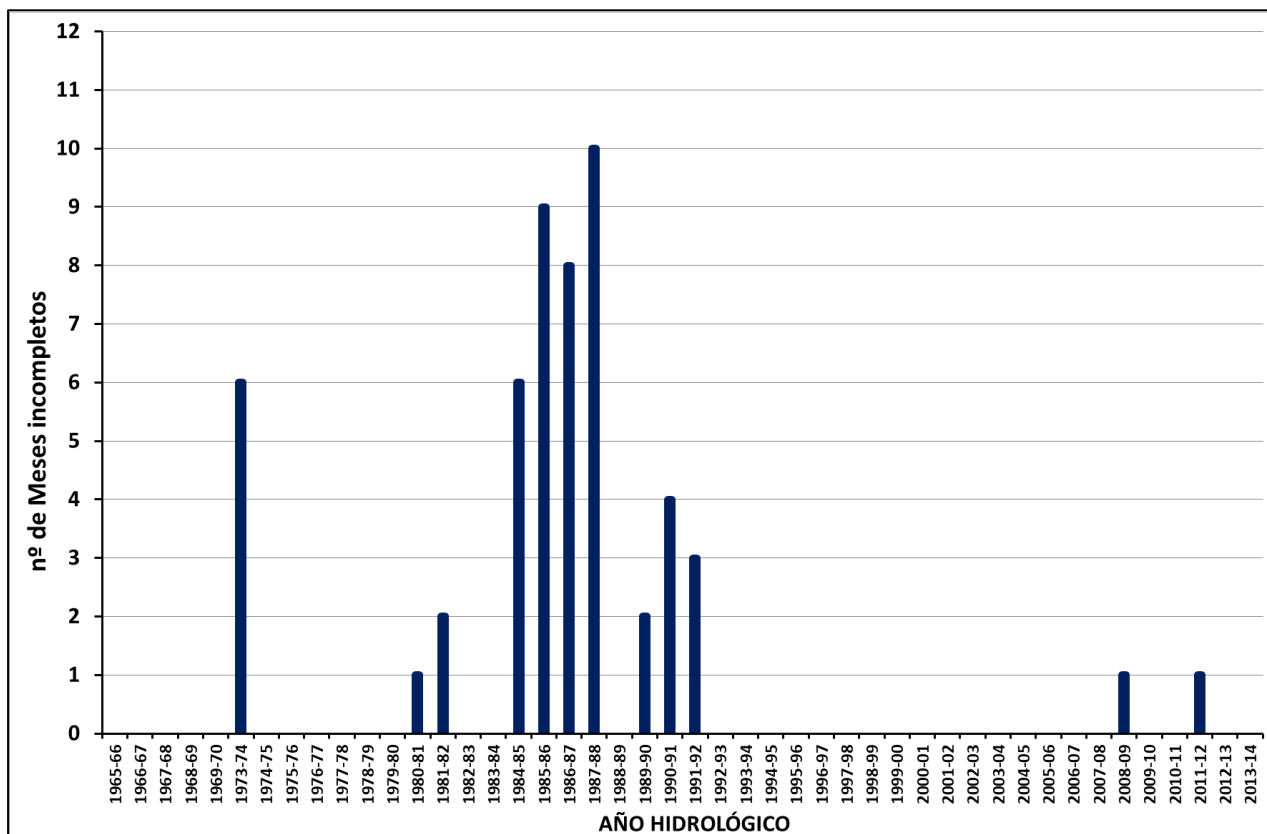


Figura 8.2.2-1. Estación de Aforo 9157: meses sin datos.

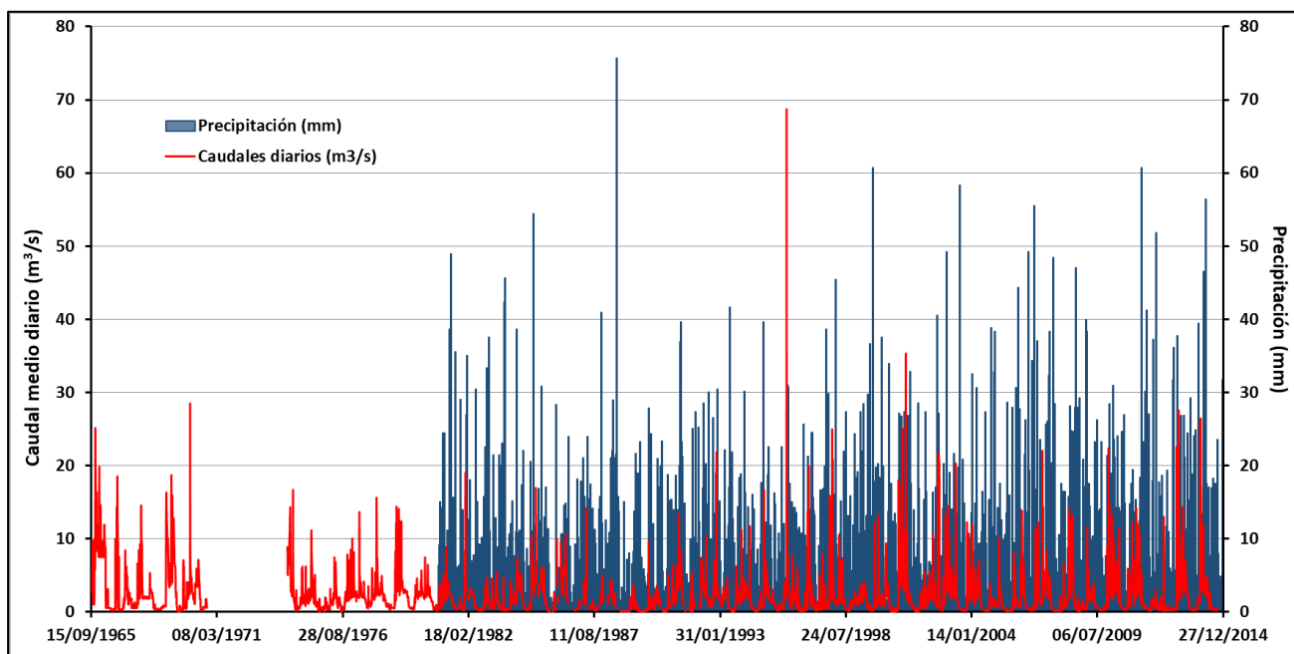
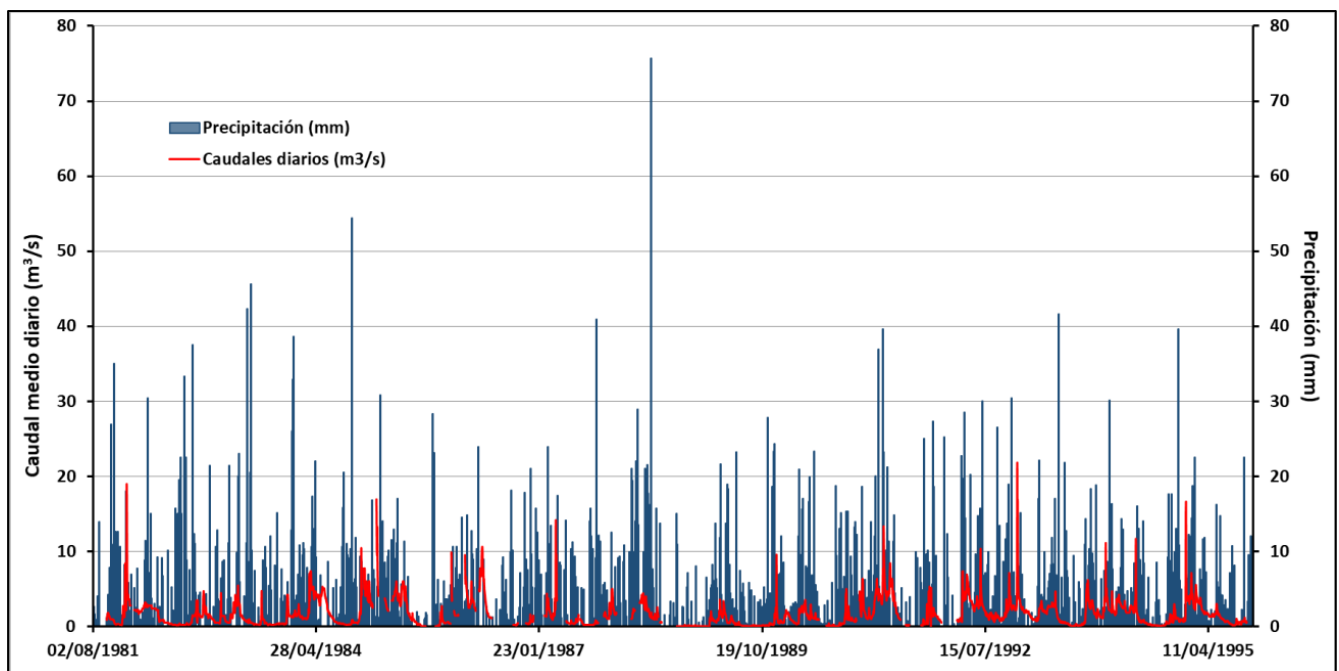


Figura 8.2.2-2. Estación de Aforo 9157: serie foronómica completa.

En una primera aproximación se analizó la evolución de los caudales para los ciclos climáticos seco (1981/1982 – 1994/95) y húmedo (2002/03 – 2013/14) y el período sin tendencia definida (1995/96 – 2001/02) que se identificaron en el análisis climático (Sección 6.3) y con el que se hizo el estudio de recarga del acuífero carbonatado de la Masa de Agua Subterránea 65 Pradoluengo-Anguiano, MASb 65 (Figuras 8.2.2-3, 8.2.2-4 y 8.2.2-5, respectivamente). El contraste de los tres hidrogramas con sus respectivas series de precipitaciones pone en evidencia de la inexistencia de una correlación entre las precipitaciones mensuales y los caudales medios diarios mensuales. Las correlaciones,  $R$ , entre estos para el período seco, el indeterminado y el húmedo fueron 0,13, 0,15 y 0,14, respectivamente. Sin embargo, se debe observar que, si se desfasaban, retrasándose, en 1 y 2 meses los caudales medios respecto a las precipitaciones, la correlación entre éstos mejoraba, siendo mayor la correlación para el desfase de un mes. No obstante, no se evidenciaba ninguna correlación clara. Así, para el desfase de un mes las correlaciones del período seco, el indeterminado y el húmedo fueron 0,2, 0,26 y 0,26, respectivamente, y para el desfase de dos meses las correlaciones del período seco, el indeterminado y el húmedo fueron 0,16, 0,21 y 0,22, respectivamente.



**Figura 8.2.2-3. Estación de Aforo 9157: serie foronómica, ciclo climático seco (1981/1982 – 1994/95).**



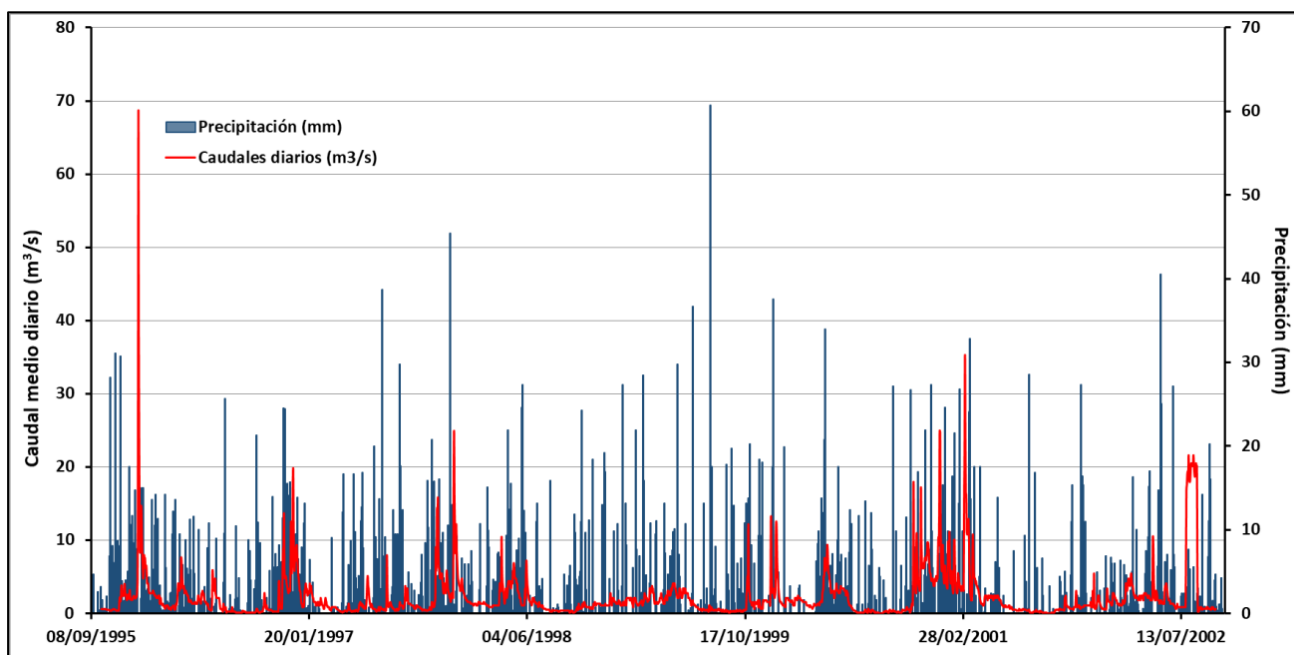


Figura 8.2.2-4. Estación de Aforo 9157: serie foronómica, período indeterminado (1995/96 – 2001/02).

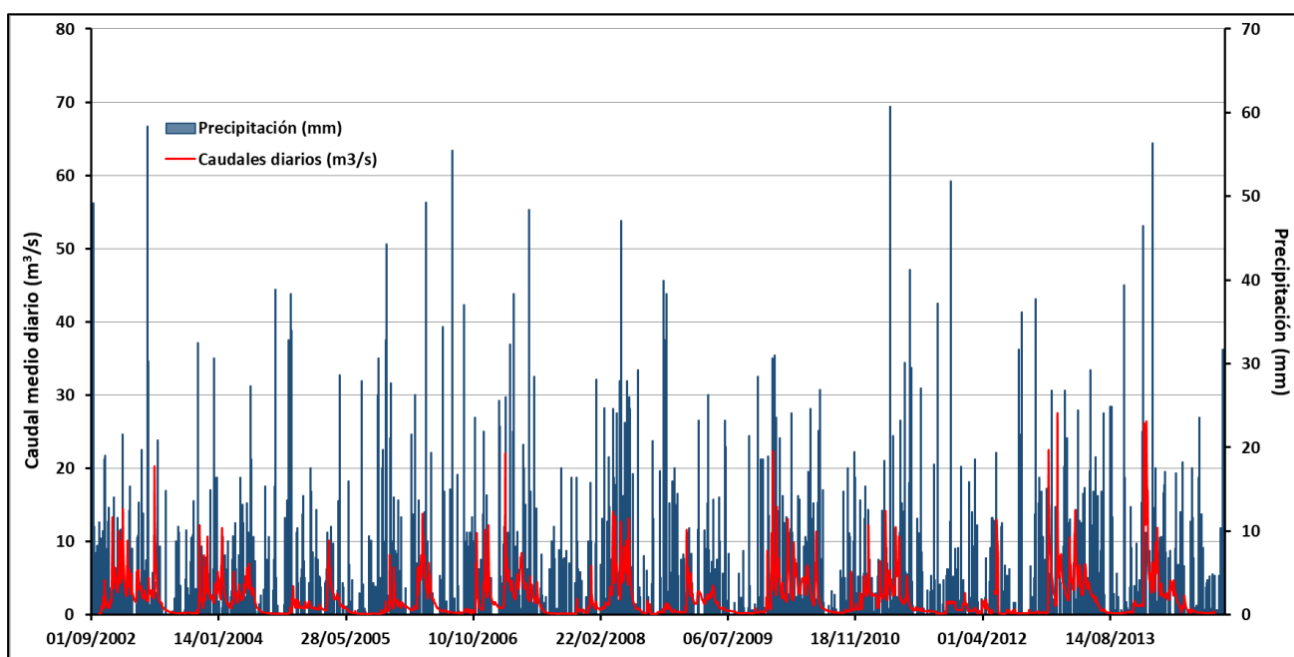


Figura 8.2.2-5. Estación de Aforo 9157: serie foronómica, ciclo climático húmedo (2002/03 – 2013/14).

La evidente falta de correlación entre las precipitaciones mensuales y los caudales medios diarios mensuales, indica situaciones hidroclimáticas imperantes distintas en el ámbito geográfico del acuífero carbonatado de la MASb 65 y en la subcuenca de cabecera del río Oja. Ambas áreas se encuentran geográficamente cercanas, en torno a unos 10 km, sin embargo, su disposición orográfica es totalmente distinta y con ello la exposición a la circulación atmosférica y a las masas de aire húmedo. El macizo carbonatado se extiende longitudinalmente de Este a Oeste, con una altura media de 1200 m s.n.m. y unas alturas máximas ligeramente superiores a 1300 m s.n.m., por lo

que se encuentra expuesto a la circulación desde cualquier punto cardinal. En contraste, la subcuenca de cabecera tiene una altura media superior a los 1400 m s.n.m. y se encuentra preferentemente expuesta a la circulación atmosférica procedente del Norte, ya que por el Este, el Sur y el Oeste las montañas alcanzan cotas de 2000 m s.n.m. o superiores.

Por lo tanto, no se considera justificado analizar el hidrograma en el marco de los ciclos climáticos identificados. El análisis se realizará para el período de estudio (1980/81 – 2013/14) desestimándose los años con una carencia de información apreciable (1984/85 - 1987/88).

### **8.2.3. Análisis de la serie foronómica de la estación 9157.**

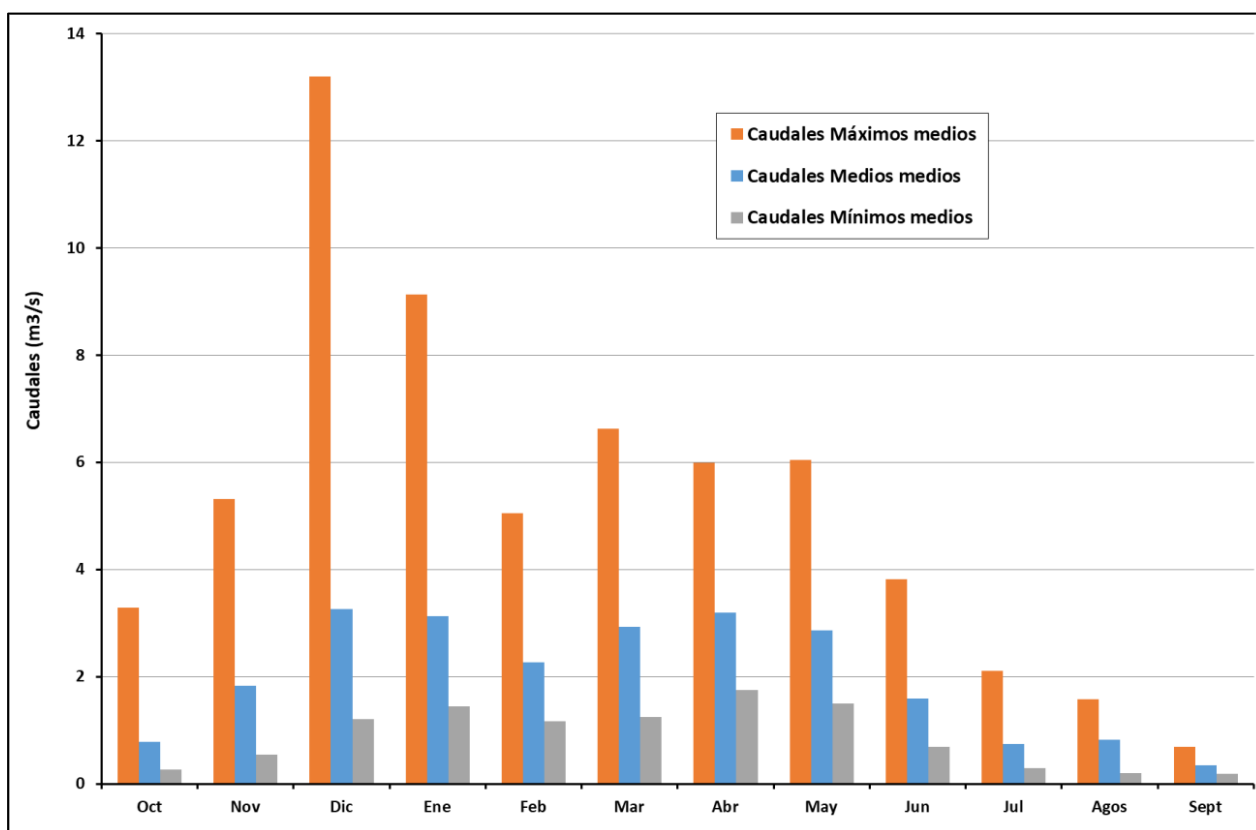
Si se analiza la evolución mensual de los caudales medios diarios, tanto Medios como Máximos y Mínimos, para el año medio correspondiente al periodo 1988/89 – 2013/14 (Tabla 8.2.3-1 y Figura 8.2.3-1), se observa:

- La evolución de los caudales medios diarios Medios presenta la distribución bimodal característica de las cuencas mediterráneas:
  - los máximos caudales de diciembre a abril, con “dos” máximos: Diciembre (3,26 m<sup>3</sup>/s)-Enero (3,13 m<sup>3</sup>/s) y Abril (3,2 m<sup>3</sup>/s).
  - los mínimos caudales durante los meses de estiaje, Julio- octubre, como un mínimo muy marcado en Septiembre (0,34 m<sup>3</sup>/s), fin del período estival. El bajo valor del caudal medio de Octubre (0,78 m<sup>3</sup>/s) refleja una recuperación del caudal extremadamente bajo de septiembre.
  - La relación entre el mínimo caudal medio y los máximos es superior a un orden de magnitud (más de 10 veces). La relación entre los caudales de los restantes meses de estiaje y los caudales máximos es, en torno, a 4 veces.
- Los caudales Máximos mensuales en general duplican a los caudales Medios. La excepción es el primer cuatrimestre del año hidrológico (octubre-enero) en que los caudales Máximos son de 3 a 4 veces superiores los Medios. El marcado contraste de estos meses se debe a las copiosas lluvias de otoño y a que el sistema hídrico se suele estar recuperando del fuerte estiaje previo.



**Tabla 8.2.3-1. Evolución mensual de los caudales medios diarios (Máximos, Medios y Mínimos) para el año medio correspondiente al periodo 1988/89 – 2013/14**

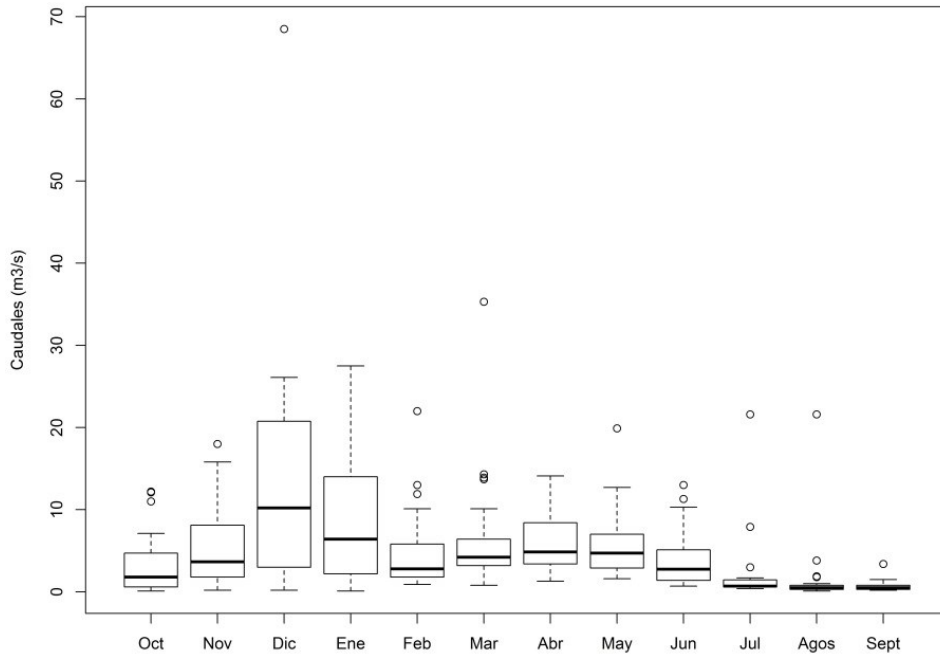
|                                  | Oct   | Nov   | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Agos  | Sept  |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Máximos (m<sup>3</sup>/s)</b> | 3,288 | 5,312 | 13,20 | 9,124 | 5,044 | 6,632 | 5,985 | 6,040 | 3,823 | 2,108 | 1,575 | 0,692 |
| <b>Máximos (% Medio)</b>         | 420   | 290   | 405   | 291   | 222   | 227   | 187   | 211   | 239   | 282   | 191   | 202   |
| <b>Medios (m<sup>3</sup>/s)</b>  | 0,784 | 1,831 | 3,261 | 3,133 | 2,267 | 2,926 | 3,196 | 2,867 | 1,597 | 0,748 | 0,824 | 0,343 |
| <b>Mínimos (m<sup>3</sup>/s)</b> | 0,262 | 0,550 | 1,200 | 1,440 | 1,172 | 1,252 | 1,746 | 1,500 | 0,692 | 0,296 | 0,196 | 0,192 |
| <b>Mínimos (% Medio)</b>         | 33    | 30    | 37    | 46    | 52    | 43    | 55    | 52    | 43    | 40    | 24    | 56    |



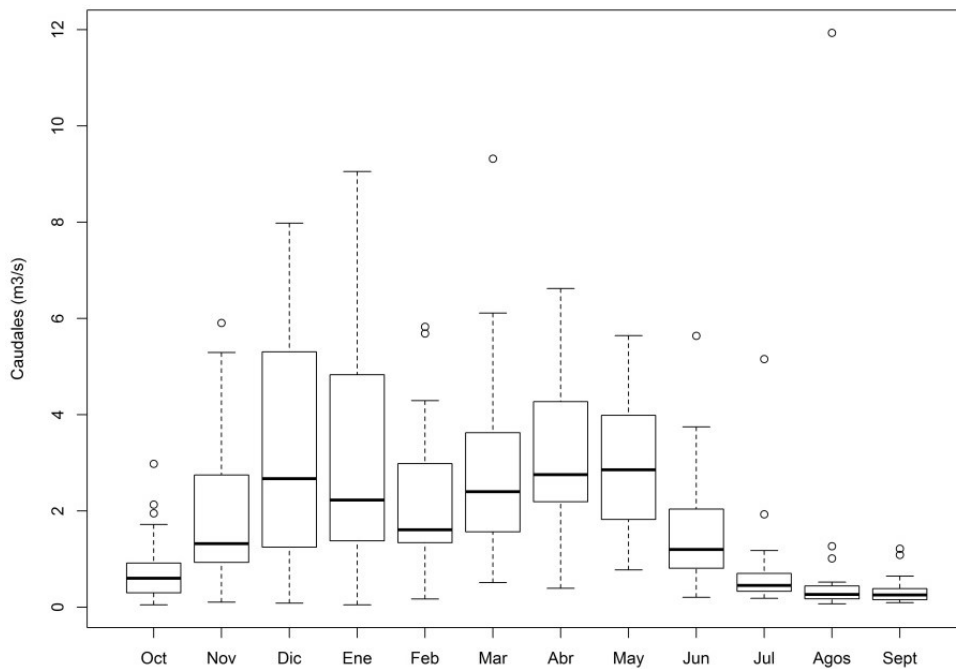
**Figura 8.2.3-1. Evolución mensual de los caudales medios diarios (Máximos, Medios y Mínimos) para el año medio correspondiente al periodo 1988/89 – 2013/14**

- Los caudales Mínimos mensuales suelen variar entre el 40 % y el 55 % de los Medios. Sin embargo, en agosto esta relación es del 24 % y en octubre y noviembre es un tercio. Esto puede estar reflejando las condiciones hidroclimáticas de estiajes extremos.
- Los diagramas de caja de los caudales medios diarios Máximos, Medios y Mínimos mensuales correspondientes al período 1988/89 – 2013/14 (Fig. 8.2.3-2) indican que,

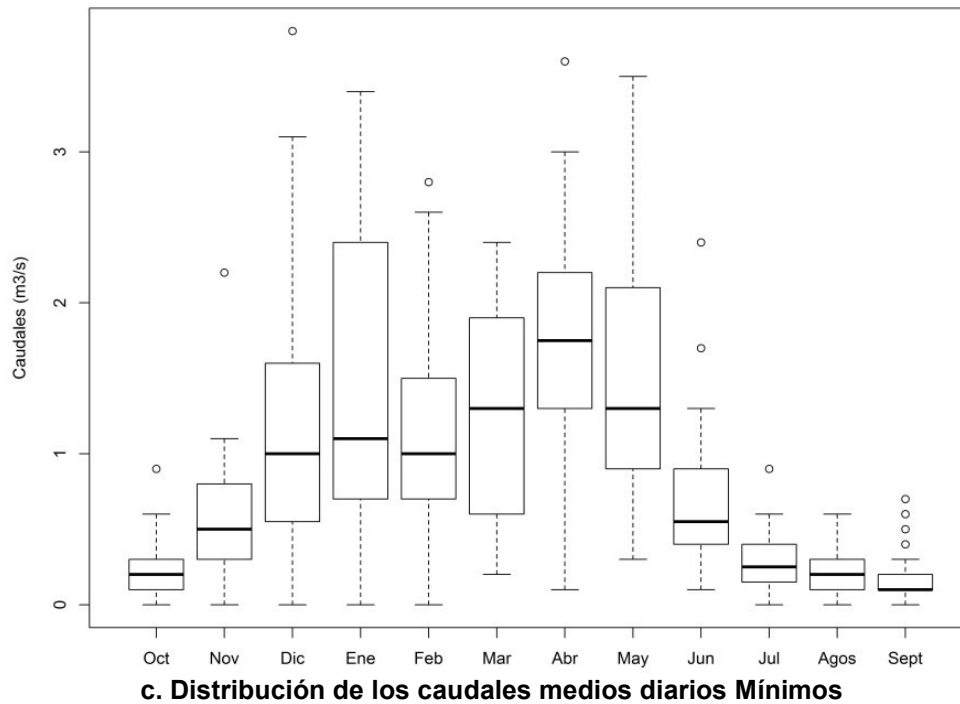
- Los valores medios de los caudales Mínimos presentan un notable rango de variación relativa. En el caso de los caudales Medios, este rango de variación es menor y para los caudales Máximos, el rango es menor aún.
- Los meses con mayor variabilidad son diciembre y enero y los que presentan una menor variabilidad son julio, agosto y septiembre, en orden decreciente. Los restantes meses presentan, en cada categoría, un grado similar de variabilidad relativa.



**a. Distribución de los caudales medios diarios Máximos**



**b. Distribución de los caudales medios diarios Medios**



**Figura 8.2.3-2. Diagramas de caja de los caudales medios diarios Máximos, Medios y Mínimos mensuales correspondientes al período 1988/89 – 2013/14**

- En casi todos los meses en las tres categorías existen valores *outlayers*.
- Todo lo expuesto pone en evidencia la gran variabilidad de los caudales en la estación de Azárrulla.

El caudal ecológico de un curso de agua se cuantifica como el 10 % del caudal medio histórico en régimen natural, tal como lo define para este sector de la cuenca del Ebro el Anexo 5 del Plan Hidrológico del Ebro 2010-2015 (CHE, 2010) y que continúa vigente en el actual Plan Hidrológico (CHE, 2015). En el período de estudio de este trabajo de recarga, la serie foronómica sin pérdida relevante de datos se extiende de 1992/93 a 2013/14 y su caudal ecológico es 0,21 m<sup>3</sup>/s. Así, sólo en 18 meses de este período, el caudal medio diario mensual fue inferior al caudal ecológico, ello representa el 7 % del total de los meses (Tabla 8.2.3-2). Sin embargo, 14 de estos meses se concentraron por partes iguales en agosto y septiembre, por lo que para un tercio del total de estos meses estivales el caudal circulante no superó el caudal ecológico.

Se debe observar, que si no se considera el valor anómalo del caudal medio mensual del mes de Agosto (11,93 m<sup>3</sup>/s) del año hidrológico 2001-02, el caudal medio para este mes en el período 1992-93 sería el menor del año medio (0,31 m<sup>3</sup>/s). Este valor es ligeramente menor al valor medio correspondiente al mes de Septiembre (0,33 m<sup>3</sup>/s). Siendo, ambos meses los que sufren la merma más fuerte del caudal circulante para el período de estiaje, que se extiende de Julio a octubre.

Tabla 8.2.3-2. Relación entre caudales medios mensuales (m<sup>3</sup>/s) y el caudal ecológico: 1992/93 – 2013/14.

| Año     | Oct   | Nov   | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun  | Jul   | Ago    | Sept  | n° meses Q < 0,1 Q <sub>m</sub> |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|--------|-------|---------------------------------|
| 1992-93 | 2,132 | 2,745 | 4,771 | 1,916 | 1,013 | 1,957 | 2,223 | 2,853 | 0,81 | 0,394 | 0,124  | 0,194 | 2                               |
| 1993-94 | 2,981 | 2,170 | 1,642 | 3,292 | 2,463 | 2,986 | 2,175 | 2,684 | 0,74 | 0,335 | 0,150  | 0,119 | 2                               |
| 1994-95 | 0,687 | 1,326 | 1,317 | 4,648 | 3,392 | 2,388 | 1,531 | 1,824 | 0,94 | 0,451 | 0,437  | 0,642 | 0                               |
| 1995-96 | 0,53  | 1,787 | 7,98  | 4,886 | 1,609 | 1,565 | 2,765 | 1,841 | 2,03 | 0,439 | 0,179  | 0,198 | 2                               |
| 1996-97 | 0,666 | 3,038 | 6,747 | 2,481 | 1,343 | 0,725 | 0,394 | 0,776 | 1,33 | 1,177 | 1,014  | 1,215 | 0                               |
| 1997-98 | 0,637 | 5,292 | 6,06  | 2,225 | 1,344 | 1,044 | 3,659 | 3,14  | 2,20 | 0,678 | 0,373  | 0,385 | 0                               |
| 1998-99 | 0,917 | 1,189 | 1,521 | 1,617 | 1,553 | 2,203 | 2,19  | 3,038 | 1,73 | 0,541 | 0,446  | 0,295 | 0                               |
| 1999-00 | 1,718 | 1,228 | 4,019 | 1,687 | 1,793 | 1,126 | 4,203 | 3,129 | 1,30 | 0,212 | 0,158  | 0,287 | 1                               |
| 2000-01 | 0,395 | 5,907 | 5,942 | 8,261 | 4,293 | 9,32  | 2,132 | 1,976 | 0,77 | 0,451 | 0,22   | 0,143 | 1                               |
| 2001-02 | 0,807 | 0,93  | 1,219 | 1,377 | 1,597 | 3,209 | 2,308 | 2,578 | 1,92 | 5,158 | 11,933 | 0,645 | 0                               |
| 2002-03 | 1,311 | 3,18  | 5,946 | 5,54  | 2,984 | 3,515 | 2,743 | 4,935 | 0,89 | 0,319 | 0,23   | 0,263 | 0                               |
| 2003-04 | 0,806 | 3,156 | 3,028 | 4,829 | 2,081 | 2,288 | 3,044 | 4,323 | 1,07 | 0,272 | 0,165  | 0,153 | 2                               |
| 2004-05 | 0,511 | 1,579 | 1,09  | 1,095 | 0,87  | 3,625 | 2,6   | 1,165 | 0,38 | 0,184 | 0,133  | 0,155 | 3                               |
| 2005-06 | 0,34  | 1,624 | 1,917 | 1,188 | 0,76  | 6,11  | 4,272 | 1,357 | 0,50 | 0,324 | 0,266  | 0,498 | 0                               |
| 2006-07 | 1,952 | 2,922 | 3,399 | 1,179 | 5,686 | 3,414 | 5,464 | 3,234 | 2,11 | 0,527 | 0,186  | 0,155 | 2                               |
| 2007-08 | 0,164 | 0,433 | 0,463 | 1,555 | 0,908 | 1,601 | 6,62  | 5,643 | 5,63 | 0,854 | 0,467  | 0,252 | 1                               |
| 2008-09 | 0,432 | 0,898 |       | 2,167 | 2,814 | 2,4   | 2,198 | 2,321 | 0,81 | 0,505 | 0,27   | 0,225 | 0                               |
| 2009-10 | 0,281 | 0,399 | 4,665 | 5,843 | 4,17  | 4,969 | 4,13  | 4,132 | 3,74 | 0,895 | 0,41   | 0,286 | 0                               |
| 2010-11 | 0,636 | 1,266 | 2,314 | 3,747 | 2,516 | 4,041 | 4,682 | 3,985 | 2,01 | 0,725 | 0,52   | 0,46  | 0                               |
| 2011-12 | 0,184 | 1,199 | 1,132 | 1,205 | 0,591 | 0,513 | 1,093 |       | 0,20 | 0,339 | 0,242  | 0,228 | 2                               |
| 2012-13 | 0,273 | 0,294 | 5,37  | 5,133 | 4,101 | 5,971 | 4,994 | 4,438 | 2,05 | 0,638 | 0,259  | 0,212 | 0                               |
| 2013-14 | 0,3   | 0,98  | 5,242 | 9,053 | 5,825 | 2,683 | 3,453 | 1,254 | 0,83 | 0,41  | 0,266  | 0,256 | 0                               |
| Media   | 0,848 | 1,979 | 3,609 | 3,406 | 2,441 | 3,075 | 3,131 | 2,887 | 1,55 | 0,719 | 0,839  | 0,330 | 18                              |

#### 8.2.4. Comentarios sobre la serie foronómica de la estación 9157

El análisis de la serie foronómica de la estación 9157 Azárrulla permite observar que:

- Los caudales circulantes presentan la distribución estacional bimodal característica de las cuencas mediterráneas: dos máximos en diciembre-enero y abril, con aguas altas entre estos meses, y mínimos muy marcados en agosto y septiembre acompañado de fuerte estiaje de julio a octubre.
- La serie presenta una gran variabilidad en los caudales circulantes. Este rasgo es acorde a con la orografía abrupta de la cuenca relativamente pequeña y con grandes desniveles.
- Los meses en que el caudal circulante no supera al caudal ecológico se concentran en agosto y septiembre, aunque ello sólo ocurre en un tercio de los años analizados.

### 8.3 Aforos en manantiales

Durante los trabajos de campo se llevó a cabo el aforo de varios manantiales.

| Nombre                   | Nº inventario | Q (l/s) | Fecha      |
|--------------------------|---------------|---------|------------|
| Tres Fuentes de Valgañón | 2111-2-001    | 2,1     | 16-10-2017 |
|                          |               | 1,9     | 8-11-2017  |
|                          |               | 1,6     | 24-11-2017 |
|                          |               | 2,36    | 19-12-2017 |
| Fuente Las Señoritas     | -             | 0,045   | 14-11-2017 |
| Fuente de La Dehesa      | -             | 0,007   | 14-11-2017 |
| Fuente de Anguta         | -             | 0,09    | 14-11-2017 |
| En Ciloría               | 2111-2-013    | 5       | 14-11-2017 |
| Abto. a Turza            | 2111-3-051    | 0,22    | 15-11-2017 |
| Correlagua               | -             | 0,17    | 14-11-2017 |
| Azulla                   | -             | 0,27    | 15-11-2017 |
| Nacadero río Turza       | -             | 1,18    | 15-11-2017 |
| Untetas                  | 21114-034     | 3       | 15-11-2017 |
| Los Trapos               | 2110-7-138    | 2,75    | 24-11-2017 |
|                          |               | 5       | 19-12-2017 |
| Cuezo Masoga             | -             | 0,017   | 14-11-2017 |

### 8.4 Aforos realizados en los ríos Oja, Santurdejo y Ciloría

Para el control de los caudales del río Oja, se realizaron una serie de aforos en distintos puntos de la cuenca hidrográfica en los meses de julio y septiembre de 2017. Las medidas se llevaron a cabo mediante un medidor de flujo magnético-inductivo OTT MF pro que mide velocidades de flujo por puntos en cursos de agua. Los resultados, ordenados en sentido de la corriente, se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 8.4.1 Aforos realizados en el río Oja**

| Cauce            | Estación                            | nº | X_utm  | Y_utm   | Aforo 18/07/2017<br>Q (L/s) | Aforo 13/09/2017<br>Q (L/s) |
|------------------|-------------------------------------|----|--------|---------|-----------------------------|-----------------------------|
| Río Oja          | Estación aforos CHEbro en Azárrulla | 1  | 497226 | 4678952 | 137                         | 70,5                        |
| Acequia lateral  | junto aparcamiento estación aforos  | 2  | 497232 | 4678981 | 12,53                       | 9,7                         |
| Arroyo Cabezulla | En Azárrulla                        | 3  | 497405 | 4679364 | seco                        | seco                        |
| Arroyo Regaldía  | En San Antón                        | 4  | 496790 | 4679617 | seco                        | seco                        |
| Arroyo Gilbarna  | En Zaldierna                        | 5  | 497803 | 4681069 | seco                        | seco                        |
| Río Oja          | En Puente Zaldierna                 | 6  | 497544 | 4680973 | seco                        | seco                        |
| Arroyo Menares   | En Puente Zaldierna                 | 7  | 497411 | 4680974 | seco                        | seco                        |
| Río Urdanta      | En Ctra. Ezcaray-Zaldierna          | 8  | 497960 | 4682416 | seco                        | seco                        |
| Río Oja          | aguas abajo río Urdanta             | 9  | 497778 | 4682566 | seco                        | seco                        |
| Río Oja          | aguas abajo ctra. Valdezcaray       | 10 | 498224 | 4683856 | muy poco Q                  | seco                        |

|                   |                                       |    |        |         |              |              |
|-------------------|---------------------------------------|----|--------|---------|--------------|--------------|
| Arroyo Gilbarrena | En Ctra. Ezcaray-Zaldierna            | 11 | 498757 | 4684620 | seco         | seco         |
| Río Oja           | aguas arriba Albergue M.Viejo         | 12 | 498644 | 4684770 | seco         | seco         |
| Río Oja           | aguas arriba estructura remonte peces | 13 | 499075 | 4685802 | <b>65,22</b> | seco         |
| Río Oja           | aguas abajo Puente C/Labradores       | 14 | 498943 | 4685444 | <b>82,64</b> | seco         |
| Río Oja           | aguas arriba EDAR Ezcaray             | 15 | 499248 | 4687110 | <b>113,1</b> | seco         |
| Río Oja           | en estanque laguna de las truchas     | 16 | 499305 | 4687474 | -            | <b>38,12</b> |

Cabe destacar que en época entrada del estío, tras un período de escasez de precipitaciones que se alarga ya casi durante tres años hidrológicos, se han aforado caudales de hasta 80 l/s que se infiltran en el aluvial formado por cantos y gravas, a escasa distancia de la Estación de aforos de Azárulla. En el capítulo 8.2 se ha llevado a cabo la interpretación de los datos de caudales y del hidrograma medio resultante en la estación de aforos.

El río Oja registra crecidas en torno a los momentos de deshielo, que suelen producirse hacia abril y mayo. A partir de ese momento el caudal decrece en función de la nieve acumulada. Desde que se tiene registro de datos de aforos del río, se observa como en régimen natural, el río Oja se seca entre los meses de agosto a octubre en Ezcaray, Ojacastro y Santurdejo. El tramo de río que queda por encima de la Estación de Aforos de Azárulla no suele secarse y aguas abajo de este punto de control, cuando el aluvial gana desarrollo, se infiltra en las gravas y alimenta al acuífero detrítico cuaternario que llega hasta Ezcaray.



Figura 8.4.2. Realización de aforo en el río Oja a su paso por Ezcaray. Estación 13. (julio 2017)





**Figura 8.4.3 Aforo río Oja aguas arriba de la EDAR de Ezcaray Estación 15. (julio 2017)**

Por otra parte, durante los trabajos de campo de la empresa y del personal del IGME, se han hecho valoraciones visuales de caudal, estimando el caudal circulante con mediciones adicionales mediante métodos volumétricos en los ríos Santurdejo y Ciloría que se recogen en la siguiente tabla:

**Tabla 8.4.2 Caudal estimados en otros ríos**

|                       |                             | Caudal estimado (L/s) |       |       |      |       |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-------|-------|------|-------|
|                       |                             | 14-07                 | 14-09 | 13-10 | 6-11 | 19-12 |
| <b>rio Tirón</b>      | Fresneda                    | 8                     |       |       |      |       |
|                       | Santa Olalla                | seco                  |       |       |      |       |
| <b>rio Santurdejo</b> | Pazuengos                   | 2                     | 8     |       | 6    | 3     |
|                       | Villanueva                  | 3                     |       |       |      |       |
| <b>Río Ciloría</b>    | merendero a.arriba Valgañón |                       |       | 2     |      | 15    |
|                       | Aguas abajo Valgañón        |                       |       | 4     |      |       |





**Figura 8.4.4 Rio Ciloría en el merendero aguas arriba de Valgañón (19-12-207)**

## **9. HIDRODINÁMICA**



## 9. HIDRODINÁMICA

Se describen a continuación las pruebas de ensayos de bombeo realizadas en los principales sondeos de explotación con el objetivo de obtener los parámetros hidrodinámicos característicos de los acuíferos captados y para definir los rendimientos de dichos sondeos cuando fueron construidos para su futura puesta en explotación

### 9.1 PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS DE ACUÍFERO CARBONATADO JURÁSICO

El acuífero Jurásico aparece en el frente cabalgante de la Sierra de la Demanda, está constituido litológicamente por una sucesión dolomítico-calcárea de unos 300 metros de potencia y de una permeabilidad muy alta. En la margen derecha del río Oja se encuentra en forma de núcleos aislados que debido a su escasa entidad no presenta en principio gran interés hidrogeológico.

Tabla 9.1.1. Pruebas de bombeo realizadas en los principales sondeos del acuífero carbonatado.

| Nombre              | Nº inventario  | Fechas ensayos de bombeo                             |
|---------------------|--|--|
| Pozo San Torcuato-1 | (2111-3-0032)  | Noviembre-1987<br>Septiembre-1989<br>Septiembre-2012 |
| Pozo San Torcuato-2 | (2111-3-0079)  | Enero-2014<br>Mayo-2014                              |
| Pozo Cantera        | (2111-3-0020)  | Marzo-1989<br>Septiembre-1989                        |
| Sondeos Zorraquín   | Investigación (2111-2-0044)<br>Explotación (2111-2-0045) | Enero-2013<br>Octubre-2014                           |

#### 9.1.1. Pozo San Torcuato-1 (2111-3-0032)

Se trata del sondeo denominado Ezcaray-2 o Pozo San Torcuato-1 con número de inventario 2111-3-0032 construido en 1987. Tras su construcción se realizaron una serie de ensayos de bombeo, cuyas características se recogen a continuación.

#### Ensayo de bombeo 1

##### a) Bombeos escalonados

| Fecha   | Nivel estático inicial (m) | Escalón | t duración (minutos) | Q (L/s) | Descenso (m) |
|---------|----------------------------|---------|----------------------|---------|--------------|
| 3-11-87 | 6,16                       | 1º      | 30                   | 30      | 0,15         |
|         |                            | 2º      | 30                   | 70      | 0,4          |
|         |                            | 3º      | 30                   | 120     | 0,96         |

##### b) Bombeos a caudal constante

| Fecha             | Nivel estático inicial (m) | t duración (horas) | Q (L/s) | Descenso (m) |
|-------------------|----------------------------|--------------------|---------|--------------|
| 4-11-87 a 5-11-87 | 6,16                       | 24                 | 190     | 1,5          |

Para la obtención de los parámetros hidrodinámicos del acuífero, el cálculo de la transmisividad se llevó a cabo analizando la prueba de descensos en régimen permanente, y aplicando el método de Thiem simplificado. El valor obtenido fue de:

|                           |                                |
|---------------------------|--------------------------------|
| <b>Transmisividad (T)</b> | <b>12666 m<sup>2</sup>/día</b> |
|---------------------------|--------------------------------|

### **Ensayo de bombeo 2**

En la prueba de descensos el nivel llegó al metro 7,72 lo que supone una depresión de 1,27 m. y en la prueba en recuperación el nivel ascendió al metro 6,52, faltándole, por consiguiente, tan sólo 0,07 m. para alcanzar el nivel inicial.

| Fechas    | Nivel estático inicial (m) | t duración (horas) | Q (L/s) | Descenso (m) |
|-----------|----------------------------|--------------------|---------|--------------|
| 11-9-1989 | 6,45                       | 27                 | 142     | 1,27         |

Para el cálculo de la transmisividad se ha utilizado el método de Jacob, obteniéndose distintos valores según se interpreta el gráfico de descensos o el gráfico de recuperación de niveles tras el bombeo.

|   |                                |
|---|--------------------------------|
| <b>Transmisividad (T) (en descenso)</b>     | <b>17270 m<sup>2</sup>/día</b> |
| <b>Transmisividad (T) (en recuperación)</b> | <b>22450 m<sup>2</sup>/día</b> |
| <b>Coefficiente de almacenamiento (S)</b>   | <b>0,01</b>                    |

### **Ensayo de bombeo 3**

En septiembre de 2012 se planteó un ensayo de bombeo de dos meses en el pozo, pero sólo duró 2 días porque se creó alarma entre las poblaciones que se abastecen mediante captaciones en el aluvial del Oja, por las posibles afecciones que pudiera ocasionar el bombeo. Debido a ello, ante la duda de que se pudiera explotar el pozo de la Peña San Torcuato con el caudal que estaba previsto, y de acuerdo con las

previsiones que contemplaba el Plan Director de Abastecimiento, se propuso el estudio de varias alternativas. Las alternativas propuestas, que se llevaron a cabo, contemplaban la realización de un ensayo de bombeo para poder utilizar el sondeo de Pazuengos (2111-4-35) y la construcción de sondeos de investigación para tratar de conseguir nuevas captaciones en el acuífero Pradoluengo-Anguiano que complementen a las disponibles en la actualidad. Los emplazamientos en los que se llevó a cabo la construcción de los sondeos fueron en Zorraquín en diciembre de 2012 (2111-2-0044) y de otro sondeo en La Ermita de Allende en enero de 2013 (2111-3-0078).

### **Conclusiones de los ensayos de bombeo en el Pozo San Torcuato-1**

Del análisis de los ensayos de bombeo y de recuperación, se desprende la posible existencia de un borde positivo o de recarga. Dicho borde viene asociado en la prueba en bombeo a una rápida estabilización de niveles. En la prueba en recuperación se detecta que el pozo recuperó su nivel en un tiempo menor al teórico necesario, lo cual es solamente posible cuando ha existido una recarga de agua exterior al sistema pozo-acuífero.

En las pruebas realizadas, no fue posible determinar con suficiente exactitud, qué fracción del caudal bombeado en el pozo pertenece al río Oja, y qué fracción al almacenamiento del acuífero. Ahora bien, dados los elevados valores de transmisividad determinados para el acuífero, y la rápida estabilización de niveles que tuvieron lugar durante la realización del ensayo, se estimó que la fracción del caudal bombeado en el pozo perteneciente al río Oja era muy elevada.

Es importante indicar que los resultados de hidroquímica de las muestras tomadas durante el bombeo parecían contradecir los resultados obtenidos ya que en los análisis realizados se detectó:

- Que la calidad del agua en el sondeo era constante con el tiempo, lo que podría indicar que no se produjo una importante mezcla de aguas.
- Que no se produjo un aumento de la contaminación orgánica con el tiempo, como era de esperar en el caso de existir una importante infiltración de las aguas del río Oja, ya que en la zona del sondeo las aguas del río se encontraban, en aquella época, contaminadas por circular mezcladas con los residuos líquidos de la población de Ezcaray.

#### **9.1.2 Pozo San Torcuato-2 (2111-3-0079)**

Se trata del sondeo construido en 2013 con número de inventario 2111-3-0079 y que es el que está ahora en explotación.

#### **Ensayo de bombeo 1**

Con el objetivo de valorar la capacidad del acuífero Jurásico Inferior y las afecciones derivadas de la extracción de agua subterránea desde los pozos de San Torcuato, se llevó a cabo un ensayo de bombeo de larga duración. El pozo de explotación era el pozo San Torcuato-2 (2111-3-0079) y el pozo de observación el San Torcuato-1 (2111-3-0032). Se pretendían obtener los parámetros hidrodinámicos del acuífero entorno al pozo y determinar el porcentaje bombeado del río y del manantial a través de análisis hidroquímicos (ACUAES-Z-Amaltea, 2014). El ensayo de bombeo finalizó a los 38 días de bombeo. Posteriormente, se bombeaba de forma periódica durante varias horas al día. El ensayo se interpretó mediante un programa llamado MLU que dispone además de un algoritmo iterativo de optimización de parámetros para su ajuste.

| Fechas                | Nivel estático inicial (m) | t duración (horas) | Q (L/s) | Descenso total (m) |
|-----------------------|----------------------------|--------------------|---------|--------------------|
| 20-1-2014 a 27-2-2014 | -                          | 912                | 197     | 0,30               |

Los datos hidrodinámicos obtenidos de la interpretación del ensayo de bombeo son:

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| <b>Transmisividad (T)</b>                       | <b>3670 m<sup>2</sup>/día</b> |
| <b>Coficiente de almacenamiento (S)</b>         | <b>0.053</b>                  |
| <b>Permeabilidad horizontal (K<sub>h</sub>)</b> | <b>29 m/día</b>               |

## **Ensayo de bombeo 2**

En mayo de 2014, se plantea que, como en el anterior ensayo de bombeo de enero a marzo de 2014 llevado a cabo en el pozo San Torcuato-1, la elevada contribución del río al caudal bombeado no permitió evaluar la capacidad del acuífero explotado ni las afecciones provocadas, se debía realizar otra prueba de bombeo en época de estío. (ACUAES-Z-Amaltea, 2014 bis).

| Fechas                 | Nivel estático inicial (m) | t duración (horas) | Q (L/s) | Descenso total (m) |
|------------------------|----------------------------|--------------------|---------|--------------------|
| 20-5-2014 a 20-10-2014 | -                          | 3672               | 200     | -                  |

La recuperación se inicia el día 20 de octubre, y una hora después de parar la bomba casi se había alcanzado el nivel inicial del bombeo en el pozo de San Torcuato-2, registrándose un descenso residual de un centímetro.

Los parámetros hidrodinámicos obtenidos de la interpretación del ensayo de bombeo son:



|   |                               |
|---|-------------------------------|
| <b>Transmisividad (T)</b>                       | <b>3050 m<sup>2</sup>/día</b> |
| <b>Coefficiente de almacenamiento (S)</b>       | <b>0.05</b>                   |
| <b>Permeabilidad horizontal (K<sub>h</sub>)</b> | <b>24 m/día</b>               |

### **Conclusiones de los ensayos de bombeo en el pozo San Torcuato-2**

Con la prueba del ensayo de bombeo 1 se puso de manifiesto que existía un elevado grado de conexión del pozo con el río (el 80-89 % del volumen bombeado procedía del río) de tal manera que, las variaciones de caudal en las crecidas del río se propagan con rapidez por el acuífero hasta el pozo (a unos 50 m del río), lo que enmascaraba casi de forma inmediata los descensos del ensayo de bombeo, según la interpretación realizada.

Para el caso del ensayo de bombeo 2 de larga duración, se apuntaba lo siguiente:

- El bombeo capta un acuífero aluvial, íntimamente ligado a la dinámica del río, y un acuífero Jurásico, de carácter más regional, que es el origen principal de los caudales bombeados en los periodos de estiaje, aunque también hay una parte captada del aluvial como componente subálvea por las aportaciones de la cuenca alta del río y cuantificadas en las E.A. de Azárrulla.
- Las variaciones piezométricas de los pozos están muy influenciadas por la dinámica del río y se ha comprobado que el nivel piezométrico en el sondeo responde de forma casi inmediata al nivel del río. Es más evidente en los pozos que captan únicamente el acuífero aluvial, no obstante, también se identifica este comportamiento en los pozos que captan el acuífero Jurásico.
- No se reconocen afecciones directas al manantial de San Torcuato.
- En periodo de estiaje se ha secado el cauce del río en las inmediaciones del pozo de bombeo (a partir del 7 de agosto se secó el cauce aguas abajo del punto de bombeo, y entre el 28 de agosto y el 2 de octubre se secó aguas arriba y abajo del bombeo). Tal como atestiguan los datos históricos este comportamiento se produce de forma natural a lo largo de varios tramos del río (aguas abajo de la presa de Indiano en Ezcaray, en el puente viejo de Ojacastro o en el puente de Santurde). En la EA Azárrulla siempre se ha mantenido un caudal que se infiltra aguas abajo cuando el aluvial gana desarrollo.
- Se constata la afección a los pozos que captan el acuífero Jurásico, que registran claramente las perturbaciones de parada y arranque de la bomba.

- Sin las contribuciones del río los descensos piezométricos ocurren a mayor velocidad y de igual modo, al instaurarse de nuevo la lámina de agua del río, los niveles piezométricos recuperan rápidamente el nivel de aquel.
- El bombeo ha soportado un régimen de explotación con caudales entre 150-200 l/s durante 153 días, incluido el periodo estival. El agotamiento provocado en el acuífero Jurásico cuando el cauce está seco se recupera rápidamente en el momento que vuelve a circular agua en el río.
- Parece que a medida que los aportes del río van disminuyendo la situación se invierte y se va captando más volumen del acuífero. Se podría establecer que cuando el río está seco, el volumen extraído del acuífero jurásico podría llegar al 48% del volumen bombeado.

### 9.1.3 Pozo Cantera (2111-3-0020)

Se trata del pozo realizado en 1989 denominado Pozo Cantera o Ezcaray 3, en base al convenio establecido entre la Consejería de Obras Públicas del Gobierno de La Rioja y el Instituto Tecnológico GeoMinero de España (antiguo IGME). Tras su construcción se llevaron a cabo unas pruebas de bombeo con objeto de definir los rendimientos de dichos sondeos para su futura puesta. en explotación.

Los datos se resumen en el siguiente cuadro:

| Fechas    | Nivel estático inicial (m) | t duración (minutos) | Q (L/s) | Descenso total (m)          |
|-----------|----------------------------|----------------------|---------|-----------------------------|
| 7-3-1989  | 10.45 m                    | 200                  | 40-50   | se llegó a la bomba a 62 m  |
| 14-9-1989 | 11,30                      | 1040                 | 50-60   | se llegó a la bomba a 100 m |

Para la obtención de los parámetros hidrodinámicos y el cálculo de la transmisividad se analizaron los gráficos de descensos y de recuperación de niveles ocasionados por el bombeo.

|  |                                  |
|--|----------------------------------|
| <b>Transmisividad (T) (en descenso)</b>  | <b>15-32 m<sup>2</sup>/día</b>   |
| <b>Transmisividad (T) (recuperación)</b> | <b>416-508 m<sup>2</sup>/día</b> |

## **Conclusiones de los ensayos de bombeo en el pozo Cantera**

A efectos de cifrar la transmisividad real del acuífero se deberá dar mayor credibilidad al valor deducido de los gráficos de recuperación que al obtenido en los gráficos de descensos. Sin embargo, estos valores tampoco son del todo representativos del comportamiento observado, ya que teóricamente permitirían una explotación de 40 a 50 l/s., con depresiones máximas de 10 m., circunstancia que no se produjo puesto que los descensos fueron mucho mayores.

Todo parece indicar según se apuntaba en el comentario anterior, que el acuífero captado por este sondeo es un acuífero superficial con una transmisividad más bien alta pero que tiene un espesor muy pequeño, por lo que las depresiones a que se le puede someter son también muy pequeñas, lo que irá en detrimento de su explotación. Se estimaba que entre 40 y 50 l/s pueda estar el "punto crítico" de explotación, definiendo éste como el límite donde para pequeños incrementos de caudal, se producen descensos muy desproporcionados (ITGE, 1989)

### **9.1.4 Sondeos Zorraquín**

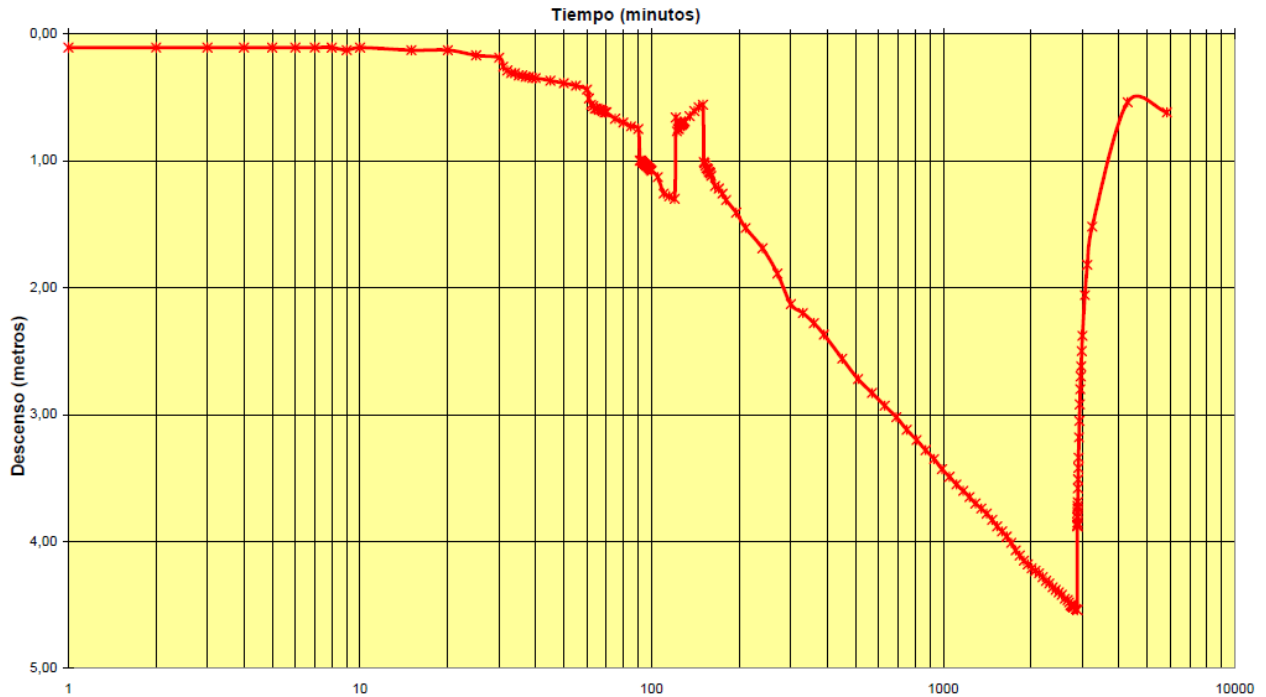
#### **Sondeo de investigación (2111-2-0044)**

Para atender las demandas del sistema Oja-Tirón mediante la extracción de agua subterránea de la Masa de Agua Subterránea 09.065 Pradoluengo-Anguiano a través de pozos de bombeo emplazados en la cabecera del Oja, el Consorcio de Aguas y Residuos de La Rioja se planteó, la perforación de un sondeo de investigación en Zorraquín (2111-2-0044) para investigar las posibilidades de explotar el acuífero Jurásico. (CARE-ZAmaltea, 2013a)

Los datos del ensayo de bombeo realizado se incluyen en el siguiente cuadro:

| <b>Fecha</b> | <b>Nivel estático inicial (m)</b> | <b>t duración (minutos)</b> | <b>Escalón</b> | <b>Q (L/s)</b> | <b>Descenso (m)</b> |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|---------------------|
| 10/1/2013    | 86,74                             | 2880                        | 1º             | 6              | 0.19                |
|              |                                   |                             | 2º             | 10             | 0.75                |
|              |                                   |                             | 3º             | 15             | 0.44                |
|              |                                   |                             | 4º             | 20             | 4.54                |

La bomba se situó a 125 m de profundidad. En el informe se indica que durante la perforación se atravesó una cavidad entre las profundidades de 126 y 134 m. Se consideró que no se llegó a producir el vaciado completo del volumen almacenado en la cavidad, ya que en ningún momento durante la prueba de bombeo los descensos estuvieron a profundidades superiores a los 92 m. Se interpretó que la duración del ensayo de bombeo no fue lo suficiente larga para estudiar las características hidrodinámicas del acuífero captado al estar constituido por fracturas y/o grandes cavidades. En la figura 9.1.4.1 se representa el gráfico de descensos y recuperación del ensayo.



**Figura 9.1.4.1 Ensayo de bombeo completo sondeo investigación Zorraquín (CARE-ZAmaltea, 2013a)**

### **Sondeo de explotación (2111-2-0045)**

Posteriormente se consideró oportuno construir un sondeo de explotación junto al sondeo de investigación descrito anteriormente. Los trabajos de construcción, desarrollo y ensayo de bombeo del pozo se llevaron a cabo desde el 18 de julio hasta el 22 de octubre de 2014. Según se indica, se perforaron 190 m de profundidad para ser prácticamente penetrante en el acuífero carbonatado de la Formación Cortes de Tajuña, ya que en el sondeo de investigación (2111-1-0044) se cortaron niveles de anhidritas a los 203 m y se pretendía evitar que afectaran a la calidad del agua. El principal aporte de agua al sondeo se observó que se realizaba en el tramo de 182 a 189m de profundidad asociada a unas calizas grises muy fisuradas. (CARE-ZAmaltea, 2013b).

### **Ensayo de bombeo 1**

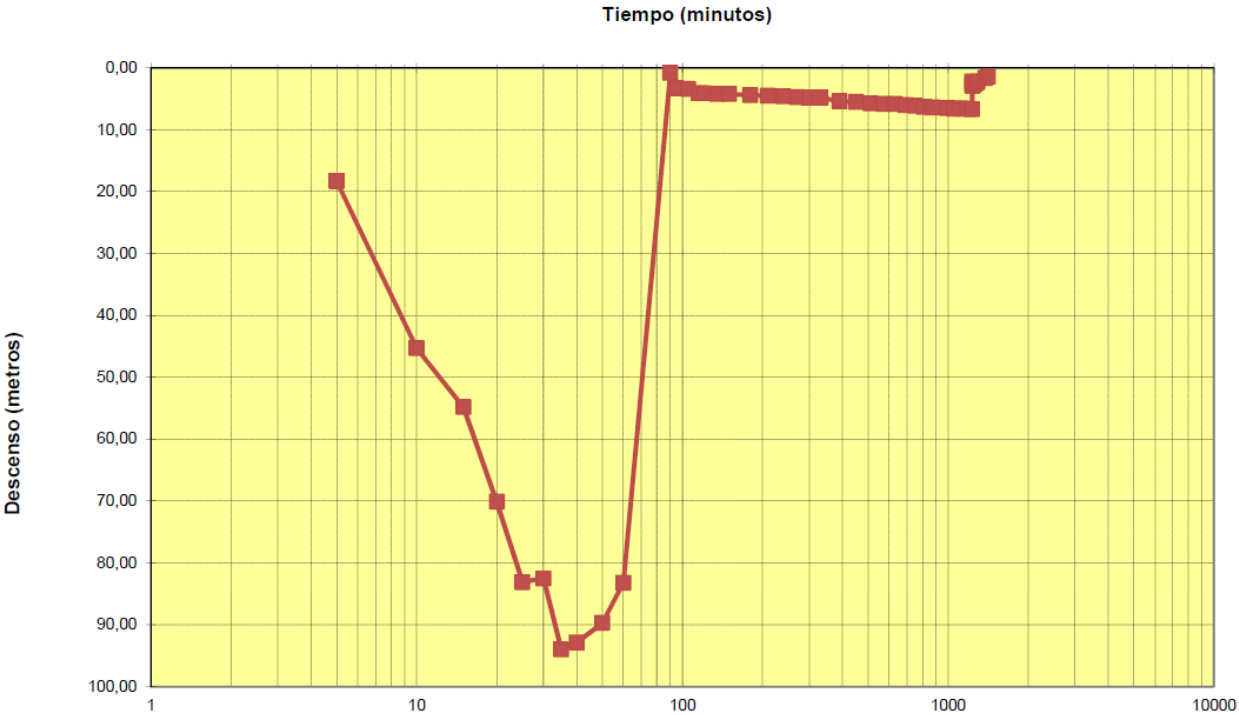
Se realiza un primer ensayo de bombeo controlando los niveles en el propio pozo y en el piezómetro (sondeo de investigación) cuyas características son las siguientes:

| Fecha     | Prof. Bomba (m) | Nivel estático inicial (m) | Nivel estático piezómetro (m) | t duración (minutos) | Escalón | Q (L/s) | Descenso pozo(m) | Descenso piezómetro (m) |
|-----------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------|---------|---------|------------------|-------------------------|
| 1/10/2014 | 174             | 77,2                       | 77,95                         | 60                   | 1°      | 25      | 3,2              | 0,69                    |
|           |                 |                            |                               | 64                   | 2°      | 50      | 8,8              | 1,69                    |
|           |                 |                            |                               | 30                   | 3°      | 75      | 27,3             | 2,57                    |
|           |                 |                            |                               | 30                   | 4°      | 100     | Aspiración       | 2,90                    |
|           |                 |                            |                               | 60                   | 5°      | 75-35   | 83,2             | 1,24                    |
|           |                 |                            |                               | 1140                 | 6°      | 30      | 6,7              | 3,53                    |

Para la obtención de los parámetros hidrodinámicos característicos de la formación acuífera, la interpretación del ensayo realizado en el pozo de explotación, se llevó a cabo mediante un programa para simulación inversa ajustando los valores medidos y los simulados. Los valores para los parámetros de ajuste fueron:

|   |                              |
|---|------------------------------|
| <b>Transmisividad (T)</b>                       | <b>570 m<sup>2</sup>/día</b> |
| <b>Coefficiente de almacenamiento (S)</b>       | <b>0.01</b>                  |
| <b>Permeabilidad horizontal (K<sub>h</sub>)</b> | <b>5 m/día</b>               |

En el último escalón de mayor duración, el descenso de niveles registrado fue lento pero continuo hasta el final del aforo, aunque con una tendencia a la progresiva disminución, como si se estuviera vaciando un depósito de grandes dimensiones.



**Figura 9.1.4.2. Gráfico descensos/tiempo de bombeo del primer ensayo de bombeo completo sondeo explotación Zorraquín. Fuente: CARE-ZAmaltea, 2013b**

**Ensayo de bombeo 2**

Tras la acidificación del sondeo, se llevó a cabo un **segundo ensayo de bombeo**.

| Fecha      | Prof. Bomba (m) | Nivel estático inicial (m) | Nivel estático piezómetro (m) | t duración (minutos) | Escalón | Q (L/s) | Descenso pozo(m) | Descenso piezómetro (m) |
|------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------|---------|---------|------------------|-------------------------|
| 11/10/2014 | 174             | 79,40                      | 78,97                         | 60                   | 1°      | 30      | 2,60             | 0,84                    |
|            |                 |                            |                               | 60                   | 2°      | 40      | 4,10             | 1,66                    |
|            |                 |                            |                               | 2760                 | 3°      | 50      | 11,70            | 9,05                    |
|            |                 |                            |                               | 30                   | 4°      | 60      | 13,20            | 9,25                    |
|            |                 |                            |                               | 30                   | 5°      | 75      | 16,10            | 9,73                    |
|            |                 |                            |                               | 30                   | 6°      | 90      | 18,89            | 9,68                    |
|            |                 |                            |                               | 30                   | 7°      | 100     | 23,40            | 10,54                   |

Los parámetros hidrodinámicos obtenidos de la interpretación de los datos obtenidos durante la prueba (figura 9.1.4.3) son los siguientes:

|   |                              |
|---|------------------------------|
| <b>Transmisividad (T)</b>                       | <b>660 m<sup>2</sup>/día</b> |
| <b>Coficiente de almacenamiento (S)</b>         | <b>0.13</b>                  |
| <b>Permeabilidad horizontal (K<sub>h</sub>)</b> | <b>6 m/día</b>               |

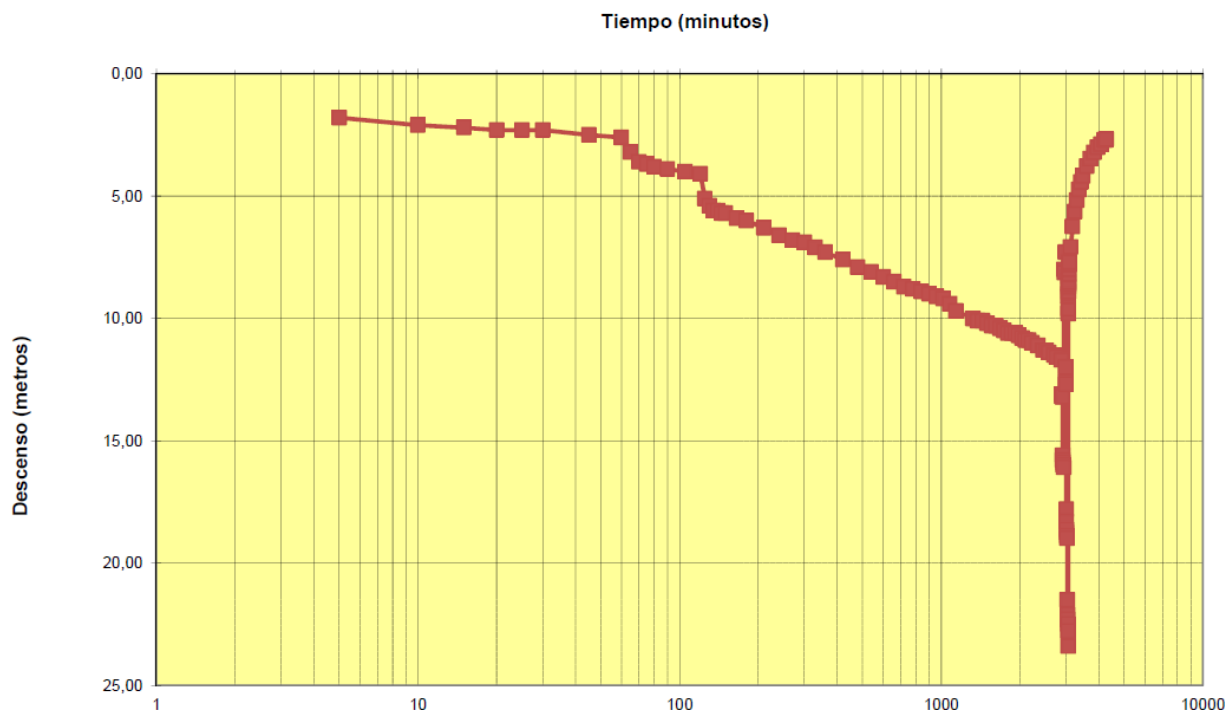


Figura 9.1.4.3. Gráfico descensos/tiempo de bombeo en el segundo ensayo de bombeo completo sondeo explotación Zorraquín. Fuente: (CARE-ZAmaltea, 2013b)

## 9.2 Parámetros hidrogeológicos del acuífero Aluvial Cuaternario

En anteriores convenios se llevaron a cabo distintos estudios cuyos objetivos eran la evaluación de la distribución espacial de la transmisividad, y del coeficiente de almacenamiento en el acuífero aluvial del río Oja (IGME, 1985). Litológicamente la unidad está formada por gravas poligénicas limpias o con matriz lutítico arenosa y cantos de tamaño muy variable, desde arenas a bolos. Según el informe realizado en 1988 por el ITGE, se realizaron ensayos de bombeo en pozos localizados en el aluvial del río Oja desde Santurde de Rioja hasta Castañares de Rioja. Estos valores obtenidos pueden servir de referencia y extrapolarse aguas arriba a la zona del núcleo de Ezcaray, aunque el desarrollo y extensión del aluvial tiene lugar principalmente pasado el frente de cabalgamiento calizo aguas debajo de la citada localidad.

Los parámetros hidrodinámicos del acuífero detrítico aluvial cuaternario obtenidos a partir de los ensayos de bombeo realizados en la zona de Santurde, más cercana a Ezcaray, se resumen en la siguiente tabla y presentan unos valores muy similares a los obtenidos en los ensayos de bombeo realizados en el sondeo San Torcuato-2.

|  |   |
|--|---|
| <b><i>Transmisividad (T)</i></b>               | <b><i>1500 - 4500 m<sup>2</sup>/día</i></b> |
| <b><i>Coficiente de almacenamiento (S)</i></b> | <b><i>0,10</i></b>                          |






## **10. NIVELACIÓN TOPOGRÁFICA DE PRECISIÓN**





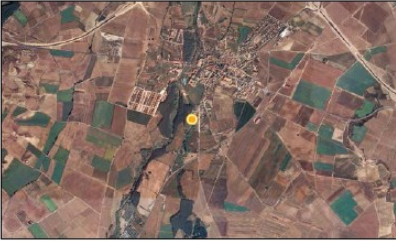

## 10. NIVELACIÓN TOPOGRÁFICA DE PRECISIÓN.

En octubre y noviembre de 2017, se llevó a cabo una campaña de nivelación con GPS de precisión de cada uno de los pozos e igualmente se realizó la nivelación del cauce del río Oja, aprovechando que estaba seco, para su utilización en el modelo de flujo y de interrelación entre aguas superficiales y subterráneas que se llevará a cabo las etapas posteriores del estudio.

El equipo empleado ha sido el receptor Triumph de la casa JAVAD. Este instrumento GPS posee capacidad de lectura y almacenamiento de la señal con una precisión milimétrica y posibilidad de trabajar en modo estático o cinemático. Los puntos de la campaña se han medido y calculado mediante GPS diferencial, empleando la metodología que se describe a continuación. El receptor móvil ha medido en cada punto en estático, utilizándose para la corrección diferencial, en postprocesado, los valores medidos en la base permanente del Gobierno de la Rioja situada en Casalarreina.

|  |   |         |                    |                                    |
|--|---|---------|--------------------|------------------------------------|
|  | <b>IDERioja ( Infraestructura de Datos Espaciales de La Rioja )</b> |         |                    | Geodesia y GPS                     |
|  |   |         |                    | Red de Estaciones Permanentes GNSS |
| Documento  | REP002  | v.1.00* | 13 de Mayo de 2009 |                                    |
| Sustituye  |   |         |                    |                                    |
| Red de Estaciones Permanentes GNSS del Gobierno de La Rioja                        |   |         |                    |                                    |

### CASALARREINA (CAS0)

|  |  |   |
|--|--|---|
| <p><b>COORDENADAS GEODÉSICAS (ETRS89)</b></p> <p>Latitud            42° 32' 37,49002" N<br/>         Longitud        2° 54' 49,60129" W<br/>         Altura elipsoidal    564,223 m</p> <p><b>COORDENADAS GEOCÉNTRICAS (ETRS89)</b></p> <p>X                    4700702,5804m<br/>         Y                    -239260,6307 m<br/>         Z                    4290677,8446m</p> <p><b>CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO</b></p> <p>Receptor            Leica GR30<br/>         Antena              LEIAR20<br/>         Observaciones    GPS, GLONASS,<br/>         GALILEO, BEIDOU.<br/>         Frecuencias        L1, L2 Y L5</p> <p><b>CÓDIGO IERS (DOME NUMBER)</b></p> <p>CAS0:                19344M001</p> |  |  |
|  |  |  |

\* Esta Nota Técnica será publicada y actualizada en sus posteriores versiones en el portal de IDERioja: [www.iderioja.org](http://www.iderioja.org)

**Figura 10.1. Características de la Estación Permanente GNSS de Casalarreina.**

El cálculo en postprocesado de las coordenadas de los puntos de la campaña se ha realizado con el software JUSTIN desarrollado por la casa Javad. El propio programa se encarga de realizar el cálculo de las correcciones diferenciales, obteniéndose las coordenadas para todos los puntos de la campaña en el sistema WGS84:

- X e Y en proyección UTM, Huso 30 norte
- altura elipsoidal.

A continuación, se realiza la transformación de altura elipsoidal a altura ortométrica, mediante el uso del programa de aplicaciones geodésicas (PAG v 1.1) del Instituto Geográfico Nacional (IGN), el cual calcula el valor del geoida en cada punto mediante el modelo EGM08 - REDNAP. Este modelo es una adaptación del modelo de geoida mundial EGM2008 del National Geospatial Intelligence Agency al sistema de referencia vertical en España (REDNAP).



**Figura. 10.2 Nivelación pozo junto al cementerio (2111-3-0037) con el receptor GPS Triump.**





**Figura 10.3 Nivelación del pozo del Parque de la margen izquierda (2111-3-0040)**

Las cotas niveladas de cada pozo son las siguientes:

| <b>N.I.P.A IGME</b> | <b>Nombre</b>          | <b>prof.(m)</b> | <b>Cota nivelada</b> | <b>Fecha nivelación</b> |
|---------------------|------------------------|-----------------|----------------------|-------------------------|
| 2111-3-0043         | vivero Urdanta         | 9,12            | -                    | -                       |
| 2111-3-0044         | medio ambiente         | 21,30           | 828,22               | 08/11/2017              |
| 2111-3-0018         | Campamento             | 6,13            | 823,47               | 08/11/2017              |
| 2111-3-0039         | Parque Tenorio         | 7,45            | 814,69               | 20/10/2017              |
| 2111-3-0042         | Parque alameda m.dcha. |                 | 817,30               | 08/11/2017              |
| 2111-3-0036         | Parking Ayto.          | 6,80            | 807,89               | 08/11/2017              |
| 2111-3-0041         | Estación               |                 | 807,39               | 08/11/2017              |
| 2111-3-0040         | Parque margen izda.    | 7,75            | 805,30               | 20/10/2017              |
| 2111-3-0037         | Cementerio             | 9,90            | 806,99               | 20/10/2017              |
| 2111-3-0045         | Josemaría              | 4,15            | -                    | -                       |
| 2111-3-0038         | Piscina municipal      | 5,90            | 801,35               | 08/11/2017              |

La nivelación del cauce del río Oja se realizó desde las cercanías del Albergue municipal (cota 823,40 m) siguiendo el cauce seco del mismo hasta las inmediaciones del km 12 de la carretera entre Ezcaray y Ojacastro (cota 790,6) con medidas en 40 estaciones. La diferencia de cota entre ambos extremos es de 32,74 m a lo largo de una distancia de unos 2450 m lo que se traduce en un porcentaje de descenso del 1,33 %.

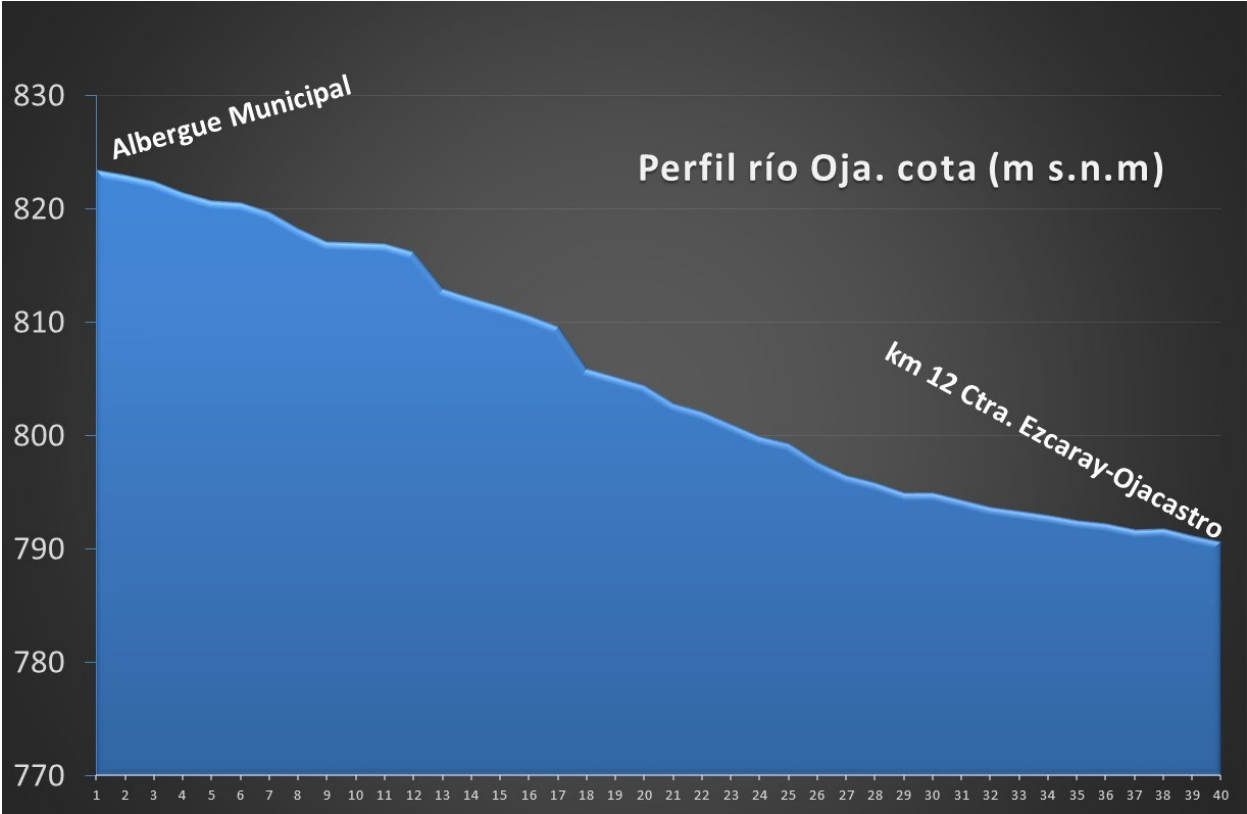


Figura 10.4 Perfil longitudinal de nivelación de precisión del cauce del río Oja realizado.





**Figura 10.5. Campaña de nivelación de precisión del cauce seco del río Oja (octubre 2017)**

Los valores corregidos obtenidos de la nivelación del cauce del río Oja correspondientes a las estaciones de medida son:

| Estación | Fecha      | Hora Comienzo |    | Hora final |    | X_utm     | Y_utm      | Cota (m s.n.m) |
|----------|------------|---------------|----|------------|----|-----------|------------|----------------|
| 18OJA5F  | 18/10/2017 | 4:28:15       | PM | 4:34:42    | PM | 498693,01 | 4684843,70 | 823,40         |
| 18OJA4   | 18/10/2017 | 4:19:34       | PM | 4:24:49    | PM | 498710,69 | 4684891,01 | 822,90         |
| 18OJA3C  | 18/10/2017 | 4:11:43       | PM | 4:17:06    | PM | 498726,96 | 4684937,00 | 822,37         |
| 18OJA2   | 18/10/2017 | 4:03:03       | PM | 4:09:38    | PM | 498743,85 | 4684984,18 | 821,38         |
| 18OJA1C  | 18/10/2017 | 3:49:24       | PM | 3:59:25    | PM | 498760,95 | 4685031,87 | 820,67         |
| 18OJA6   | 18/10/2017 | 4:42:00       | PM | 4:47:12    | PM | 498779,43 | 4685078,50 | 820,48         |
| 18OJA7C  | 18/10/2017 | 4:49:33       | PM | 4:55:56    | PM | 498795,27 | 4685123,93 | 819,66         |
| 18OJA8   | 18/10/2017 | 4:58:16       | PM | 5:04:25    | PM | 498810,50 | 4685172,60 | 818,28         |
| 18OJA9F  | 18/10/2017 | 5:07:00       | PM | 5:13:21    | PM | 498821,38 | 4685221,07 | 817,09         |
| 20OJA19  | 20/10/2017 | 10:24:15      | AM | 10:31:48   | AM | 498824,87 | 4685252,89 | 816,95         |
| 18OJA10  | 18/10/2017 | 5:19:05       | PM | 5:25:36    | PM | 498828,05 | 4685277,35 | 816,90         |
| 20OJA18  | 20/10/2017 | 10:14:50      | AM | 10:19:56   | AM | 498873,92 | 4685339,33 | 816,20         |
| 20OJA17  | 20/10/2017 | 10:03:20      | AM | 10:10:33   | AM | 498928,28 | 4685422,60 | 812,95         |
| 20OJA16  | 20/10/2017 | 9:53:52       | AM | 9:59:35    | AM | 498971,95 | 4685513,75 | 812,15         |
| 20OJA15  | 20/10/2017 | 9:45:21       | AM | 9:50:27    | AM | 499008,71 | 4685607,55 | 811,41         |
| 20OJA14  | 20/10/2017 | 9:37:15       | AM | 9:42:17    | AM | 499041,94 | 4685706,05 | 810,61         |
| 20OJA13  | 20/10/2017 | 9:28:36       | AM | 9:33:46    | AM | 499073,55 | 4685802,72 | 809,57         |
| 20OJA12  | 20/10/2017 | 9:19:22       | AM | 9:24:35    | AM | 499086,75 | 4685847,13 | 805,88         |
| 20OJA11  | 20/10/2017 | 9:07:41       | AM | 9:13:44    | AM | 499094,99 | 4685897,97 | 805,16         |
| 20OJA10  | 20/10/2017 | 8:59:02       | AM | 9:04:12    | AM | 499112,21 | 4685997,06 | 804,44         |
| 20OJA9   | 20/10/2017 | 8:50:14       | AM | 8:55:25    | AM | 499129,64 | 4686097,40 | 802,83         |
| 20OJA8   | 20/10/2017 | 8:39:10       | AM | 8:46:24    | AM | 499156,46 | 4686195,78 | 802,13         |
| 20OJA7   | 20/10/2017 | 8:29:14       | AM | 8:34:37    | AM | 499153,56 | 4686296,63 | 801,07         |
| 20OJA6   | 20/10/2017 | 8:20:50       | AM | 8:26:20    | AM | 499144,88 | 4686398,01 | 799,99         |
| 20OJA5   | 20/10/2017 | 8:09:24       | AM | 8:14:49    | AM | 499185,74 | 4686491,38 | 799,34         |
| 20OJA4   | 20/10/2017 | 8:00:10       | AM | 8:05:20    | AM | 499209,87 | 4686590,09 | 797,68         |
| 20OJA3   | 20/10/2017 | 7:50:48       | AM | 7:56:17    | AM | 499219,83 | 4686689,78 | 796,57         |
| 20OJA2   | 20/10/2017 | 7:39:08       | AM | 7:47:52    | AM | 499243,32 | 4686790,11 | 795,87         |
| 20OJA1   | 20/10/2017 | 7:30:01       | AM | 7:35:34    | AM | 499255,93 | 4686889,27 | 795,03         |
| OJA5F    | 17/10/2017 | 9:32:32       | AM | 9:43:25    | AM | 499255,56 | 4686899,93 | 794,99         |
| OJA4     | 17/10/2017 | 9:19:32       | AM | 9:29:06    | AM | 499255,60 | 4686945,83 | 794,33         |
| OJA3C    | 17/10/2017 | 9:07:16       | AM | 9:16:43    | AM | 499257,51 | 4686996,11 | 793,75         |
| OJA2     | 17/10/2017 | 8:58:14       | AM | 9:03:38    | AM | 499260,75 | 4687051,26 | 793,42         |
| OJA1     | 17/10/2017 | 8:48:11       | AM | 8:55:02    | AM | 499255,71 | 4687097,49 | 792,99         |
| OJA6     | 17/10/2017 | 9:52:40       | AM | 10:03:12   | AM | 499243,61 | 4687150,09 | 792,58         |
| OJA7C    | 17/10/2017 | 10:13:24      | AM | 10:22:52   | AM | 499226,54 | 4687196,01 | 792,26         |
| OJA8     | 17/10/2017 | 10:46:29      | AM | 10:55:58   | AM | 499210,74 | 4687249,00 | 791,79         |
| OJA9     | 17/10/2017 | 2:40:06       | PM | 2:45:06    | PM | 499215,25 | 4687294,13 | 791,83         |
| OJA10    | 17/10/2017 | 2:47:57       | PM | 2:53:42    | PM | 499249,61 | 4687328,37 | 791,21         |
| OJA11    | 17/10/2017 | 2:55:26       | PM | 3:03:26    | PM | 499276,96 | 4687369,96 | 790,66         |





Figura 10.6. Estaciones de medida para la nivelación con GPS (octubre 2017).



## **11. PIEZOMETRÍA**



## 11. PIEZOMETRÍA.

### 11.1 Piezometría del acuífero Jurásico

Se ha dispuesto de la información de profundidad de niveles de agua procedente de los inventarios existentes en los sondeos que captan el acuífero carbonatado kárstico. En la tabla 11.1.1 se recoge un resumen de los datos piezométricos disponibles. La mayoría de los datos proceden de la Confederación Hidrográfica del Ebro a través de su base de datos que recoge información piezométrica de los distintos estudios realizados anteriormente por el IGME, ensayos de bombeo y redes de medida que han estado operativas. En la zona tan sólo existe un piezómetro que se mide periódicamente por la Confederación y está situado en la ETAP de Ezcaray (2111-3-0068) Sus datos pueden ser consultados en tiempo real en la web del SAIH de la Confederación Hidrográfica del Ebro en: <http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/datos/ficha/estacion:PZ29>

A partir de 2016, el propio Consorcio de Aguas de la Mancomunidad Oja-Tirón se ha encargado de la medida de una serie de pozos y cuyos datos se disponen hasta septiembre de 2017.

Por otra parte, y de acuerdo al pliego de trabajos a realizar, la empresa Z-Amaltea se ha encargado de la instalación de:

- 2 sensores piezométricos de registro continuo (Diver) en los sondeos Cantera y Zorraquín.
- 1 sensor multiparamétrico de registro continuo de conductividad, temperatura y piezometría en Sondeo San Torcuato-1 de la marca Barodiver de Van Essen.
- Sensor de compensación de presión atmosférica (Barodiver) en oficinas de la Estación de Tratamiento de Aguas Potables (ETAP).

Previamente a su instalación han sido debidamente calibrados y programados con una cadencia de lectura programada cada quince minutos para poder observar posibles cambios piezométricos y de conductividad debidos a las variaciones en el régimen hidráulico de río.

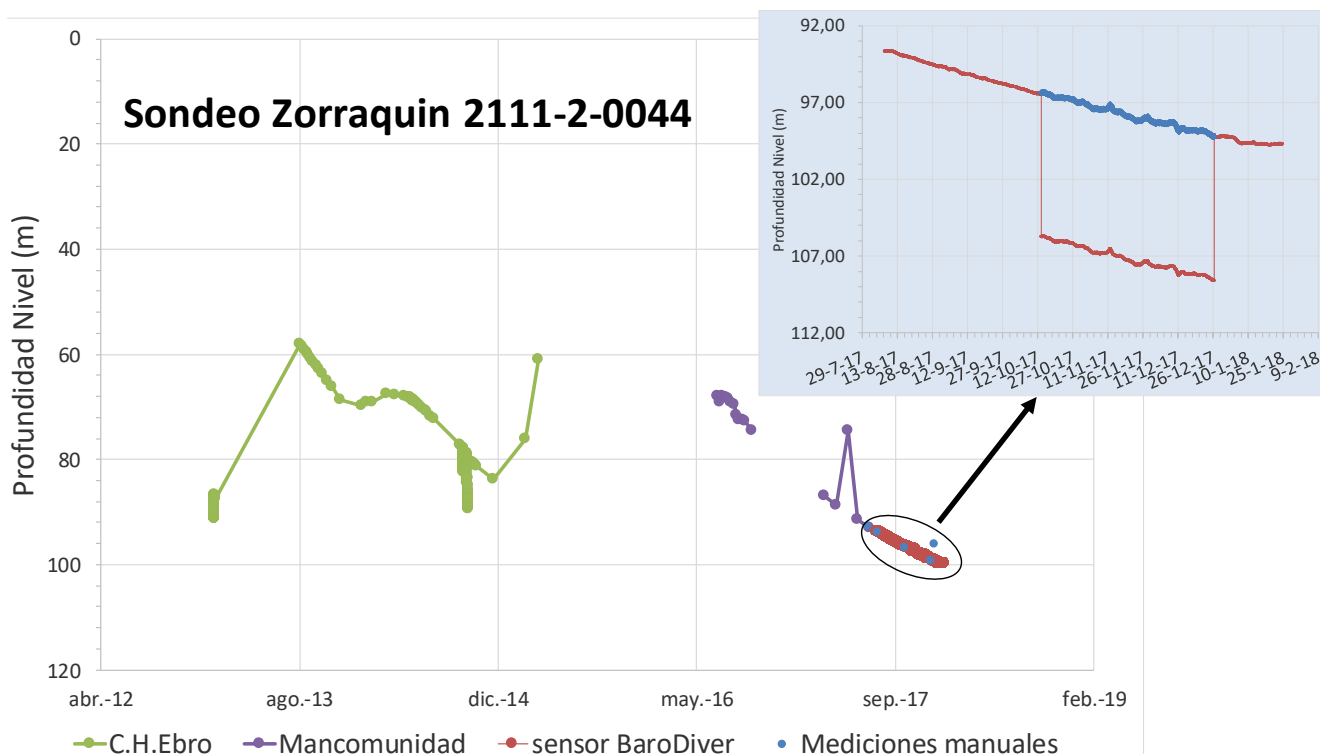
Se dispone de muy corto período de tiempo de los datos obtenidos. Los sensores fueron instalados el 7 de agosto en los sondeos Cantera y Zorraquín, y el día 24 de agosto en el Pozo de San Torcuato). El período de medida ha abarcado hasta octubre de 2017 en el Pozo San Torcuato y hasta enero de 2018 en los de Cantera y Zorraquín. Se desconoce si siguen instalados.

Los datos de niveles se han utilizado para intentar analizar los efectos de la explotación del pozo San Torcuato y, sobre todo, para su utilización en las fases de calibrado de los modelos de estimación de recursos que se realizan. En las siguientes figuras se representan todos los datos de niveles de agua existentes en los citados sondeos.

**Tabla 11.1.1 Datos piezométricos disponibles y origen de las medidas.**



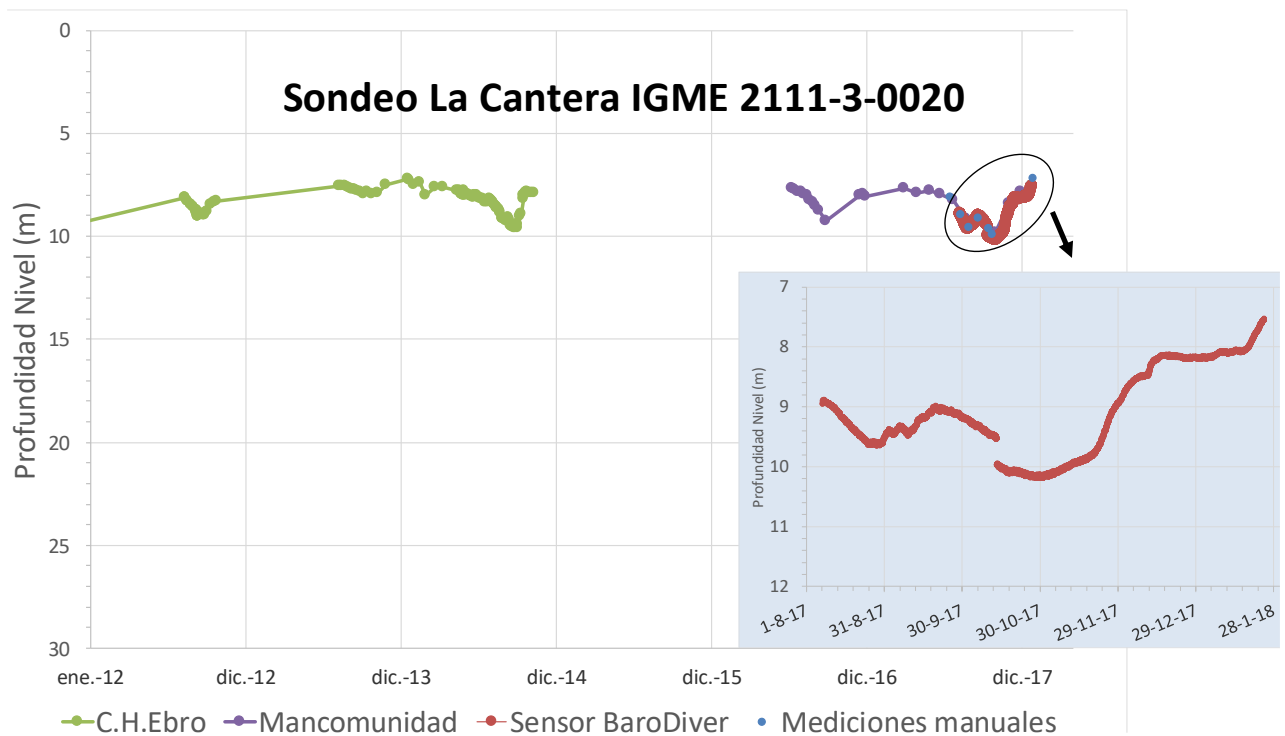
| N.I.P.A     | Nombre                                      | prof (m) | Piezometría CHEBRO      | Piezometría Mancomunidad | Instalado Sensor |
|-------------|---|----------|-------------------------|--------------------------|------------------|
| 2110-7-0149 | Sondeo superior Cantera. Gob.Rioja          | 290      | 20/05/2003 a 16/04/2014 | -                        |                  |
| 2111-2-0044 | Sondeo Zorraquin CARE GLR                   | 211      | 10/01/2013 a 07/04/2015 | 1/7/2016 a 26/9/2017     | X                |
| 2111-2-0045 | sondeo explotación Zorraquin                | 190      | 01/10/2014 a 14/10/2014 | -                        |                  |
| 2111-3-0020 | LA CANTERA. IGME. EZCARAY 3                 | 153      | 04/02/1987 a 09/11/2014 | 1/7/2016 a 26/9/2017     | X                |
| 2111-3-0032 | SAN TORCUATO 1. Pozo explotación            | 113      | 20/11/1987 a 04/11/2014 | 1/7/2016 a 26/9/2017     | X                |
| 2111-3-0068 | EZCARAY - 1. Parque maquinaria.ETAP         | 209      | 18/04/2002 a 08/09/2017 | -                        |                  |
| 2111-3-0078 | Sondeo Ermita Allende CARE GLR              | 303      | -                       | -                        |                  |
| 2111-3-0079 | Pozo Ezcaray San Torcuato 2                 | 99,5     | 19/02/2013 a 04/11/2014 | 1/7/2016 a 26/9/2017     |                  |
| 2111-4-0035 | Sondeo de Pazuengos. Camino de Santa María. | 74       | 27/10/2009 a 04/11/2014 | -                        |                  |



**Figura 11.1.1 Gráfico de evolución piezométrica del sondeo de Zorraquín (2111-2-0044)**

Los datos de profundidad de niveles de agua en el sondeo de Zorraquín se presentan influenciados por los ensayos de bombeo realizados en el pasado. Desde julio de 2016 hasta la actualidad se aprecia un descenso de niveles que reflejan la disminución de recarga por el déficit de lluvias. Se puede extrapolar, a partir de los datos del sensor que, en los 6 meses de datos correspondientes a un período amplio de escasez de

precipitaciones, el nivel ha descendido a una velocidad de 1 metro al mes, alcanzando los 100 m de profundidad. Los datos del sensor descargados en octubre de 2017, muestran un desfase atribuible a algún fallo de reinstalación tras sacarlo del sondeo para su volcado que ha sido corregido. Con un período más largo de datos podría obtenerse el coeficiente de agotamiento natural del acuífero kárstico y su capacidad de drenaje, considerándose el agotamiento de un acuífero como una función a lo largo del tiempo que depende de las propiedades hidrodinámicas del acuífero como la Transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S).



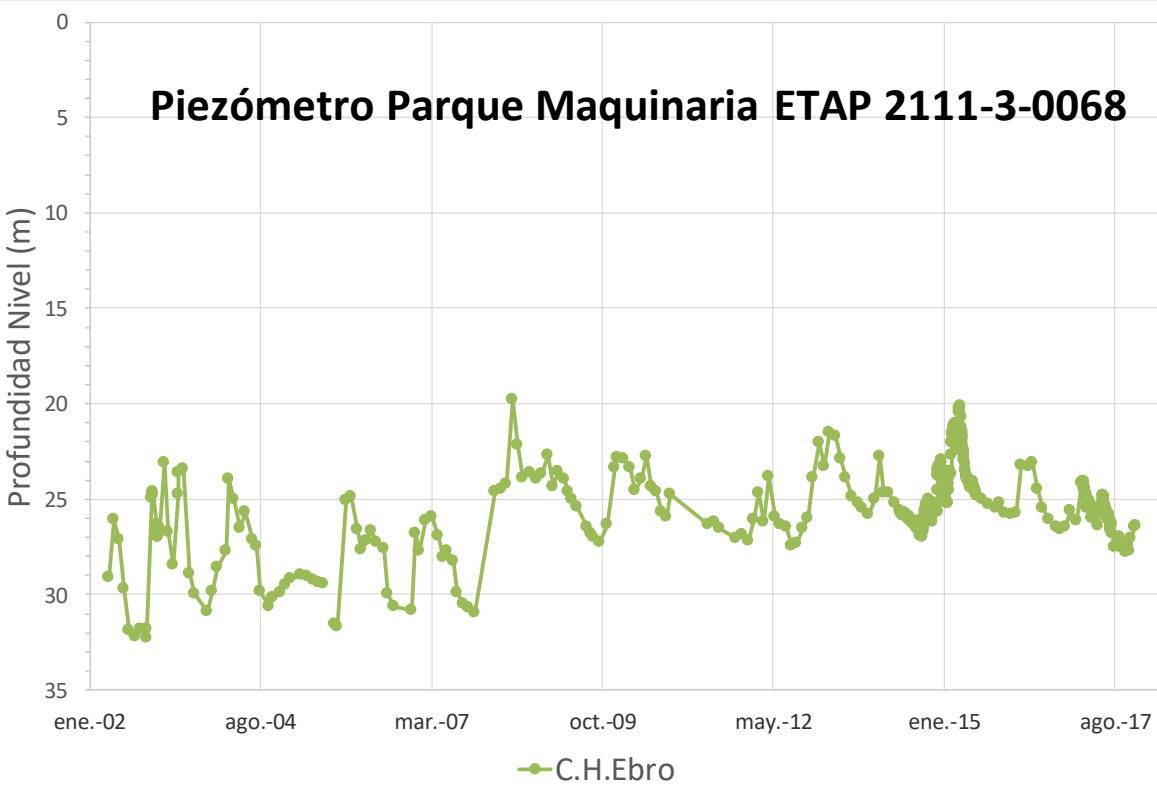
**Figura 11.1.2 Gráfico de evolución piezométrica del sondeo Cantera (2111-2-0044)**

En el sondeo de La Cantera situado en la otra margen del pozo San Torcuato a unos 500 m de distancia, la evolución de niveles desde 2012 a la actualidad apenas tiene unas variaciones de unos metros. Como en el caso anterior, también se reflejan los efectos de los ensayos de bombeo realizados en 2010 en el pozo de explotación. Desde que se disponen de datos de explotación continua del pozo San Torcuato (octubre de 2016) facilitado por el Consorcio de Aguas, la profundidad del nivel ha fluctuado entre los 8 y los 9,5 m. Los escasos datos del sensor muestran desde agosto a octubre de 2017, un ciclo de descenso, recuperación y descenso de 0,5 m. A partir finales de octubre, y coincidiendo con la circulación superficial de nuevo del río Oja, se lleva a cabo una recuperación paulatina del nivel de 2 m en dos meses, hasta mediados de diciembre, y continúa la recuperación de niveles hasta la última fecha de datos disponibles (enero de 2018).

Como se indicaba en anteriores estudios, parece que el acuífero calizo presenta una gran conexión hidráulica con el río y en definitiva con el acuífero aluvial detrítico que lo

alimenta. Por ello, aun estando en una fase de bombeo del pozo de explotación continua, parece que la recuperación de niveles a mediados de septiembre puede relacionarse con una serie de precipitaciones que tuvieron lugar en la cuenca varios días anteriores de unos 10 mm diarios, lo que mostraría una alta correlación entre el nivel y los caudales que alimentarían el aluvial circulado por el subálveo del cauce del río Oja. La recuperación de niveles en el sondeo a partir de mediados de octubre, aún continuando de forma ininterrumpida la explotación en el sondeo de San Torcuato, coincide con la recuperación de la circulación superficial del río Oja en su cauce.

Los datos de piezometría más abundantes corresponden al piezómetro situado en la ETAP y han sido los empleados en los procesos de calibración de los modelos empleados en la estimación de la recarga (Figura 11.1.3). Curiosamente se observa que existe una tendencia media de ascenso de niveles desde el 2002 hasta la actualidad.



**Figura 11.1.3 Gráfico de evolución piezométrica del piezómetro ETAP (2111-3-0068)**

En el período del que se tiene datos de volúmenes de explotación ininterrumpida en el sondeo de SanTorcuato-1 (octubre 2016-octubre 2017), el descenso total reflejado en el piezómetro es de 1,2 m (Figura 11.1.4). Se observa un descenso estacional de los niveles de junio a octubre, seguido de una recuperación de los mismos de carácter claramente estacional.

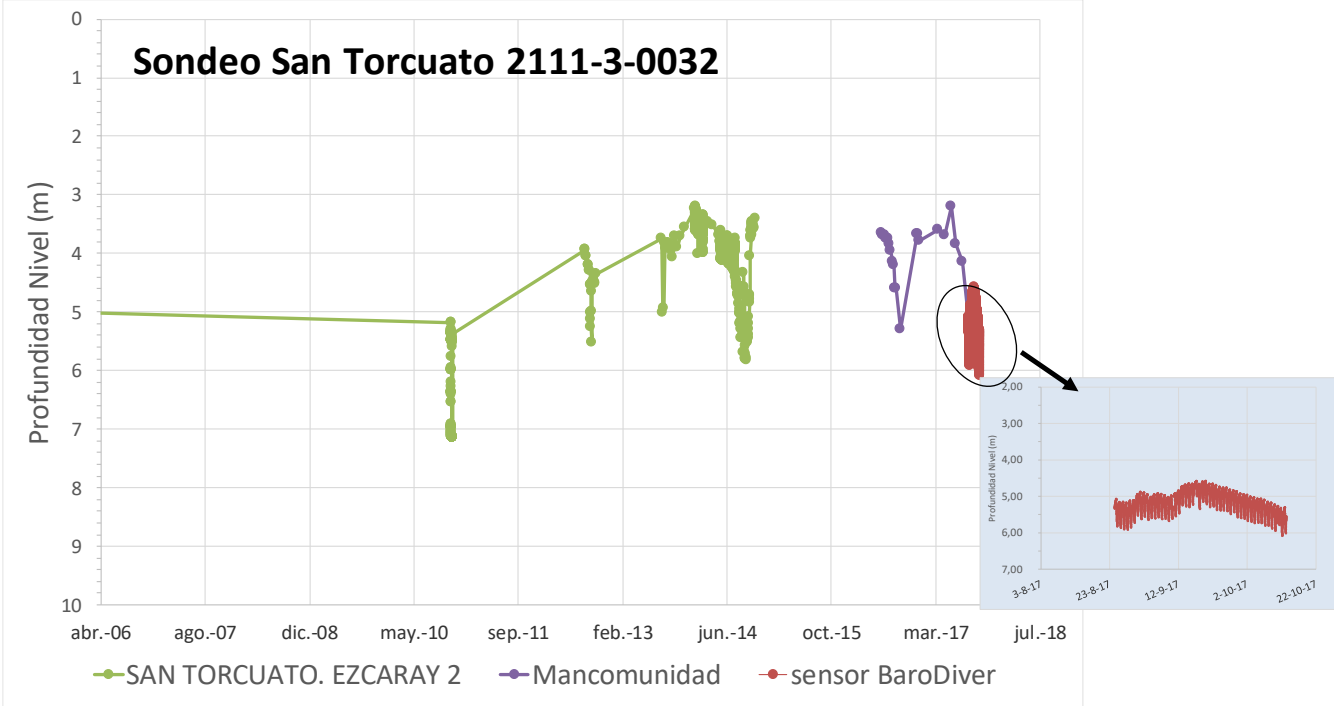


Figura 11.1.4 Evolución piezómetro ETAP. Período oct. 2016-oct.2017.



Figura 11.1.5 Piezómetro 2111-3-0068 en la ETAP de Ezcaray.

Igualmente, en los datos del propio pozo de explotación de San Torcuato-1, se evidencian los descensos provocados por los distintos períodos de explotación durante los ensayos de bombeo realizados en 2012 y 2014, y los producidos por la explotación actual por parte del Consorcio como se apunta más adelante.



**Figura 11.1.6 Gráfico de evolución piezométrica del pozo San Torcuato-1 (2111-3-0032)**

En la figura 11.1.7, en la que se recogen los datos de evolución de niveles del sensor Barodiver debidos a la explotación se refleja que, para el mismo volumen de explotación diario, la variación de niveles refleja un descenso residual en septiembre y octubre de unos 30 cm en los niveles estáticos, e incluso un ascenso de niveles a mediados del mes de septiembre, probablemente debido a lo explicado en el pozo de la Cantera. En la evolución de niveles diaria del sensor (con datos cada 15 minutos) se reflejan los descensos y recuperaciones diarias debidas a los períodos de funcionamiento y parada de la bomba. El nivel dinámico llega a deprimirse una altura de 50 cms durante el período de funcionamiento de la bomba (8 horas diarias), y al cese de la misma, el nivel se recupera totalmente hasta el siguiente ciclo de funcionamiento diario.

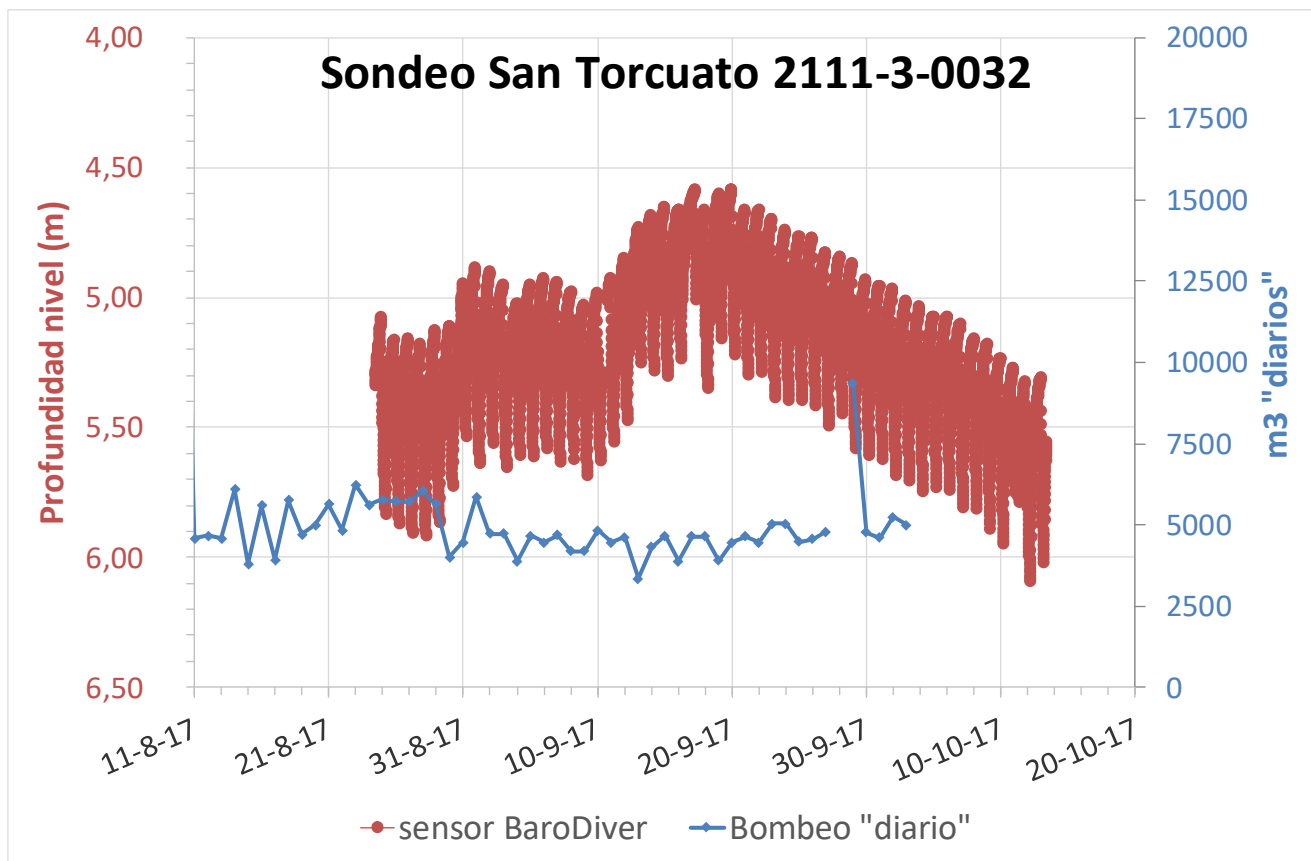


Figura 11.1.7 Evolución de la profundidad del nivel de agua en el sondeo San Torcuato-1 frente a la explotación.

### 11.2 Piezometría del acuífero cuaternario

Se ha definido una red de pozos someros para establecer un control piezométrico periódico de la posible afección que la explotación del pozo de San Torcuato puede tener sobre los pozos situados en el aluvial de los ríos Oja y Ciloría. Para ello, y una vez informado el Gobierno de La Rioja, se contactó con el Ayuntamiento de Ezcaray para la localización de posibles pozos a medir. Se ha intentado que los pozos sean de titularidad pública fundamentalmente, debido a la problemática social que existe y a la facilidad de acceso para futuras campañas. La campaña de localización y medidas se ha llevado a cabo con la colaboración del personal del Ayuntamiento de Ezcaray, en las figuras del Aparejador municipal y del Capataz del personal de mantenimiento y servicios. Los pozos disponibles se detallan en las figuras 7.4.1 y la tabla 11.2.1



**Tabla 11.2.1 Red de control piezométrico en el acuífero aluvial cuaternario**

| N.I.P.A IGME | Nombre                 | x_UTM  | y_UTM   | prof.(m) | Observaciones                                      |
|--------------|------------------------|--------|---------|----------|--|
| 2111-3-0043  | vivero Urdanta         | 498238 | 4682396 | 9,12     | Muy lejano zona de estudio                         |
| 2111-3-0044  | Medio Ambiente GLR     | 498687 | 4684591 | 21,30    | Operativo  |
| 2111-3-0018  | Campamento             | 498638 | 4684954 | 6,13     | Operativo  |
| 2111-3-0039  | Parque Tenorio         | 498904 | 4685496 | 7,45     | Operativo  |
| 2111-3-0042  | Parque alameda m.dcha. | 499003 | 4685567 | ¿?       | Necesita adecuación para poder medirse profundidad |
| 2111-3-0036  | Parking Ayto.          | 498937 | 4686091 | 6,80     | Operativo  |
| 2111-3-0041  | Estación               | 499236 | 4686154 | ¿?       | Necesario escalera o instalar tubo                 |
| 2111-3-0040  | Parque margen izda.    | 499114 | 4686176 | 7,75     | Operativo  |
| 2111-3-0037  | Cementerio             | 498841 | 4686340 | 9,90     | Operativo  |
| 2111-3-0045  | pozo Josemaría         | 499209 | 4686365 | 4,15     | Operativo  |
| 2111-3-0038  | Piscina municipal      | 499086 | 4686619 | 5,90     | Operativo  |

Las fichas de cada uno de ellos se incluyen en el apartado de Anexos. Durante las tres campañas de medias realizadas se indicaron al Ayuntamiento las deficiencias que existen en dos de ellos (el del parque Alameda en la margen derecha del río Oja y el de la antigua Estación, ambos operativos y utilizados para el riego de jardines), para su posible subsanación e inclusión en posteriores campañas de medida, puesto que no es posible introducir la sonda piezométrica. Los resultados obtenidos en las campañas se presentan en las siguientes tablas.

**Tabla 11.2.2 Primera Campaña piezométrica (18-octubre-2017)**

| N.I.P.A IGME | Nombre                 | prof.(m) | Cota nivelada      | Referencia | altura referencia (m) | Prof. Nivel (m)      | Prof. Nivel (m) suelo | Cota nivel (m) |
|--------------|------------------------|----------|--------------------|------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------|
| 2111-3-0043  | vivero Urdanta         | 9,12     | -                  | suelo      | 0,00                  | 4,78                 | 4,78                  | -              |
| 2111-3-0044  | medio ambiente         | 21,30    | 828,22             | suelo      | 0,00                  | 6,40                 | 6,40                  | 821,82         |
| 2111-3-0018  | Campamento             | 6,13     | 823,47             | rejilla    | 0,24                  | 5,34                 | 5,10                  | 818,37         |
| 2111-3-0039  | Parque Tenorio         | 7,45     | 814,69             | suelo      | 0,00                  | 3,87                 | 3,87                  | 810,82         |
| 2111-3-0042  | Parque alameda m.dcha. | ¿?       | 817,30             |            |                       | 3,97                 | 3,97                  | 813,33         |
| 2111-3-0036  | Parking Ayto.          | 6,80     | 807,89             | suelo      | 0,00                  | 6,00                 | 6,00                  | 801,89         |
| 2111-3-0041  | Estación               | ¿?       | 807,39             | suelo      | 0,00                  |                      |                       |                |
| 2111-3-0040  | Parque margen izda.    | 7,75     | 805,30             | chapa      | -1,55                 | 4,40                 | 5,95                  | 799,35         |
| 2111-3-0037  | Cementerio             | 9,90     | 806,99             | brocal     | 0,47                  | 9,60                 | 9,13                  | 797,86         |
| 2111-3-0045  | Josemaría              | 4,15     | 803 <sup>(*)</sup> | suelo      | 0,00                  | 4,15 <sup>(**)</sup> | 4,15                  | 798,85         |
| 2111-3-0038  | Piscina municipal      | 5,90     | 801,35             | suelo      | 0,00                  | 5,9 <sup>(**)</sup>  | 5,90                  | 795,45         |

(\*) Cota estimada. No se ha podido nivelar con GPS de precisión. (\*\*) Profundidad del nivel freático mínima medible al estar el pozo seco en la fecha de la campaña de medida.



**Figura 11.2.1. Medida de nivel en pozo Medio Ambiente GLR (2111-3-44) el 18-10-2017**



**Figura 11.2.2 Medida de nivel en pozo de la piscina municipal (2111-3-38) el 18-10-2017**

En la figura 11.2.3 se presenta el mapa de isopiezas (líneas isopiezométricas o equipotenciales que unen puntos con el mismo nivel de agua) del acuífero aluvial con los datos de nivel disponibles en la campaña de octubre.



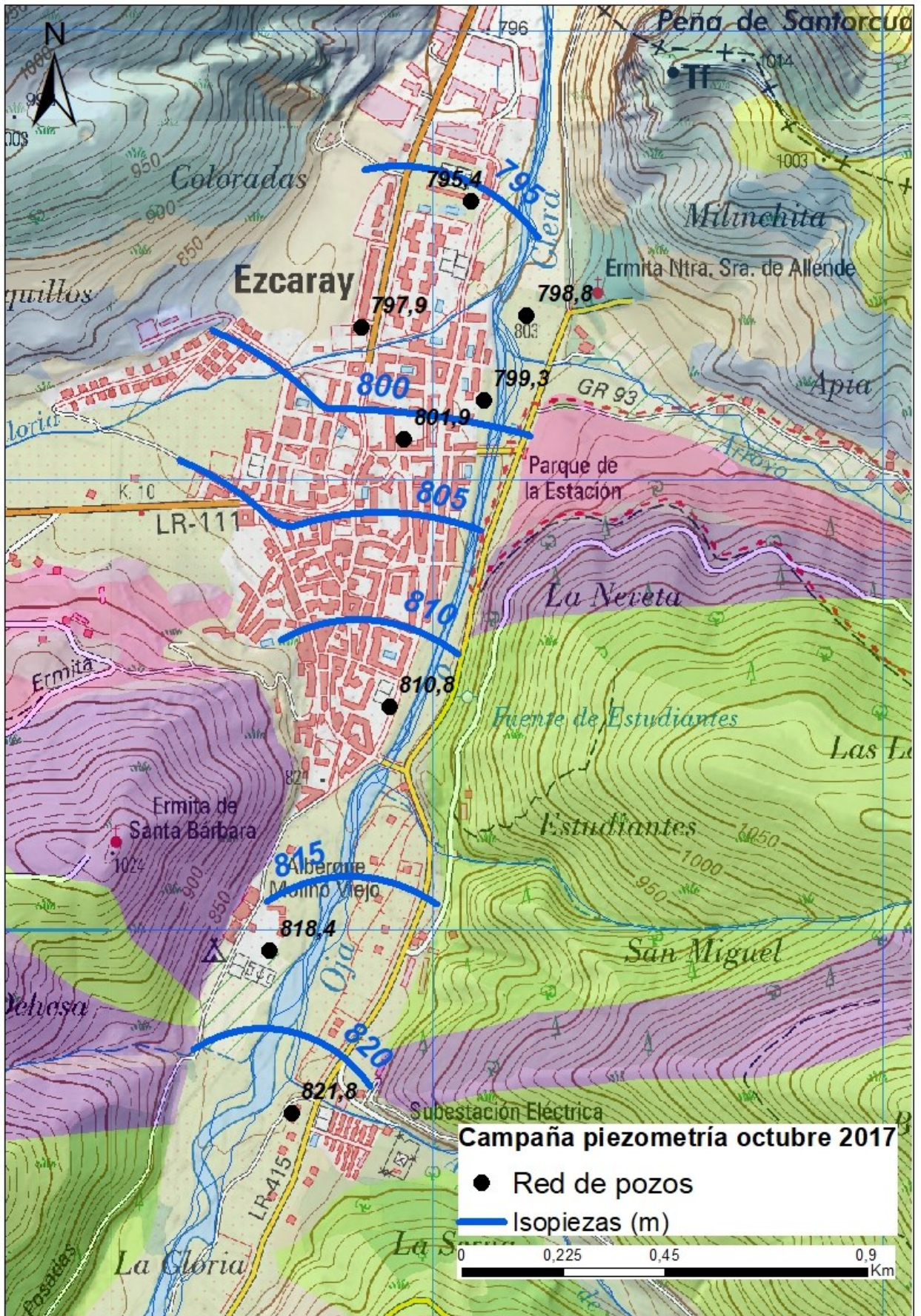


Figura 11.2.3 Mapa de isopiezas acuífero aluvial cuaternario del río Oja



**Tabla 11.2.3 Segunda campaña piezométrica (8-noviembre-2017)**

| N.I.P.A IGME | Nombre                        | prof.(m) | Cota nivelada      | Referencia | altura referencia (m) | Prof. Nivel (m)      | Prof. Nivel (m) suelo | Cota nivel (m) |
|--------------|-------------------------------|----------|--------------------|------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------|
| 2111-3-0044  | medio ambiente                | 21,30    | 828,22             | suelo      | 0,00                  | 5,90                 | 5,90                  | 822,32         |
| 2111-3-0018  | Campamento                    | 6,13     | 823,47             | rejilla    | 0,24                  | 4,76                 | 4,52                  | 818,95         |
| 2111-3-0039  | Parque Tenorio                | 7,45     | 814,69             | suelo      | 0,00                  | 3,36                 | 3,36                  | 811,33         |
| 2111-3-0042  | <i>Parque alameda m.dcha.</i> |          | 817,30             |            |                       | 3,39                 | 3,39                  | 813,91         |
| 2111-3-0036  | Parking Ayto.                 | 6,80     | 807,89             | suelo      | 0,00                  | 5,32                 | 5,32                  | 802,57         |
| 2111-3-0041  | Estación                      |          | 807,39             | suelo      | 0,00                  |                      |                       |                |
| 2111-3-0040  | Parque margen izda.           | 7,75     | 805,30             | chapa      | -1,55                 | 3,81                 | 5,36                  | 799,94         |
| 2111-3-0037  | Cementerio                    | 9,90     | 806,99             | brocal     | 0,47                  | 9,17                 | 8,70                  | 798,29         |
| 2111-3-0045  | Josemaría                     | 4,15     | 803 <sup>(*)</sup> | suelo      | 0,00                  | 4,15 <sup>(**)</sup> | 4,15                  | 798,85         |
| 2111-3-0038  | Piscina municipal             | 5,90     | 801,35             | suelo      | 0,00                  | 5,9 <sup>(**)</sup>  | 5,90                  | 795,45         |

(\*) Cota estimada. No se ha podido nivelar con GPS de precisión. (\*\*) Profundidad del nivel freático mínima medible al estar el pozo seco en la fecha de la campaña de medida.

En esta campaña no se midió en pozo del vivero de Urdanta por considerarse muy alejado de la zona de posible afección en el acuífero cuaternario próximo a la explotación. Los pozos de la Piscina municipal y de Josemaría continuaban secos (en el caso de éste último probablemente debido a la poca profundidad del mismo).



**Figura 11.2.4. Medida de nivel en pozo Parking Ayuntamiento (2111-3-36) el 8-11-2017**

**Tabla 11.2.4 Tercera campaña piezométrica (20-diciembre-2017)**

| N.I.P.A IGME | Nombre                 | prof.(m) | Cota nivelada      | Referencia | altura referencia (m) | Prof. Nivel (m) | Prof. Nivel (m) suelo | Cota nivel (m) |
|--------------|------------------------|----------|--------------------|------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|----------------|
| 2111-3-0044  | medio ambiente         | 21,30    | 828,22             | suelo      | 0,00                  | 1,58            | 1,58                  | 826,64         |
| 2111-3-0018  | Campamento             | 6,13     | 823,47             | rejilla    | 0,24                  | 1,38            | 1,14                  | 822,33         |
| 2111-3-0039  | Parque Tenorio         | 7,45     | 814,69             | suelo      | 0,00                  | 1,58            | 1,58                  | 813,11         |
| 2111-3-0042  | Parque alameda m.dcha. | ¿?       | 817,30             | suelo      | 0,00                  | 1,72            | 1,72                  | 815,58         |
| 2111-3-0036  | Parking Ayto.          | 6,80     | 807,89             | suelo      | 0,00                  | 3,01            | 3,01                  | 804,88         |
| 2111-3-0041  | Estación               | ¿?       | 807,39             | suelo      | 0,00                  | -               | -                     | -              |
| 2111-3-0040  | Parque margen izda.    | 7,75     | 805,30             | chapa      | -1,55                 | 2,15            | 3,70                  | 801,60         |
| 2111-3-0037  | Cementerio             | 9,90     | 806,99             | brocal     | 0,47                  | 7,01            | 6,54                  | 800,45         |
| 2111-3-0045  | Josemaría              | 4,15     | 803 <sup>(*)</sup> | suelo      | 0,00                  | -               | -                     |                |
| 2111-3-0038  | Piscina municipal      | 5,90     | 801,35             | suelo      | 0,00                  | 3,84            | 3,84                  | 797,51         |



**Figura 11.2.6 Medida de nivel en pozo Parque Tenorio (2111-3-39) el 20-12-2017**

La evolución de niveles entre las dos primeras campañas (octubre y noviembre) indica una recuperación del orden de 0,5 metros como media (tabla 11.2.5). El cauce del río Oja seguía seco en ambas campañas y la explotación del pozo de San Torcuato continuaba al mismo ritmo desde su puesta en funcionamiento, aunque se habían producido unos días de lluvia en la cuenca a finales del mes de octubre, lo que unido al carácter muy permeable del acuífero aluvial cuaternario ha provocado este ascenso del nivel freático.

**Tabla 11.2.5 Evolución de niveles medidos en las campañas de octubre y noviembre de 2017.**

| N.I.P.A IGME | Nombre                 | Oct-2017              | Nov-2017              | EVOLUCIÓN                  |
|--------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
|              |                        | Prof. Nivel (m) suelo | Prof. Nivel (m) suelo | Diferencia Prof. Nivel (m) |
| 2111-3-0044  | medio ambiente         | 6,40                  | 5,9                   | 0,50 (↑)                   |
| 2111-3-0018  | Campamento             | 5,10                  | 4,52                  | 0,58 (↑)                   |
| 2111-3-0039  | Parque Tenorio         | 3,87                  | 3,36                  | 0,51 (↑)                   |
| 2111-3-0042  | Parque alameda m.dcha. | 3,97                  | 3,39                  | 0,58 (↑)                   |
| 2111-3-0036  | Parking Ayto.          | 6,00                  | 5,32                  | 0,68 (↑)                   |
| 2111-3-0041  | Estación               | -                     | -                     | -                          |
| 2111-3-0040  | Parque margen izda.    | 5,95                  | 5,36                  | 0,59 (↑)                   |
| 2111-3-0037  | Cementerio             | 9,13                  | 8,7                   | 0,43 (↑)                   |
| 2111-3-0045  | Josemaría              | 4,15 (**)             | 4,15 (**)             | 0 (=)                      |
| 2111-3-0038  | Piscina municipal      | 5,9 (**)              | 5,9 (**)              | 0 (=)                      |

(\*\*) Profundidad del nivel freático mínima medible al estar el pozo seco en la fecha de la campaña de medida (coincide con la profundidad del pozo).

Igualmente se observa un ascenso continuado de los niveles freáticos en el acuífero aluvial entre noviembre y diciembre de más de 1,5 m. de media en cada pozo. En esta ocasión la recuperación observada a lo largo del tiempo corresponde con la circulación del agua subsuperficial tanto por el subálveo formado por el acuífero aluvial cuaternario, como por el cauce circulante de los ríos Oja y Ciloría. Por otra parte, y como se apuntó anteriormente, con las medidas tomadas en los pozos seleccionados en las tres campañas y su evolución, parece indicarse que no existe una afección clara y directa establecida por la explotación continuada del pozo San Torcuato. El efecto de las fluctuaciones estacionales en los pozos someros que captan el acuífero aluvial cuaternario asociado a los ríos Oja y Ciloría parecen estar más influenciadas por la escasez de aguas superficiales circulantes en épocas de estío y a la alta permeabilidad de las formaciones detríticas del acuífero, lo que determina que los pozos más someros (de profundidades menores de 5-6 metros) se encuentren secos.



La evolución total en el período de octubre a diciembre de 2017, representa un período de ascenso de niveles freáticos en el acuífero aluvial que, además, coincide con una explotación continuada en el tiempo del sondeo de abastecimiento de San Torcuato y con un período climático interanual más seco que la media. El ascenso total en los casi cuatro meses del período entre campañas es superior a los 2 metros de media. Esta recuperación de niveles en el acuífero aluvial en otoño, independientemente de la explotación en el pozo San Torcuato, debe ser controlada de una manera más detallada hacia la época de descensos estacionales en primavera-verano. Por ello, se recomienda monitorizar alguno de los pozos medidos más representativos durante un período interanual para poder establecer la existencia o no de una relación inequívoca de afecciones por la explotación, más allá de las fluctuaciones estacionales del nivel freático.

**Tabla 11.2.6 Evolución de niveles entre las tres campañas de medidas realizadas.**

| Nombre              | Oct-2017                 | Nov-2017                 | EVOLUCIÓN<br>oct-nov             | Dic-2017                 | EVOLUCIÓN<br>nov-dic             | EVOLUCIÓN                       |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
|                     | Prof. Nivel<br>(m) suelo | Prof. Nivel<br>(m) suelo | Diferencia<br>Prof. Nivel<br>(m) | Prof. Nivel<br>(m) suelo | Diferencia<br>Prof. Nivel<br>(m) | DIFERENCIA TOTAL<br>(m) oct-dic |
| Sondeo M.Ambiente   | 6,40                     | 5,9                      | 0,50 (↑)                         | 1,58                     | 4,32 (↑)                         | <b>+ 4,82</b>                   |
| Campamento          | 5,10                     | 4,52                     | 0,58 (↑)                         | 1,14                     | 3,38 (↑)                         | <b>+ 3,96</b>                   |
| Parque Tenorio      | 3,87                     | 3,36                     | 0,51 (↑)                         | 1,58                     | 1,78 (↑)                         | <b>+ 2,29</b>                   |
| P.Alameda m.dcha.   | 3,97                     | 3,39                     | 0,58 (↑)                         | 1,72                     | 1,67 (↑)                         | <b>+ 2,25</b>                   |
| Parking Ayto.       | 6,00                     | 5,32                     | 0,68 (↑)                         | 3,01                     | 2,31 (↑)                         | <b>+ 2,99</b>                   |
| Estación            | -                        | -                        | -                                | -                        | -                                | -                               |
| Parque margen izda. | 5,95                     | 5,36                     | 0,59 (↑)                         | 3,7                      | 1,66 (↑)                         | <b>+ 2,25</b>                   |
| Cementerio          | 9,13                     | 8,7                      | 0,43 (↑)                         | 6,54                     | 2,16 (↑)                         | <b>+ 2,59</b>                   |
| pozo Josemaría      | 4,15 <sup>(**)</sup>     | 4,15 <sup>(**)</sup>     | 0 (=)                            | -                        | -                                | -                               |
| Piscina municipal   | 5,9 <sup>(**)</sup>      | 5,9 <sup>(**)</sup>      | 0 (=)                            | 3,84                     | 2,06 (↑)                         | <b>+ 3,84</b>                   |

## **12. HIDROQUÍMICA**



## 12. HIDROQUÍMICA

Durante las campañas de campo para la identificación de puntos acuíferos de manantiales en la zona de estudio, se tomaron muestras de agua para su posterior análisis físico-químico en los laboratorios del IGME, que han ayudado a establecer distintas facies hidroquímicas atendiendo a las litologías principales de los acuíferos drenados en cada caso (Tabla 12.1 y Figura 7.2.1)

**Tabla 12.1 Campañas de muestreo de agua en manantiales**

| Nombre (nº muestra)      | Nº inventario | Fecha muestreo | Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ ) | Formación geológica principal asociada             |
|--------------------------|---------------|----------------|------------------------------------|--|
| Tres Fuentes (11)        | 2111-2-001    | 24-11-2027     | 408                                | Calizas tableadas. Jurásico inferior               |
| Los Trapos               | 2110-7-138    | 24-11-2017     | 423                                |  |
| Cuezo Masoga (9)         | -             | 14-11-2017     | 78                                 |  |
| Fuente de La Dehesa (7)  | -             | 14-11-2017     | 380                                |  |
| Fuente de Anguta (8)     | -             | 14-11-2017     | 327                                |  |
| Fuente Las Señoritas (6) | -             | 14-11-2017     | 550                                | Areniscas. Triásico-Buntsandstein                  |
| Manantial en Ciloría (5) | 2111-2-013    | 14-11-2017     | 342                                | Calizas. Triásico-Munschelkalk                     |
| Untetas (10)             | 2111-4-034    | 15-11-2017     | 490                                | Calizas y yesos. Jurásico inferior-Triásico Keuper |
| Correlagua (2)           | -             | 14-11-2027     | 1637                               | Lutitas y yesos. Triásico. Keuper                  |
| Azulla (3)               | -             | 15-11-2017     | 768                                |  |
| Nacedero río Turza (4)   | -             | 15-11-2017     | 814                                |  |
| Fuente abto. a Turza (1) | 2111-3-051    | 15-11-2017     | 86                                 | Pizarras. Cámbrico                                 |

De acuerdo a las facies hidroquímicas obtenidas en el diagrama de Piper se han identificado las siguientes familias de aguas debido a la mineralización característica de la litología de las formaciones geológicas acuíferas atravesadas:

- Aguas Bicarbonatadas cálcico-magnésicas de muy baja mineralización (conductividades  $< 100 \mu\text{S/cm}$ ) asociadas al contacto de las Pizarras del Cámbrico con el cinturón carbonatado, como las de la Fuente de Turza que se usa para su abastecimiento.
- Aguas Sulfatadas-bicarbonatadas cálcicas muy mineralizadas (conductividades  $> 800 \mu\text{S/cm}$ ) y que presentan una influencia de los materiales evaporíticos formados por lutitas y yesos del Keuper de edad Triásico. Las fuentes de Correlagua, Azulla y Untetas se sitúan en el cinturón carbonatado jurásico de la

margen derecha del río Oja, donde las intercalaciones de materiales triásicos son más abundantes.

- Aguas bicarbonatadas-sulfatadas menos mineralizadas que las anteriores, correspondientes a litologías formadas por areniscas de edad triásicas del Buntsandstein como las asociadas al nacimiento de la Fuente de las Señoritas y, por litologías correspondientes a calizas triásicas del Munschelkalk como la surgencia kárstica en el río Ciloría.
- Aguas exclusivamente bicarbonatadas cálcicas características del acuífero calizo Jurásico masivo de la margen izquierda del río Oja drenado por pequeños manantiales a distintas cotas siendo el más importante el de Tres Fuentes de Valgañón (conductividades  $\pm 400 \mu\text{S/cm}$ ).

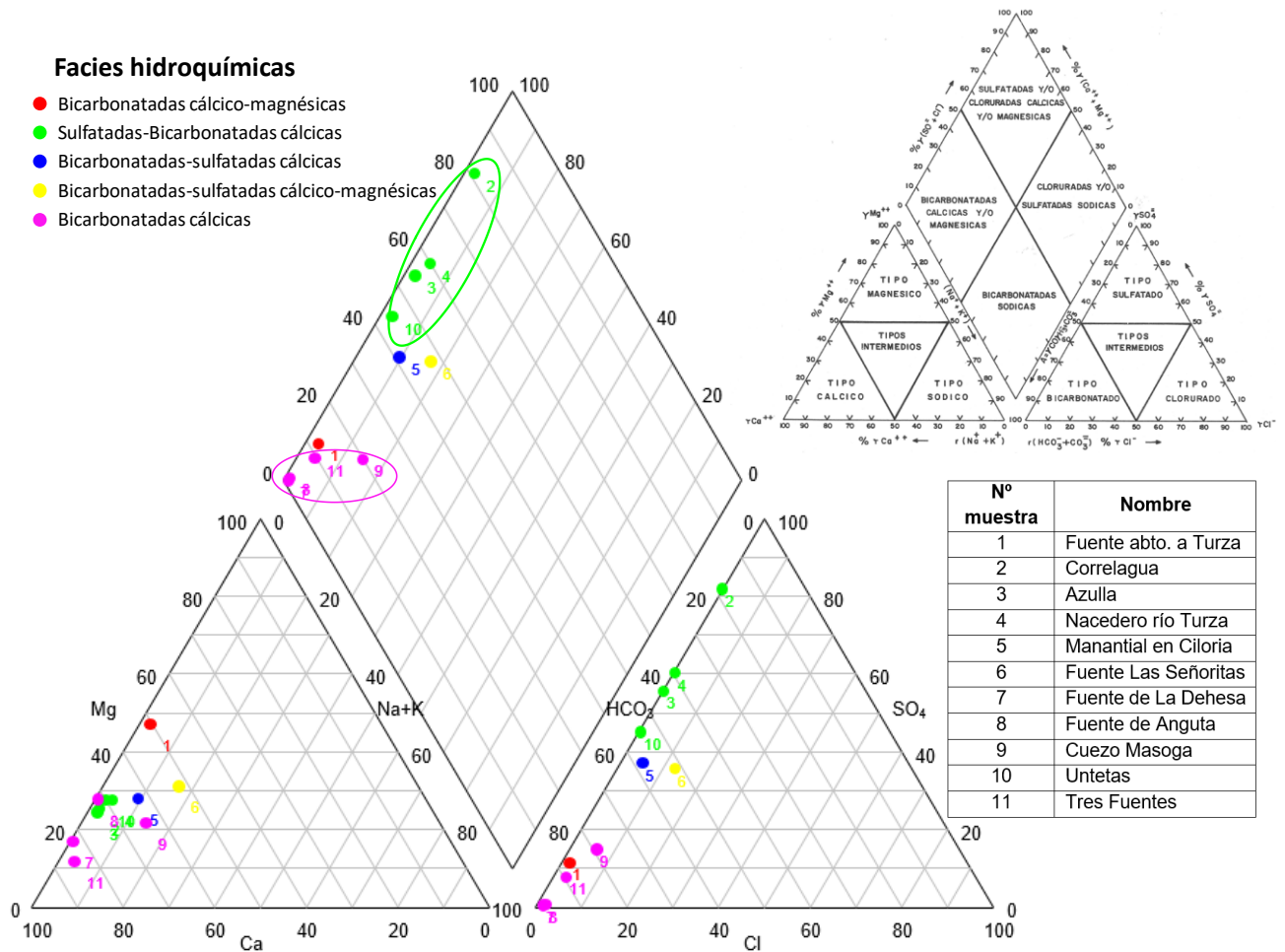


Figura 12.1 Diagrama de Piper de facies hidroquímicas.

En otras muestras tomadas por el IGME en el transcurso de este estudio se distinguen de igual manera las aguas del acuífero kárstico (bicarbonatadas cálcicas con conductividades del orden de 400-500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) de las aguas propias del río Oja y del acuífero aluvial asociado con menores contenidos en calcio y magnesio, menor mineralización y conductividades inferiores a 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (ver figura 12.2)

| Nombre                            | Fecha toma | Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$ |
|-----------------------------------|------------|---------------------------------------|
| E.A. Azarrulla                    | 19/07/2017 | 44                                    |
| Tres Fuentes de Valgañón          | 19/07/2017 | 456                                   |
| Oja-Depuradora                    | 19/07/2017 | 173                                   |
| Surgencia nº1 Oja (kárstico)      | 14/09/2017 | 590                                   |
| Surgencia nº2 Oja (superficiales) | 14/09/2017 | 290                                   |

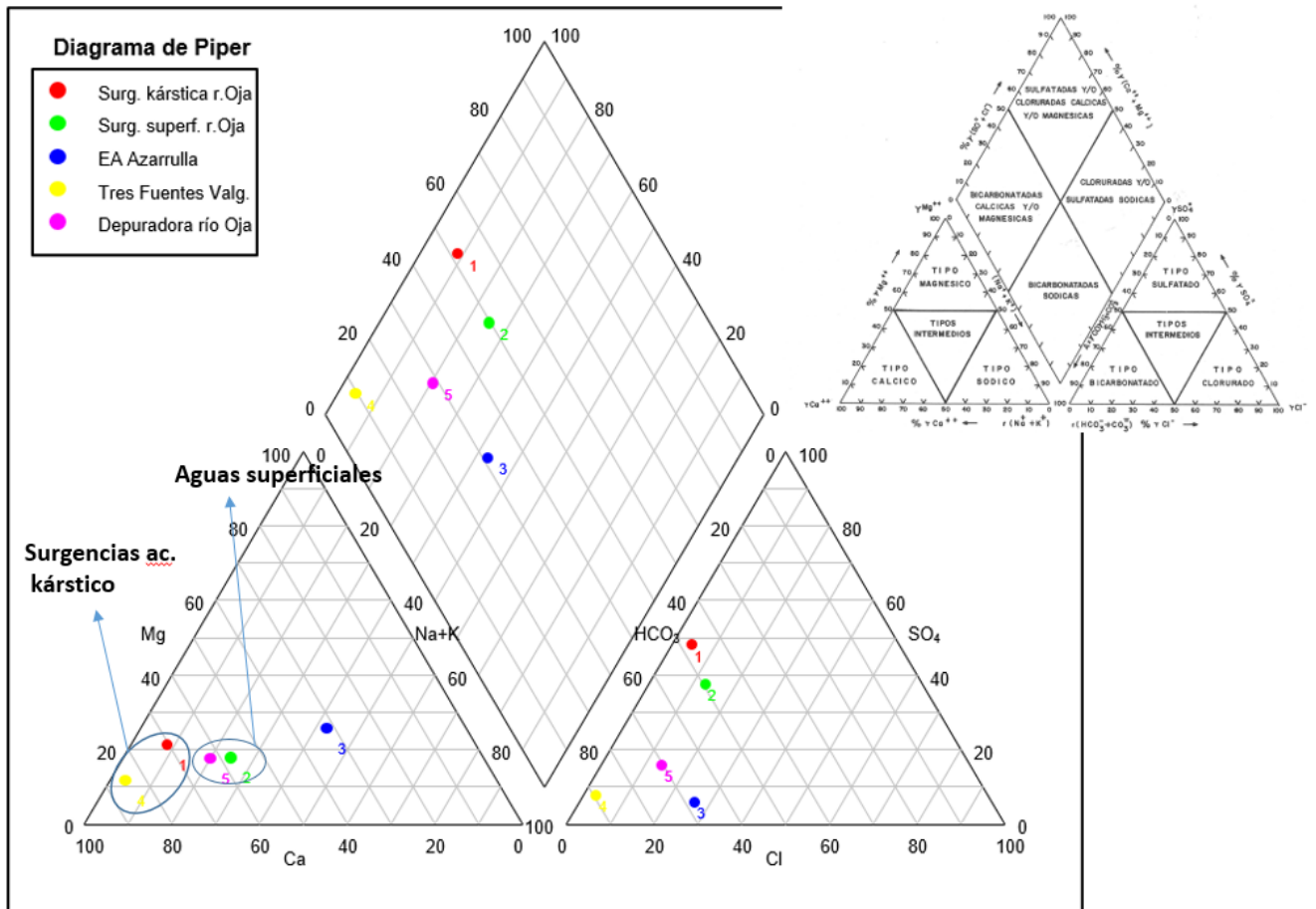


Figura 12. 2





Figura 12.3 Esquema de la surgencia kárstica al cauce del río Oja (septiembre 2017)



Se ha podido identificar, a pesar de la época de estío y de que el cauce del río está totalmente seco y de la explotación a través del pozo de San Torcuato, una surgencia de agua, asociada a la descarga del acuífero carbonatado, aguas abajo del pozo de extracción de San Torcuato (Ver figuras 12.3 a 12.6). Está relacionada probablemente con el antiguo manantial de abastecimiento a Ojacastro (Los Trapos), situado en la margen izquierda del río en el contacto entre las calizas y los conglomerados del Terciario. En esta zona también existían rezumes o surgencias que se recogían en pequeñas acequias y se juntaban con las aguas superficiales derivadas del río cuando éste lleva suficiente caudal. Como se observa en la figura, se distinguen las aguas provenientes del drenaje del acuífero kárstico de las que surgen en el cauce provenientes del retorno de la EDAR y las que, por diferencia de cota en el cauce, afloran en superficie y que discurren subsuperficialmente. La mezcla de ambas alcanzaba un caudal de unos 40 l/s que circulan aguas abajo y se infiltraban de nuevo antes de la desviación de la acequia de Ojacastro.



**Figura 12.4. Zona de inicio surgencias superficiales. Margen derecho (15-09-2017)**



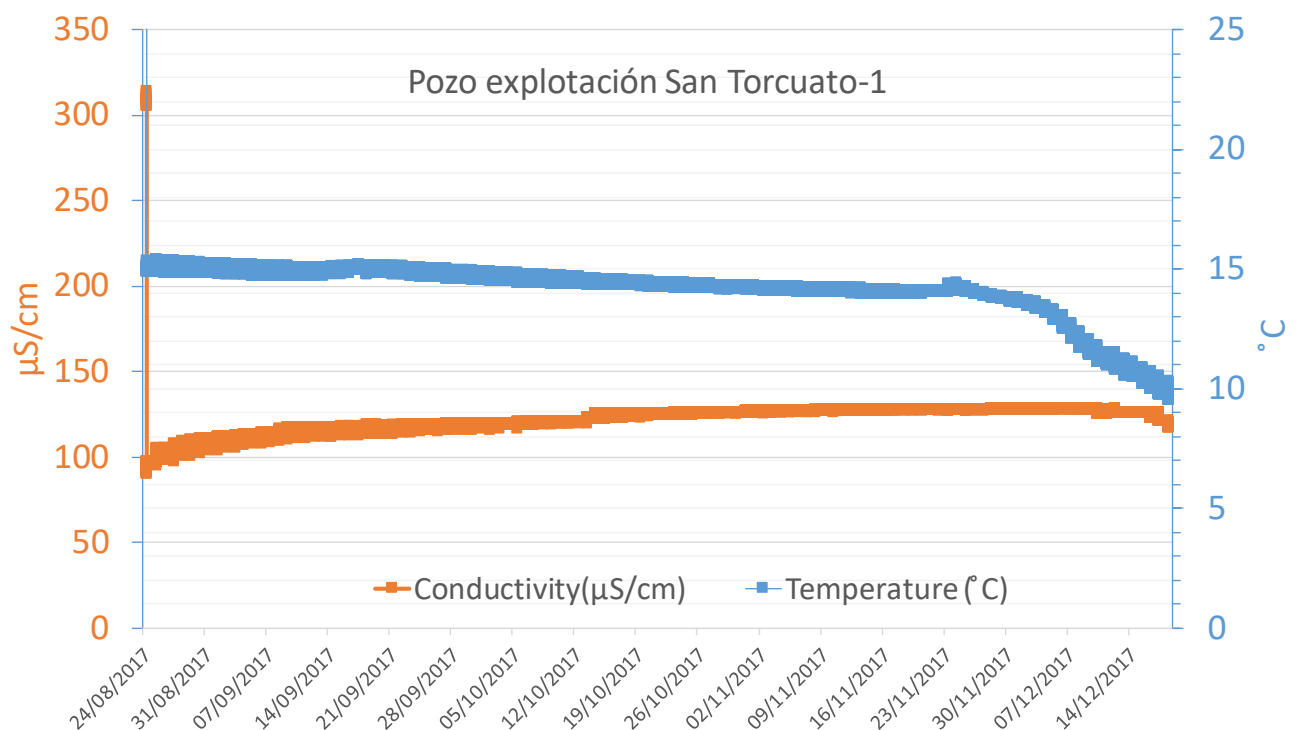


**Figura 12.5. Zona acumulación surgencias subterráneas de origen kárstico. (14-09-2017)**



**Figura 12.6. Caudal por la margen izquierda desde la zona de surgencias antes del desvío a la acequia de Ojacastro (14-09-2017)**

Igualmente se instaló un sensor de registro automático de la conductividad eléctrica del agua en el pozo de San Torcuato a finales del mes de agosto hasta finales de diciembre por lo que el período de datos obtenidos es relativamente escaso. Parece que no se pudieron volcar los datos del sensor la última vez que se extrajo del sondeo por problemas técnicos (comunicación verbal Z-Amaltea en enero de 2018). Sin embargo, se han de corroborar los datos obtenidos puesto que las conductividades del agua extraída de la captación subterránea presentan valores más cercanos a las aguas superficiales y subsuperficiales del acuífero aluvial cuaternario que a las propias del acuífero kárstico (como por ejemplo las del manantial de Las Tres Fuentes de Valgañón). Los valores de conductividad eléctrica del agua en el período de medidas son del orden de 100-120  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (figura 12.7). En trabajos anteriores (ACUAES-Z-Amaltea. 2014) sobre las afecciones al acuífero Jurásico por el bombeo desde el pozo San Torcuato, al comparar los valores de conductividad se comprobó que los valores de conductividad del piezómetro y del río registraban los mismos valores. Esto indicaba que el agua del pozo procedía del río y en ocasiones presentaban valores de unos 90-100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  como los que parece se están registrando por el sensor. Sin embargo, los datos del sensor podrían ser erróneos y achacables, por ejemplo, a algún problema de calibración del mismo puesto que, la conductividad medida en un análisis químico facilitado por la empresa Aguas de Valencia del agua de entrada a la ETAP realizado el 30-9-2017 presenta una conductividad de 512  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



**Figura 12.7 Evolución de la Conductividad eléctrica y Temperatura del sensor Barodiver instalado en el sondeo de explotación San Torcuato- 1 de agosto a diciembre de 2017.**

Por ello, es fundamental en posteriores estudios a realizar para intentar determinar el porcentaje de aguas del acuífero aluvial cuaternario y del acuífero carbonatado jurásico extraídos durante los distintos períodos de explotación del sondeo de San Torcuato, el desarrollo y empleo de técnicas hidroquímicas y físicas en campo para evaluar posibles afecciones futuras.

En diciembre de 2017 se intentó llevar a cabo la realización de una campaña de perfiles verticales de conductividad en los sondeos de San Torcuato y de la Cantera, pero fue fallida debido a que no existen huecos en el anular de los mismos entre las paredes y las tuberías de impulsión.

Por otra parte, y para caracterizar las propiedades del acuífero aluvial cuaternario en conexión hidráulica con el río y con el acuífero carbonatado jurásico, se debe profundizar en la caracterización de aspectos sobre su espesor en la zona que no han podido quedar resueltos con el método geofísico empleado, puesto que representa un papel fundamental en la explotación de los recursos captados por el pozo de bombeo.

**13. ESTUDIO DE LA RELACIÓN RÍO –  
ACUÍFERO DENTRO DEL ÁREA DE  
INTERÉS DEL PROYECTO.**





### **13. ESTUDIO DE LA RELACIÓN RÍO – ACUÍFERO DENTRO DEL ÁREA DE INTERÉS DEL PROYECTO.**

En el presente apartado, se va a cuantificar la relación río-acuífero dentro de la masa de agua subterránea Ezcaray – Pradoluengo,

Los datos disponibles proceden de informes realizados por el IGME hace tiempo, y permiten una cuantificación de dicha relación más cualitativa que cuantitativa, ya que su distribución temporal es excesivamente corta.

Esta masa de agua subterránea, como es conocido, presenta una complicada distribución estructural, que viene determinada por condicionantes de tipo tectónico, lo que, junto a las diferentes litologías que la conforman, son los responsables de la presencia de varios niveles piezométricos, que responden a estructuras y niveles acuíferos con diferente comportamiento hidrogeológico.

La relación entre los distintos acuíferos de esta masa y los cauces superficiales que la atraviesan es importante, y determinante a la hora de establecer correctamente el modelo conceptual de funcionamiento de la masa de agua subterránea. El carácter ganador o perdedor de los citados ríos cambia por sectores de acuífero y, en algunos casos, podría cambiar incluso por épocas del año.

Los cinco ríos que atraviesan esta masa son:

Río Urbión  
Río Pradoluengo  
Río Tirón  
Río Glera  
Río Santurdejo

Estos ríos constituyen las principales vías de recarga o descarga de la masa de agua subterránea.

La figura 13.1 muestra un esquema topológico de las relaciones entre los citados ríos y la masa de agua subterránea, así como la localización de las escalas de control foronómico:

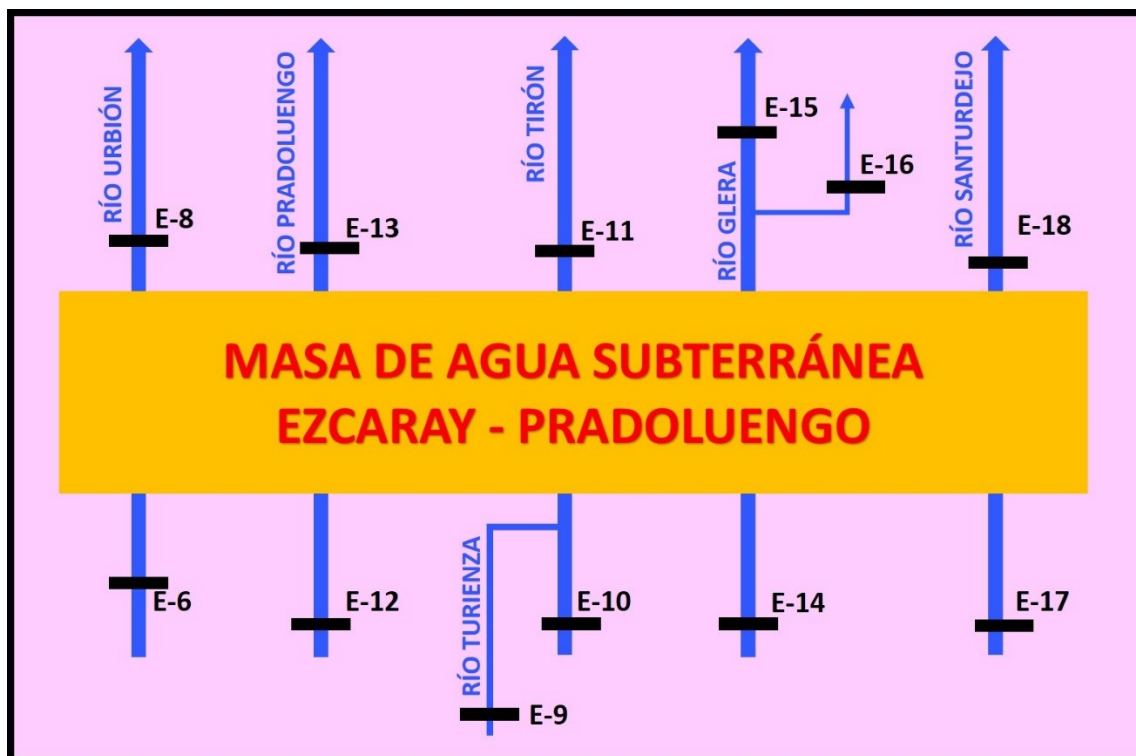


Figura 13.1. Relación entre la masa de agua subterránea y los ríos que circulan por ella, con indicación de las estaciones foronómicas existentes.

Los datos de que se dispone para realizar el estudio han sido tomados en escalas de una red restringida de control foronómico, así como en estaciones de aforo de la Confederación Hidrográfica del Ebro situadas sobre los cauces citados. Existen datos de caudal en aguas bajas, caudal en aguas alta, caudal en aguas media y caudal punta. Para calcular los caudales que intervienen en la relación río-acuífero se considera la mejor opción trabajar con los valores de caudales medios. Los datos disponibles son los siguientes:

#### 1. Río Urbión.

Estación E-6, situada aguas arriba de la población de Santa Cruz del Valle Urbión:

Caudal en aguas bajas: 14 l/s  
 Caudal en aguas altas: 25 l/s  
 Caudal en aguas medias: 20 l/s  
 Caudal punta: 33 l/s

Estación E-8, situada aguas debajo de la población de Garganchón:

Caudal en aguas bajas: 0 l/s  
 Caudal en aguas altas: 500 l/s  
 Caudal en aguas medias: 130 l/s  
 Caudal punta: 2500 l/s

Por tanto, el río Urbión, entre ambos puntos de control, sería un río ganador en una cuantía de 110 l/s, lo que supone un total de 3,47 hm<sup>3</sup>/año

## 2. Río Pradoluengo.

Estación E-12, situada aguas abajo de la población de Pradoluengo, pero antes de que el río cruce la masa de agua subterránea:

Caudal en aguas bajas: 10 l/s  
Caudal en aguas altas: 75 l/s  
Caudal en aguas medias: 20 l/s  
Caudal punta: 5.400 l/s

Estación E-13, situada aguas abajo de la población de Pradoluengo, después de que el río cruce la masa de agua subterránea:

Caudal en aguas bajas: 40 l/s  
Caudal en aguas altas: 90 l/s  
Caudal en aguas medias: 45 l/s  
Caudal punta: 140 l/s

Por tanto, el río Pradoluengo, entre ambos puntos de control, sería un río ganador en una cuantía de 45 l/s, lo que supone un total de 1,42 hm<sup>3</sup>/año.

## 3. Río Tirón.

Estación E-9, situada aguas arriba de la población de Fresneda de la Sierra, en el río Turón:

Caudal en aguas bajas: 15 l/s  
Caudal en aguas altas: 70 l/s  
Caudal en aguas medias: 50 l/s  
Caudal punta: 145 l/s

Estación E-10, situada también aguas arriba de la población de Fresneda de la Sierra, en el río Turiaza:

Caudal en aguas bajas: 12 l/s  
Caudal en aguas altas: 620 l/s  
Caudal en aguas medias: 200 l/s  
Caudal punta: 1.472 l/s

Estación E-11, situada aguas abajo de la población de Fresneda de la Sierra, después de que el río cruce la masa de agua subterránea:

Caudal en aguas bajas: 0 l/s  
Caudal en aguas altas: 1.025 l/s

Caudal en aguas medias: 400 l/s  
Caudal punta: 8.000 l/s

Para calcular la relación río-acuífero en el Turón, habría que sumar los caudales de los ríos Tirón y Turiaza, que es afluente suyo, porque ambos discurren antes de cruzar la masa de agua subterránea, Por tanto, el río Tirón, entre ambos puntos de control, sería un río ganador en una cuantía de 150 l/s, lo que supone un total de 4,73 hm<sup>3</sup>/año.

#### 4. Río Glera.

Estación E-14, situada aguas arriba de Ezcaray, y del cruce del río con la masa de agua subterránea:

Caudal en aguas bajas: 0 l/s  
Caudal en aguas altas: 790 l/s  
Caudal en aguas medias: 320 l/s  
Caudal punta: 1.048 l/s

Tras atravesar la masa de agua subterránea, el caudal del río tirón se reparte entre el propio cauce y una acequia de riego. En el cauce, dicho caudal se mide en la escala E-16, mientras que en la acequia se controla con la escala E-15. Por tanto, el caudal total que lleva el río Glera aguas debajo de la masa de agua subterránea será la suma de los caudales medidos en E-15 y en E-16.

Estación E-15:

Caudal en aguas bajas: 58 l/s  
Caudal en aguas altas: 335 l/s  
Caudal en aguas medias: 150 l/s  
Caudal punta: sin dato

Estación E-16:

Caudal en aguas bajas: 0 l/s  
Caudal en aguas altas: 950 l/s  
Caudal en aguas medias: 180 l/s  
Caudal punta: 2.041 l/s

Caudal total que lleva el río Glera aguas debajo de la masa de agua subterránea (E 15 + E 16):

Caudal en aguas bajas: 58 l/s  
Caudal en aguas altas: 1.285 l/s  
Caudal en aguas medias: 330 l/s  
Caudal punta: 2.041 l/s

Por tanto, el río Glera, entre ambos puntos de control, sería un río ganador en una cuantía de 10 l/s, lo que supone un total de 0,32 hm<sup>3</sup>/año.

Con respecto a este río, informes antiguos del IGME indican que existen transferencias laterales subterráneas entre esta masa de agua subterránea y el acuífero aluvial del río Glera. En dicho informe, las transferencias laterales se han cuantificado mediante la realización de aforos diarios con escalas limnimétricas en el río. Los resultados obtenidos, para el año hidrológico 1990-91, indican que dicha relación es de 4,5 hm<sup>3</sup>/año a favor del río (es ganador), con caudales instantáneos que varían entre 60 l/s y 500 l/s. En realidad, este caudal parece corresponder, por el método de medida utilizado, a lo que el río gana al atravesar la masa de agua subterránea que, para el año hidrológico considerado, arroja el valor señalado.

## 5. Río Santurdejo.

Estación E-17, situada aguas arriba de la masa de agua subterránea:

Caudal en aguas bajas: 3 l/s  
Caudal en aguas altas: 31 l/s  
Caudal en aguas medias: 14 l/s  
Caudal punta: 253 l/s

Estación E-18, situada aguas abajo de la de la masa de agua subterránea:

Caudal en aguas bajas: 10,5 l/s  
Caudal en aguas altas: 59 l/s  
Caudal en aguas medias: 23 l/s  
Caudal punta: sin dato

Por tanto, el río Santurdejo, entre ambos puntos de control, sería un río ganador en una cuantía de 9 l/s, lo que supone un total de 0,28 hm<sup>3</sup>/año.

Como resumen, se presenta la siguiente tabla con los valores obtenidos:

| RÍO         | CARÁCTER | CAUDAL<br>(hm <sup>3</sup> /año) |
|-------------|----------|----------------------------------|
| Urbión      | Ganador  | 3,47                             |
| Pradoluengo | Ganador  | 1,42                             |
| Tirón       | Ganador  | 4,73                             |
| Glera       | Ganador  | 0,32                             |
| Santurdejo  | Ganador  | 0,28                             |

Dado que el caudal en aguas bajas puede asimilarse al caudal base proporcionado por la masa de agua subterránea, se ha repetido el cálculo utilizando este dato. Los resultados son los siguientes:



### 1. Río Urbión.

El río Urbión, entre ambos puntos de control (E-6 y E-8), sería un río perdedor en una cuantía de 14 l/s, lo que supone un total de 0,44 hm<sup>3</sup>/año

### 2. Río Pradoluengo.

El río Pradoluengo, entre ambos puntos de control (E-12 y E-13), sería un río ganador en una cuantía de 30 l/s, lo que supone un total de 0,95 hm<sup>3</sup>/año.

### 3. Río Tirón.

El río Tirón, entre los puntos de control (E-9 + E-10 y E-11), sería un río perdedor en una cuantía de 27 l/s, lo que supone un total de 0,85 hm<sup>3</sup>/año.

### 4. Río Glera.

El río Glera, entre los puntos de control (E-14 y E-15 + E-16), sería un río ganador en una cuantía de 58 l/s, lo que supone un total de 1,83 hm<sup>3</sup>/año.

### 5. Río Santurdejo.

El río Santurdejo, entre ambos puntos de control, sería un río ganador en una cuantía de 7,5 l/s, lo que supone un total de 0,24 hm<sup>3</sup>/año.

Como resumen, se presenta la siguiente tabla con los valores obtenidos:

| RÍO         | CARÁCTER | CAUDAL<br>(hm <sup>3</sup> /año) |
|-------------|----------|----------------------------------|
| Urbión      | Perdedor | 0,44                             |
| Pradoluengo | Ganador  | 0,95                             |
| Tirón       | Perdedor | 0,85                             |
| Glera       | Ganador  | 1,83                             |
| Santurdejo  | Ganador  | 0,24                             |

## **14. RECARGA NATURAL AL ACUÍFERO JURÁSICO**



## 14. RECARGA NATURAL AL ACUÍFERO JURÁSICO.

### 14.1. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MEDIANTE EL MÉTODO APLIS (V.2).

En este apartado se realiza la evaluación de la recarga en el **acuífero carbonático de Ezcaray** (La Rioja) mediante la utilización del método APLIS modificado (v.2) (Marín, 2009), que consiste en una versión de APLIS en su versión original (v.1) (Andreo *et al.*, 2008). El método APLIS (v.1) fue diseñado en el marco del proyecto IGME-GHUMA (2003) “Estudios metodológicos para la estimación de la recarga en diferentes tipos de acuíferos carbonatados: aplicación a la Cordillera Bética”, con el objetivo de desarrollar un método sencillo que permitiera estimar la tasa de recarga a los acuíferos carbonáticos (expresado como porcentaje de la precipitación), mediante la combinación de diferentes variables (geológicas, geográficas, morfológicas y edafológicas) y establecer la distribución espacial de la recarga en los acuíferos. Se consideraron ocho acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética, de los que se conocía la tasa de recarga, calculada por métodos clásicos y, en algunos casos, contrastada con la descarga que se produce en estos acuíferos. Además, se realizó un análisis previo que permitió determinar que variables eran más influyentes en la recarga (Durán *et al.*, 2004) para el desarrollo del algoritmo de estimación de la recarga. Posteriormente, se diseñó un sistema de puntuaciones de las variables y se aplicaron diferentes procedimientos de combinación de la variable hasta obtener el algoritmo del método APLIS original (Andreo *et al.*, 2004 y 2008).

#### 14.1.1. Fundamentos del método.

El método APLIS asume que la recarga media anual es siempre proporcional a la precipitación y trata de conocer la constante de proporcionalidad de cada acuífero, en función de variables intrínsecas del mismo: Altitud (A), Pendiente (P), Litología (L), formas de Infiltración preferencial (I) y Suelo (S). Las iniciales de dichas variables determinan el acrónimo que da nombre al método APLIS (Andreo *et al.*, 2004).

APLIS está diseñado para acuíferos carbonáticos, no obstante, hay casos en los que, dentro del área de estudio afloran materiales de baja permeabilidad. En estas áreas, al aplicar el método APLIS original, pueden resultar tasas de recarga de hasta un 20% de la precipitación. Por lo que para su correcta aplicación ha sido necesario considerar tan solo los afloramientos de roca permeable y desestimar, en el cálculo de la tasa de infiltración, los afloramientos de materiales carácter acuitado. En el método APLIS (v.2), este aspecto ha sido mejorado, mediante la adecuación de la tasa de recarga en materiales de baja permeabilidad. De tal forma que se propone un nuevo factor (Fh). Este factor multiplica al valor de la tasa de recarga calculado por medio del algoritmo

original de APLIS. Fh tiene dos valores: 1 para materiales acuíferos (gravas, calizas, arenas, dolomías...) y 0,1 para aquellas litologías que no son acuíferos. De tal forma, que se consigue que el porcentaje de agua infiltrada en materiales de baja permeabilidad sea más acorde con las características hidrogeológicas de los mismos (Marín, 2009).

Otras mejoras implícitas en APLIS (v.2) han sido la homogeneización del número de clases de la variable P con otros parámetros del método y la optimización del parámetro formas de infiltración preferencial. Así, es posible distinguir zonas donde las zonas exokársticas de infiltración están moderadamente desarrolladas o no son muy abundantes, diversificando así las posibilidades de puntuación dentro de esta variable I.

Para la aplicación de este método se requiere elaborar varios mapas, mediante un Sistema de Información Geográfico, en los que se cartografía cada una de las variables que intervienen en el método, según un sistema de puntuaciones individualizado (Tablas 14.1.1-1 a 14.1.1-6). Las puntuaciones están comprendidas entre 1 y 10, según una progresión aritmética de diferencia 1, con el objetivo de que se puedan equiparar fácilmente a porcentajes de recarga del acuífero. El valor 1 indica mínima incidencia de los valores de esa variable en la recarga del acuífero, mientras que el valor 10 expresa la máxima influencia en la recarga.

**Tabla 14.1.1-1. Puntuación asignada a los valores de la variable Altitud (Método APLIS)**

| Altitud (m)  | Puntuación |
|--------------|------------|
| > 2700       | 10         |
| 2400 - 2700  | 9          |
| 2100 - 2 400 | 8          |
| 1800 - 2100  | 7          |
| 1500 - 1800  | 6          |
| 1200 - 1500  | 5          |
| 900 - 1200   | 4          |
| 600 - 900    | 3          |
| 300 - 600    | 2          |
| ≤ 300        | 1          |

**Tabla 14.1.1-2. Puntuación asignada a los valores de la variable Pendiente (Método APLIS modificado)**

| <b>Pendiente (P) (%)</b> | <b>Puntuación</b> |
|--------------------------|-------------------|
| ≤ 3                      | 10                |
| (3 5]                    | 9                 |
| (5 10]                   | 8                 |
| (10 15]                  | 7                 |
| (15 20]                  | 6                 |
| (20 30]                  | 5                 |
| (30 45]                  | 4                 |
| (45 65]                  | 3                 |
| (65 100]                 | 2                 |
| > 100                    | 1                 |

**Tabla 14.1.1-3. Puntuación asignada a los valores de la variable Litología (Método APLIS)**

| <b>Litología</b>                        | <b>Puntuación</b> |
|---|-------------------|
| Calizas y dolomías karstificadas        | 10 - 9            |
| Mármoles fracturados algo karstificados | 8 - 7             |
| Calizas y dolomías fisuradas            | 6 - 5             |
| Arenas y gravas, coluviones             | 4                 |
| Brechas y conglomerados                 | 3                 |
| Rocas plutónicas y metamórficas         | 2                 |
| Esquistos, pizarras, limos, arcillas    | 1                 |

**Tabla 14.1.1-4. Puntuación asignada a los valores de la variable formas de Infiltración preferencial (Método APLIS modificado)**

| <b>Infiltración-absorción preferencial (I)</b>                          | <b>Puntuación</b> |
|---|-------------------|
| Alto desarrollo de las formas de infiltración preferencial              | 10                |
| Desarrollo moderado de las formas de infiltración preferencial          | 5                 |
| Escaso desarrollo o ausencia de las formas de infiltración preferencial | 1                 |



**Tabla 14.1.1-5. Puntuación asignada a los valores de la variable Suelo (Método APLIS)**

| Suelos (S)  | Puntuación |
|---|------------|
| Litsoles  | 10         |
| Arenosoles Álbicos y Xerosoles Cálcidos           | 9          |
| Regosoles Calcáreos y Fluvisoles                  | 8          |
| Regosoles Eútricos, Dútricos y Solonchaks         | 7          |
| Cambisoles Cálcidos                               | 6          |
| Cambisoles Eútricos                               | 5          |
| Histosoles Eútricos, Luvisoles Órticos y Cálcidos | 4          |
| Luvisoles Crómicos                                | 3          |
| Planosoles  | 2          |
| Vertisoles Crómicos                               | 1          |

**Tabla 14.1.1-6. Puntuación asignada a los valores de la variable características hidrogeológicas (Método APLIS)**

| Características hidrogeológicas de los materiales que afloran (F <sub>h</sub> ) | Puntuación |
|---|------------|
| Características acuíferas   | 1          |
| Otros   | 0,1        |

A las capas de información correspondientes a cada variable, elaboradas según el sistema de rangos y puntuaciones previamente descrito, se les ha aplicado la expresión matemática del método APLIS modificado:

$$R = [(A + P + 3 \cdot L + 2 \cdot I + S) / 0'9] \cdot F_h$$

siendo R el valor medio de la tasa de recarga del acuífero.

Al dividir por 0'9, se obtienen valores de la tasa de recarga que están comprendidos entre un mínimo de 8'88 % y un máximo de 88'8 % de la lluvia sobre el acuífero.

La tasa media de recarga anual se representa agrupada en cinco intervalos regulares, a cada uno de los cuales se le asigna una categoría según el porcentaje de lluvia que recarga el acuífero (Tabla 14.1.1-7).

**Tabla 14.1.1-7. Categorías de porcentaje de recarga al acuífero (Método APLIS)**

| <b>Intervalo</b> | <b>Clase de recarga</b> |
|------------------|-------------------------|
| ≤ 20 %           | Muy Baja                |
| 20 – 40 %        | Baja                    |
| 40 – 60 %        | Moderada                |
| 60 – 80 %        | Alta                    |
| > 80 %           | Muy Alta                |

La obtención de unidades homogéneas del acuífero, para definir su tasa media de recarga, se consigue mediante la superposición cartográfica de las distintas capas de información elaboradas previamente. El valor medio de la tasa de recarga (R) se obtendrá, en su caso, como la media de los valores de R correspondientes a cada una de las unidades espaciales del mapa de recarga.

#### **14.1.2. Fuentes de información.**

Para la obtención de las capas correspondientes a cada variable del método APLIS, elaboradas según el sistema de rangos y puntuaciones previamente descrito, se han utilizado las siguientes fuentes de información:

- Altitud (A): se ha utilizado el Modelo Digital del Terreno del Instituto Geológico Nacional (IGN), compuesto por una malla regular de puntos 5 x 5 m de espaciado (resolución planimétrica) de las hojas 240 (Ezcaray) y la 202 (Santo Domingo de la Calzada).
- Pendiente (P): se ha obtenido a partir del MDT anterior.
- Litología (L): se ha realizado una cartografía geológica de detalle, escala 1/10.000, exclusiva para la realización de este trabajo.
- Infiltración preferente (I): el mapa de infiltración preferencial se ha realizado a partir de la cartografía geológica anterior, con técnicas de fotointerpretación y trabajo de campo.
- Suelos (S): se consultaron el *Mapa de suelos de las provincias de Zaragoza, Huesca y Logroño (CSIC, 1970)*, a escala 1:250.000, que utiliza un sistema de clasificación climática para la parte del acuífero que queda en la provincia de La Rioja; y el *Mapa de Suelos de Castilla y León (JCYL, 1988)*, escala 1:500.000, con clasificación FAO para la correspondiente a la provincia de Burgos, pero se decidió utilizar una fuente homogénea para toda la extensión del acuífero de Ezcaray, empleándose finalmente el *Mapa de suelos de España*, escala 1:1.000.000, del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2005).

Tanto para la elaboración-manipulación de las capas, como para la superposición cartográfica, se ha utilizado el software ArcGis en su versión 10.4.

Los datos de precipitación proceden del estudio climático realizado para la evaluación de la recarga natural del acuífero mediante el modelo matemático VISUAL BALANCE.

### **14.1.3. Aplicación del método y resultados.**

La aplicación de la expresión matemática del método APLIS (v.2) ha permitido obtener el mapa de tasa de recarga de la Figura 14.1.4-1. Como se ha descrito anteriormente, para su obtención es necesario elaborar previamente varios mapas, en los que se cartografía cada una de las variables que intervienen en el método. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada parámetro.

#### *14.1.3.1. Parámetro A, altitud.*

Para la obtención del parámetro A, altitud, se parte del Modelo Digital del Terreno del Instituto Geológico Nacional (IGN), compuesto por una malla regular de celdas de tamaño 5 x 5 m de espaciado (resolución planimétrica) de las hojas 240 (Ezcaray) y la 202 (Santo Domingo de la Calzada) con el que se elabora el mapa de altitudes de la Figura 14.1.3.1-1. Cada dato de altitud representa la altitud media de la celda de 25 metros cuadrados. A continuación, se ha procedido a la reclasificación de la altura en 10 intervalos coincidentes con los que figuran en la Tabla 14.1.1-1 para la obtención del mapa de la variable A, altitud (Figura 14.1.3.1-2).

Mapa de altitudes. Zona de estudio: Ezcaray (La Rioja)

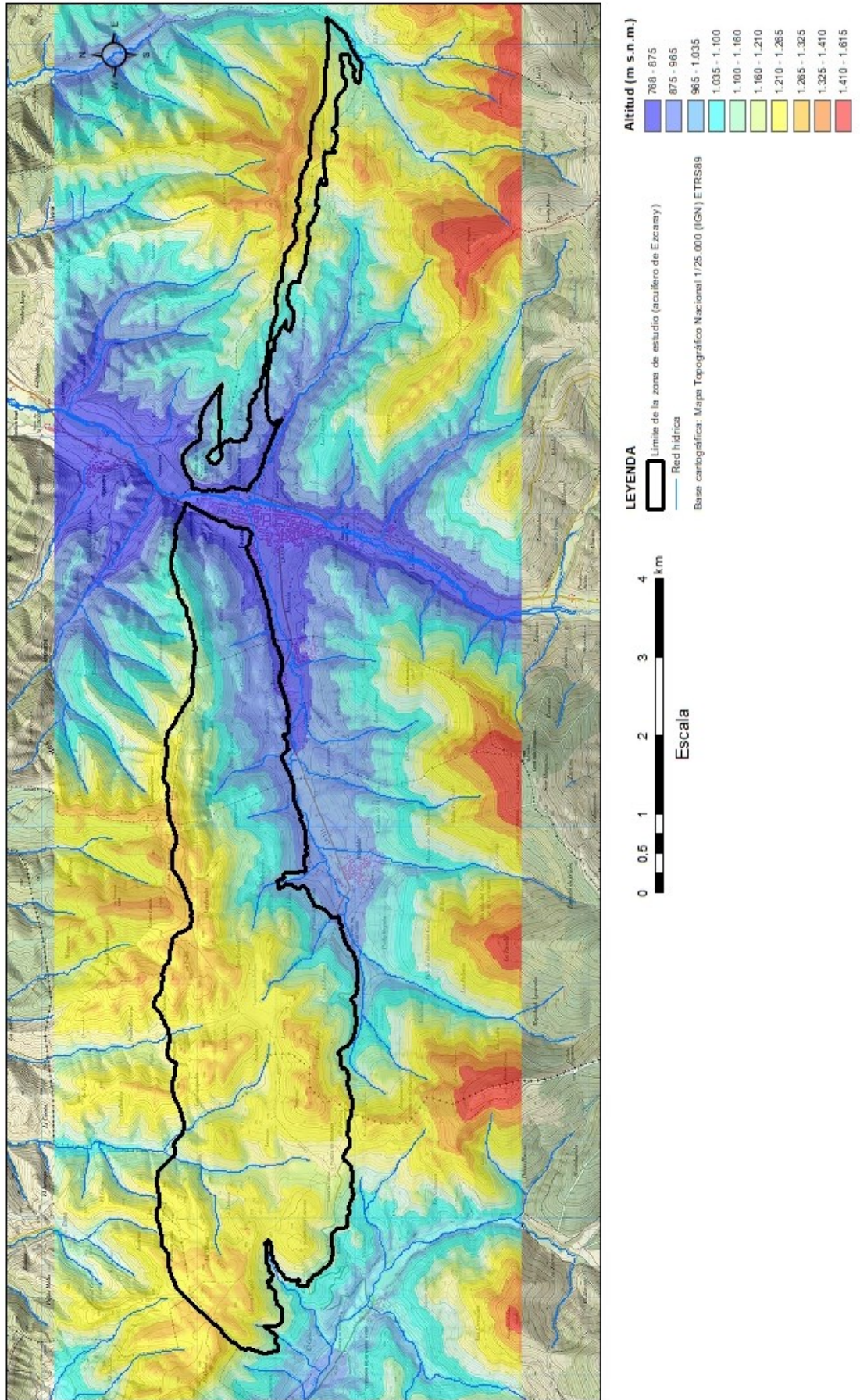


Figura 14.1.3.1-1. Mapa de altitudes de la zona de estudio.



Mapa de la variable A, altitud, en el acuífero carbonático de Ezcaray (La Rioja)  
 Método APLIS v.2

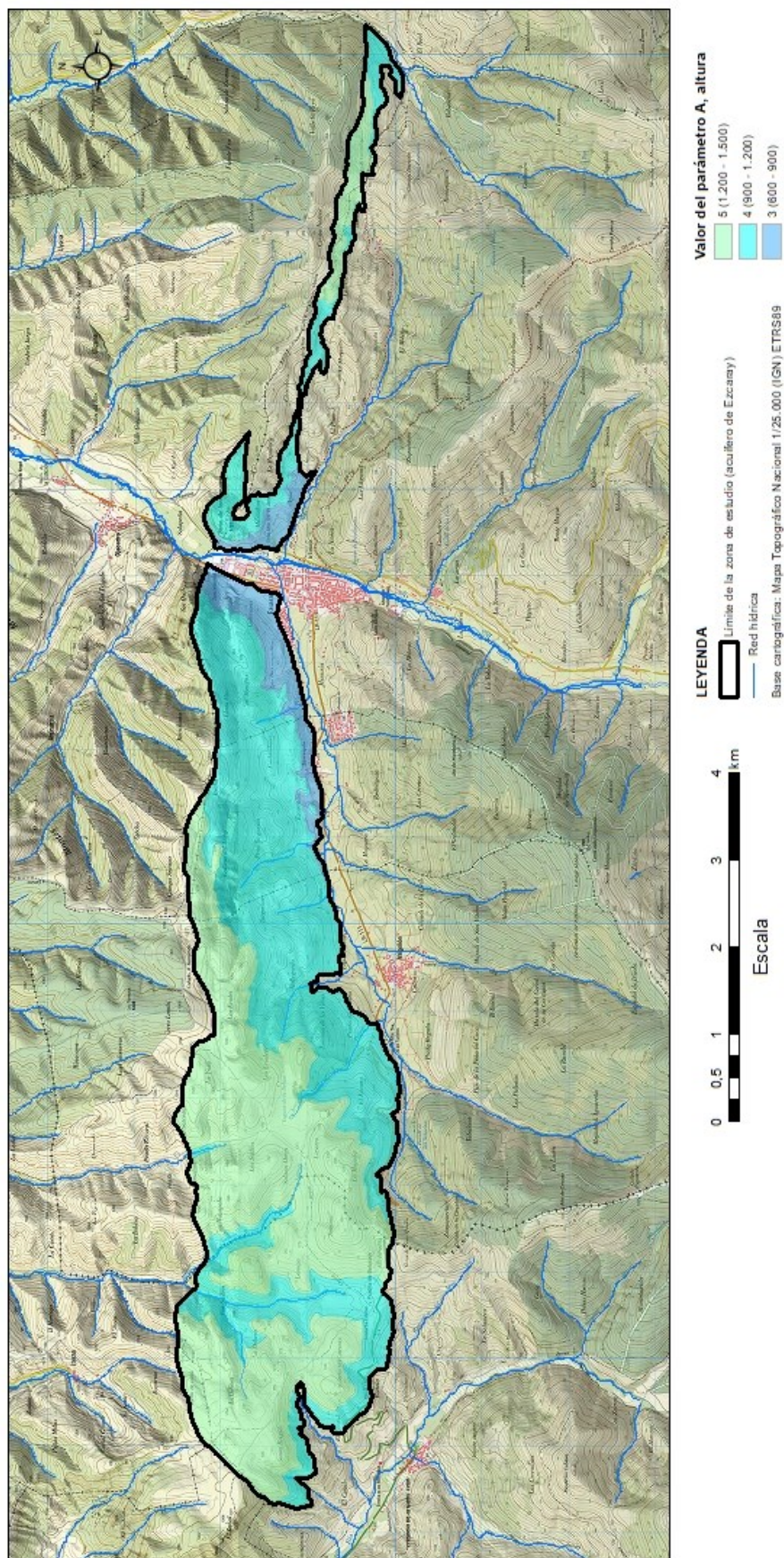


Figura 14.1.3.1-2. Mapa de la variable A, altitud, en el acuífero carbonático (Método APLIS v.2).

#### *14.1.3.2. Parámetro P, pendiente.*

Para la obtención del parámetro P, pendiente, se ha elaborado el mapa de pendientes (Figura 14.1.3.2-1) a partir del MDT del apartado anterior. La pendiente de cada celda se determina calculando la pendiente de dicha celda con sus ocho vecinos inmediatos y promediando dichas pendientes de acuerdo a su distancia con la celda central. Las cuatro celdas que comparten una cara reciben el mismo peso y lo mismo ocurre con las pendientes con respecto a las celdas que comparten un vértice. A continuación, se ha procedido a la reclasificación de las pendientes en 10 intervalos coincidentes con los que figuran en la Tabla 14.1.1-2 para la obtención del mapa de la variable P, pendiente (Figura 14.1.3.2-4).



Mapa de pendientes. Zona de estudio: Ezcaray (La Rioja)

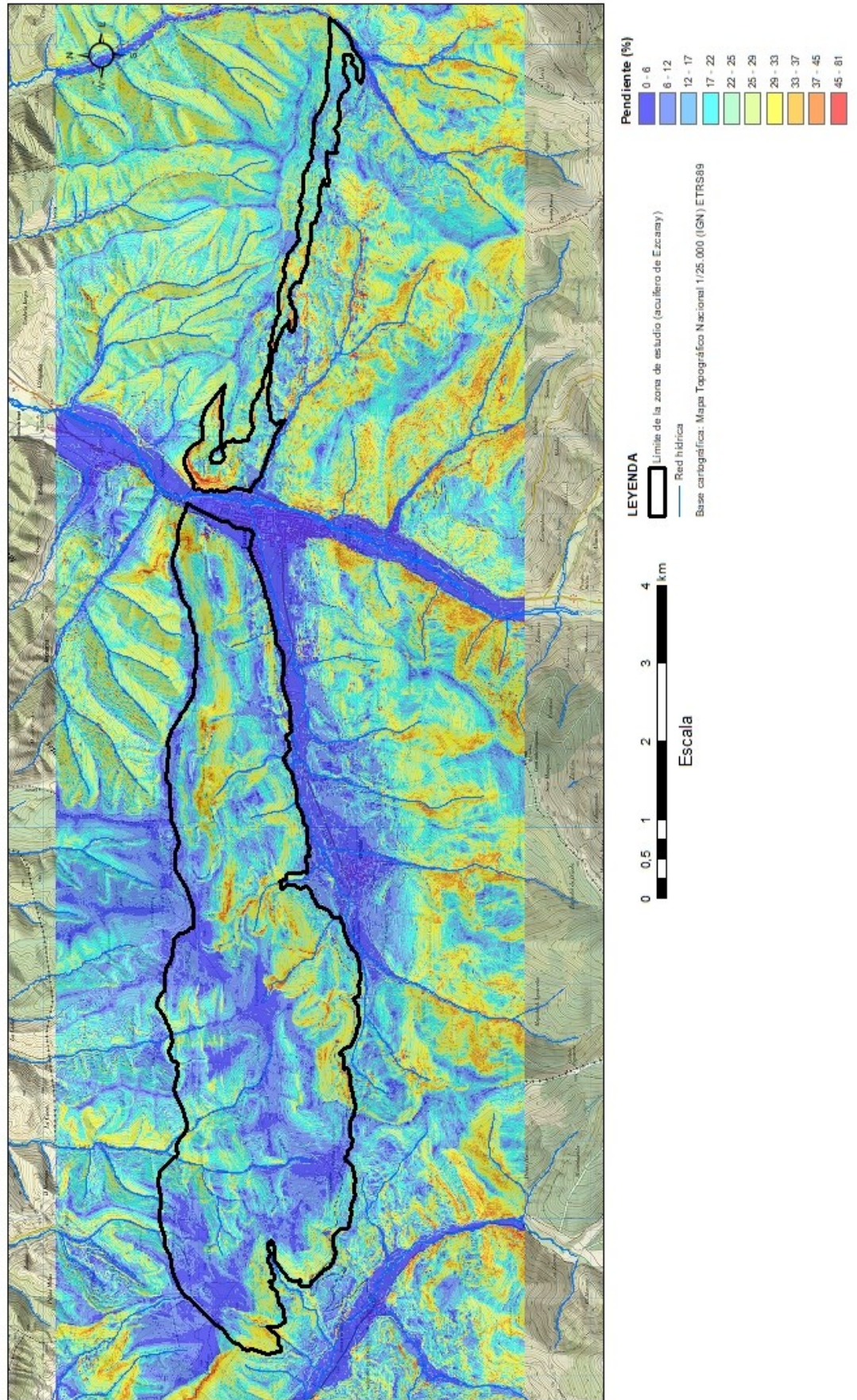


Figura 14.1.3.2-1. Mapa de pendientes de la zona de estudio.



Mapa de la variable P, pendiente, en el acuífero carbonático de Ezcaray (La Rioja)  
 Método APLIS v.2

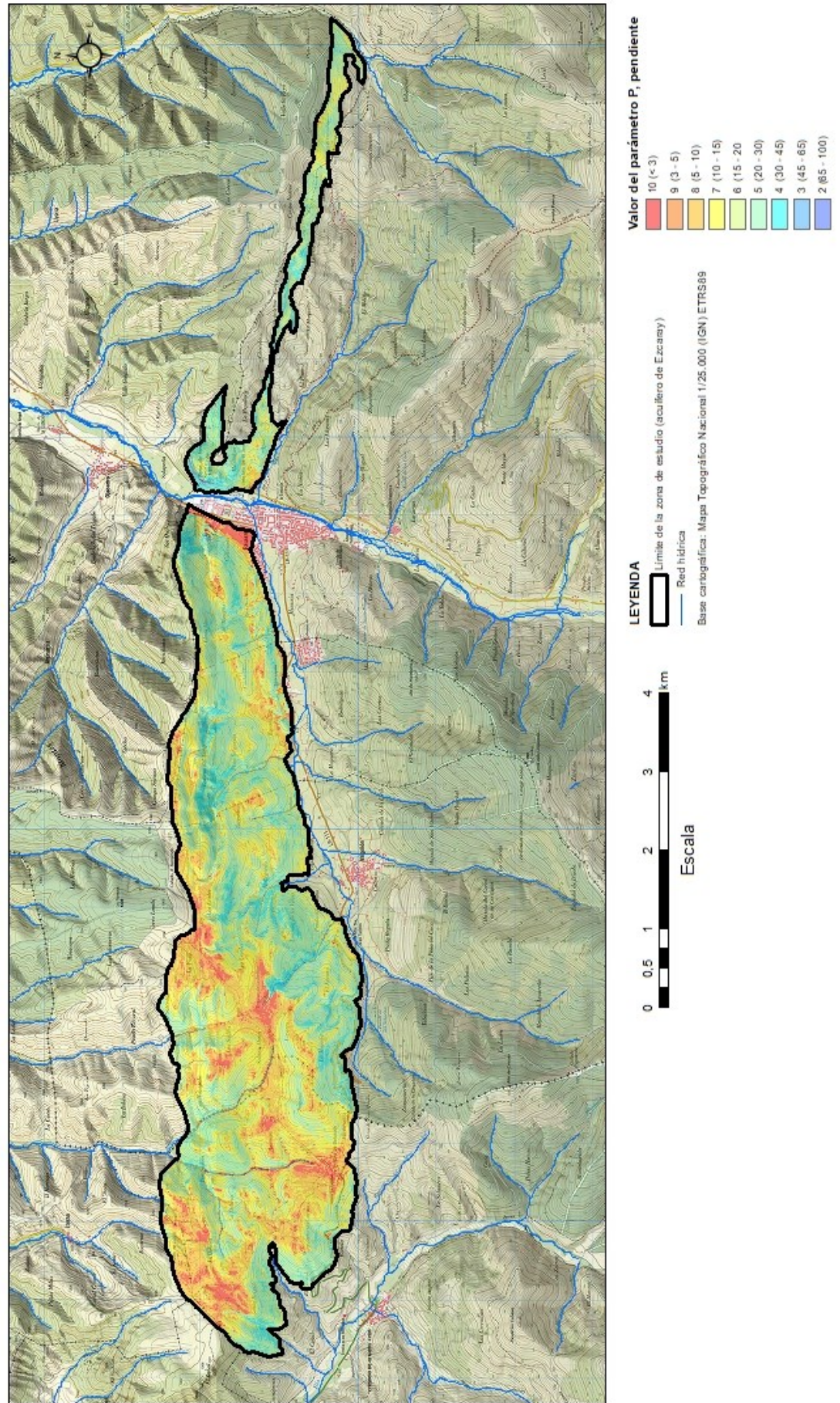


Figura 14.1.3.2-2. Mapa de la variable P, pendiente, en el acuífero carbonático de Ezcaray (Método APLIS v.2).



#### 14.1.3.3. Parámetro L, litología.

Para la asignación de los valores de la variable L, se parte del mapa geológico de la zona cartografiado a escala 1/10.000 *ex professo* para este proyecto y finalizado en noviembre de 2017 (Figura 14.1.3.3-7).

Durante el reconocimiento de campo realizado por el equipo de trabajo, se identifican todos los materiales aflorantes y se caracterizan las principales litologías que conforman el acuífero carbonático de Ezcaray (Figuras 14.1.3.3-1 a 14.1.3.3-5), con objeto de realizar una asignación más precisa de los valores de la variable L del método APLIS v.2.

Así, de acuerdo con las observaciones de campo y la Tabla 14.1.1-3, la puntuación asignada a los valores de la variable Litología en la zona de estudio se indica en la columna estratigráfica del mapa geológico cartografiado de la zona (Figura 14.1.3.3-6).

El resultado cartográfico obtenido de la aplicación del método APLIS v.2 en la variable litología, en el acuífero carbonático de Ezcaray, se presenta en la Figura 14.1.3.3-8.



**Figura 14.1.3.3-1. Jurásico (J1): Calizas tableadas, Carniolas y Brechas Calcáreas (Formaciones Imón y Cortes de Tajuña).**





**Figura 14.1.3.3-2. Jurásico (J2): Calizas Tableadas (Formación Cuevas Labradas).**



**Figura 14.1.3.3-3. Jurásico (J3): Margas y calizas nodulosas. Formación Turmiel.**





**Figura 14.1.3.3-4. Jurásico (J4): Calizas masivas, bioclásticas y oolíticas.**



**Figura 14.1.3.3-5. Jurásico (J5): Margas y Calizas limosas y arenosas (Bath-Calloviense).**



|              |              | LEYENDA        |   |       |      | Puntuación Litología<br>Tabla 14.1.1-3 | UNIDADES   |
|--------------|--------------|----------------|---|-------|------|--|--|
|              |              | 4              | 4 | 4     | 4    | 9                                      |  |
| CUATERNARIO  | PLEISTOCENO  | HOLOCENO       |   | Qa    |      |  | Qa Cuaternario Depositos Aluviales   |
|              |              | SUPERIOR       |   | Qcd   | Qco  | Qfd                                    | Qcd Cuaternario Depositos de Cono de deyección                                     |
|              |              | MEDIO          |   |       |      | Qtr                                    | Qco Cuaternario Depositos Coluviales   |
|              |              | INFERIOR       |   |       |      |  | Qfd Cuaternario Fondo de dolina  |
| NEÓGENO      | MIOCENO      | PLIOCENO       |   | T7    |      |  | T7 Conglomerados silíceos  |
|              |              | TUROLIENSE     |   | T6    |      |  | T6 Conglomerados silíceos y lutitas  |
|              |              | VALLESIENSE    |   | T5-T6 |      |  | T5 Conglomerados poligenicos y lutitas   |
|              |              | ARAGONIENSE    |   | T5    | T5s  |  | T5s Conglomerados poligenicos  |
|              |              | RAMBLIENSE     |   | T4    | T4cg |  | T4 Conglomerados, areniscas y lutitas  |
|              |              |                |   |       |      |  | T4cg Conglomerados   |
| PALEO.       | OLIG.        | CHATIENSE      |   | T3    |      |  | T3 Lutitas y Conglomerados   |
|              |              |                |   |       |      |  | J5 Margas y Calizas limosas y arenosas (Bath-Calloviense)                          |
| JURÁSICO     | MEDIO        | CALLOVIENSE    |   | J5    |      |  | J5 Margas y Calizas limosas y arenosas (Bath-Calloviense)                          |
|              |              | BATHONIENSE    |   | J4    |      |  | J4 Calizas masivas, bioclásticas y oolíticas                                       |
|              |              | BAJOCIENSE     |   | J4    |      |  | J4 Calizas masivas, bioclásticas y oolíticas                                       |
|              |              | AALeniENSE     |   | J4    |      |  | J4 Calizas masivas, bioclásticas y oolíticas                                       |
|              | INFERIOR     | TOARCIENSE     |   | J3    |      |  | J3 Margas y calizas nodulosas Fm. Turmiel  |
|              |              | PLIENSACHIENSE |   | J2    |      |  | J2 Calizas Tableadas Fm. Cuevas Labradas   |
|              |              | SINEMURIENSE   |   | J2    |      |  | J2 Calizas tableadas, Carniolas y Brechas Calcareas (Fms. Imon y Cortes de Tajuña) |
|              |              | HETTANGIENSE   |   | J1    |      |  | J1 Calizas tableadas, Carniolas y Brechas Calcareas (Fms. Imon y Cortes de Tajuña) |
| TRIÁSICO     | SUPERIOR     | RHAETIENSE     |   | Tk    |      |  | Tk Facies Keuper Lutitas rojizas algo limosas con yesos                            |
|              |              | NORIENSE       |   | Tk    |      |  | Tk Facies Keuper Lutitas rojizas algo limosas con yesos                            |
|              |              | CARNIENSE      |   | Tk    |      |  | Tk Facies Keuper Lutitas rojizas algo limosas con yesos                            |
|              | MEDIO        | LADINIENSE     |   | Tm    |      |  | Tm Facies Munschelkalk Calizas tableadas y laminadas ocre, y dolomías              |
|              |              | ANISIENSE      |   | Tm    |      |  | Tm Facies Munschelkalk Calizas tableadas y laminadas ocre, y dolomías              |
|              | INF.         | OLENIENSE      |   | Tb    |      |  | Tb Facies Buntsandstein areniscas, limolitas y Conglomerados                       |
| CARBO NIFERO | WESTFALIENSE | SUPERIOR       |   | CBc   |      |  | CB Carbonifero Pizarras con areniscas y conglomerados                              |
|              |              | INFERIOR       |   | CB    |      |  | CB Carbonifero Pizarras con areniscas y conglomerados                              |
| CAMBRICO     | MEDIO        |                |   | CA3   |      |  | CA3 Alternacia de Areniscas y Pizarras del Najerilla                               |
|              |              |                |   | CA21  |      |  | CA21 Pizarras carbonatadas y calcoesquistos Fm Azarulla                            |
|              |              |                |   | CA2   |      |  | CA2 Pizarras Fm Gatón  |
|              | INFERIOR     | SUPERIOR       |   | CA13  |      |  | CA13 Dolomías Fms Mansilla y Urbión  |
|              |              | MEDIO          |   | CA12  |      |  | CA12 Areniscas y pizarras Fm Puntón  |
|              |              | INFERIOR       |   | CA11  |      |  | CA11 Conglomerados Fm Anguiano   |
| PRECAMBRICO  |              |                |   | PC    |      |  | PC Esquistos y pizarras Fm Anguiano  |

**Figura 14.1.3.3-6. Puntuación asignada a la variable Litología, según la Tabla 3 del método APLIS v.2, en la zona de estudio. Valores indicados en color rojo sobre la columna estratigráfica del mapa geológico de la zona (Figura 14.1.3.3-7).**



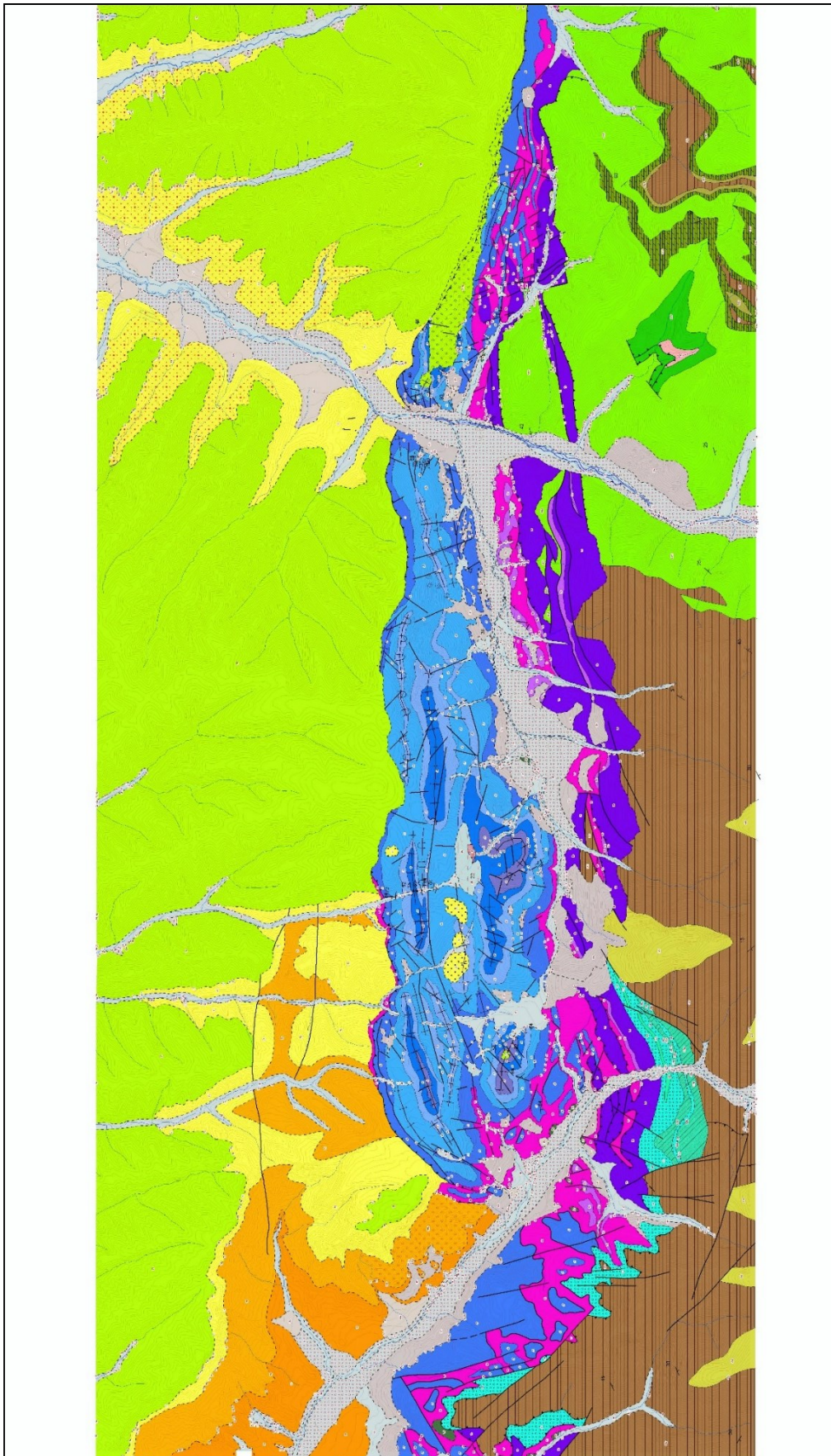


Figura 14.1.3.3-7. Mapa geológico de la zona de estudio, cartografiado a escala 1/10.000 para el desarrollo del proyecto.



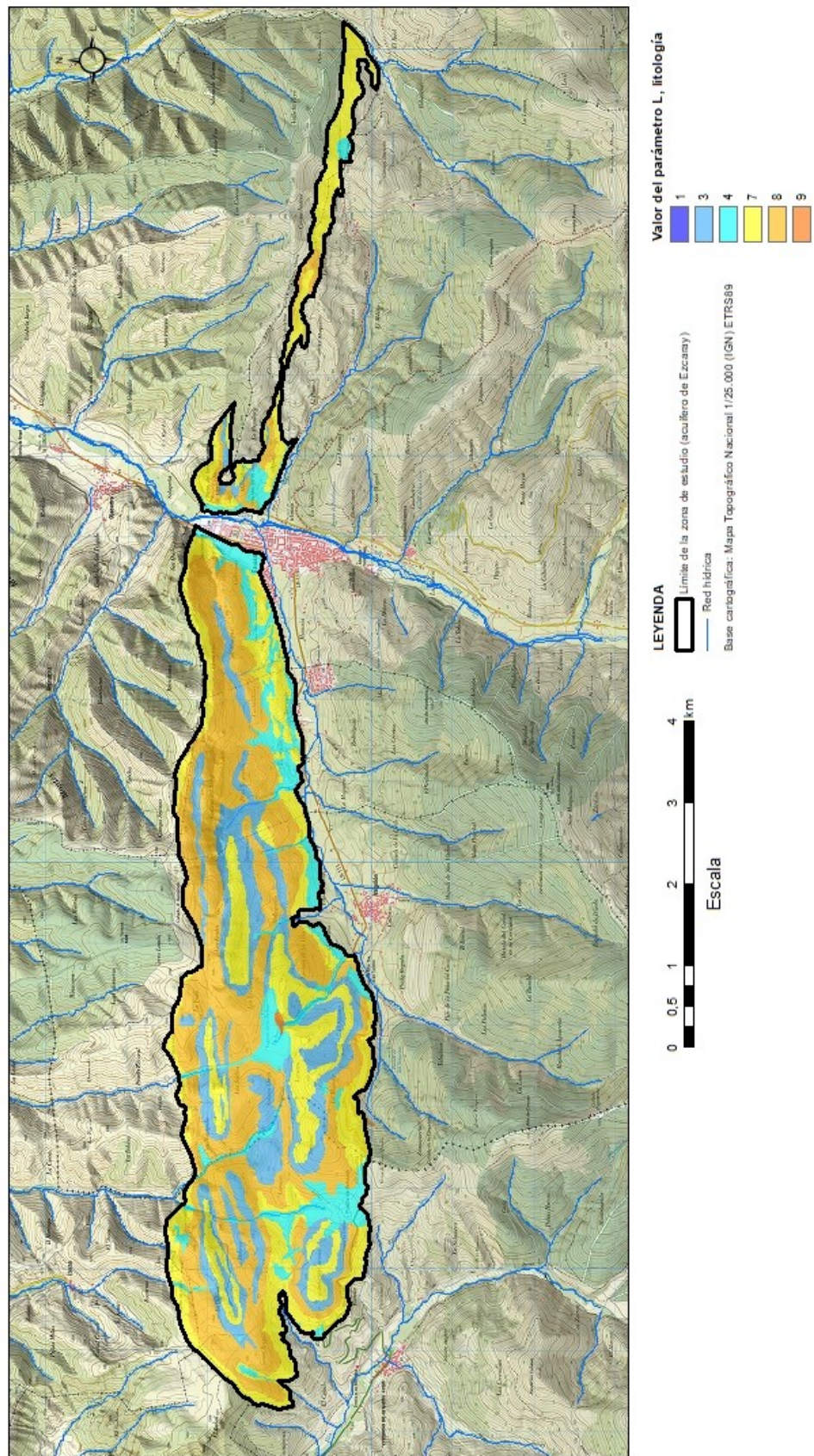


Figura 14.1.3.3-8. Mapa de la variable L, litología, en el acuífero carbonático de Ezcaray (Método APLIS v.2).

#### 14.1.3.4. *Parámetro I, infiltración preferente.*

Para identificar las zonas de infiltración preferente (campos de lapiaz, dolinas, poljes, etc.), en primer lugar se ha analizado la fotografía aérea de la zona y se ha cotejado con el mapa de zonas deprimidas (PITS, profundidad de cada depresión con respecto a su borde) (Figura 14.1.3.4-1), elaborado con la metodología descrita en Pardo-Igúzquiza *et al.* (2013), y que se basa en el método de supresión de depresiones (pits) de Jenson y Domingue (1988).

La citada metodología se basa en algoritmos numéricos para el relleno de zonas deprimidas, de modo que se pueden delinear zonas de drenaje continuas y las depresiones finales se obtienen mediante un álgebra de mapas donde al MDT, sin depresiones, se le subtrae el MDT original. El mapa de depresiones resultante representa la profundidad relativa del terreno con respecto al borde de la depresión.

A continuación, durante el trabajo de campo se han identificado y cartografiado tres zonas de infiltración preferente que, geomorfológicamente, se corresponden con sendas depresiones cerradas o semicerradas (flujo endorreico) (Figuras 14.1.3.4-2 y 14.1.3.4-3) y a las que, de acuerdo con los valores de la Tabla 4, se les ha asignado el máximo valor.



**Figura 14.1.3.4-2. Panorámica de la depresión en el extremo oeste de la zona de estudio.**





**Figura 14.1.3.4-3. Vista de la depresión de la laguna.**

Finalmente, se han definido otras zonas de infiltración moderada mediante la combinación de dos criterios, el topográfico y el geológico. Estas zonas se corresponden con zonas de baja pendiente, inferior al 10%, coincidentes con aquellos afloramientos de materiales jurásicos, términos J1, J2 y J4 de la serie estratigráfica, en los que se observa en superficie un mayor desarrollo de formas kársticas, fundamentalmente lapiazes (Figura 14.1.3.4-4). El resto de la masa no presenta formas de infiltración preferente destacadas.



**Figura 14.1.3.4-1. Mapa de zonas deprimidas (PITS). Los colores distintos del verde indican la profundidad de cada depresión respecto a su borde.**

El resultado cartográfico de todos los valores de las zonas de infiltración preferente anteriores se muestra en la Figura 14.1.3.4-5.

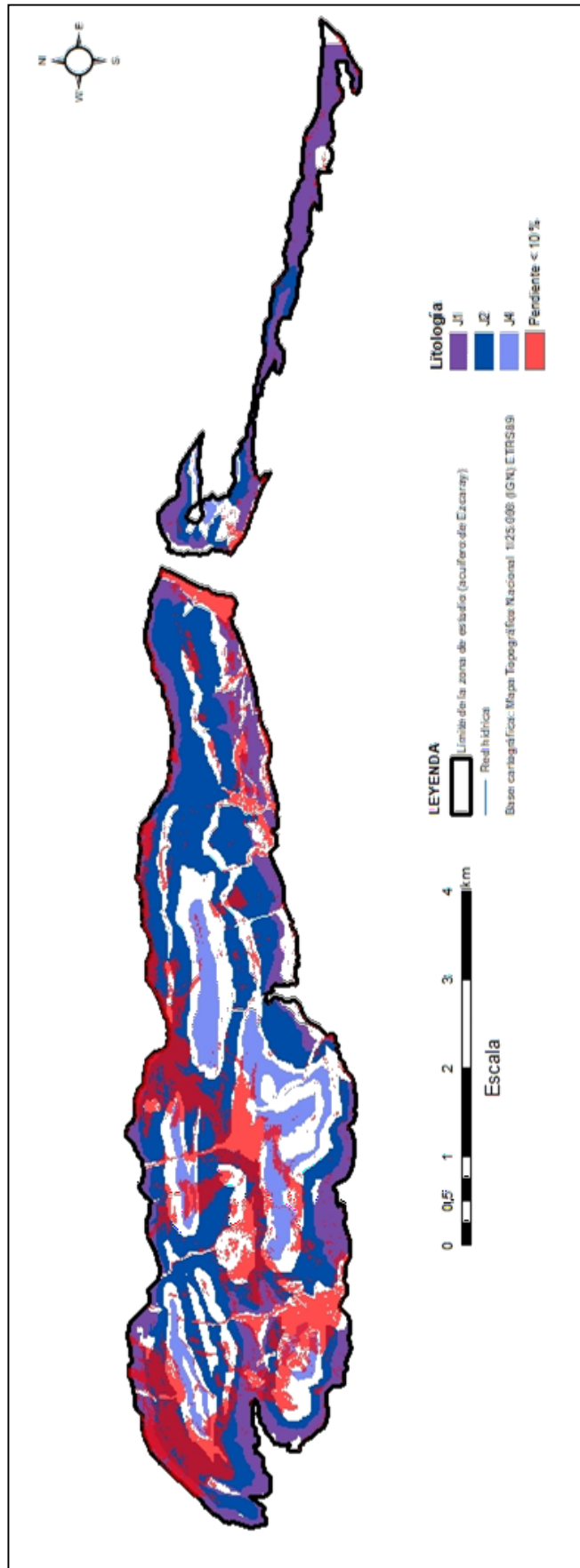


Figura 14.1.3.4-5. Mapa de la variable I, infiltración preferente, en el acuífero carbonático de Ezcaray (Método APLIS v.2).



Mapa de la variable I, infiltración preferente, en el acuífero carbonático de Ezcaray (La Rioja)  
Método APLIS v.2

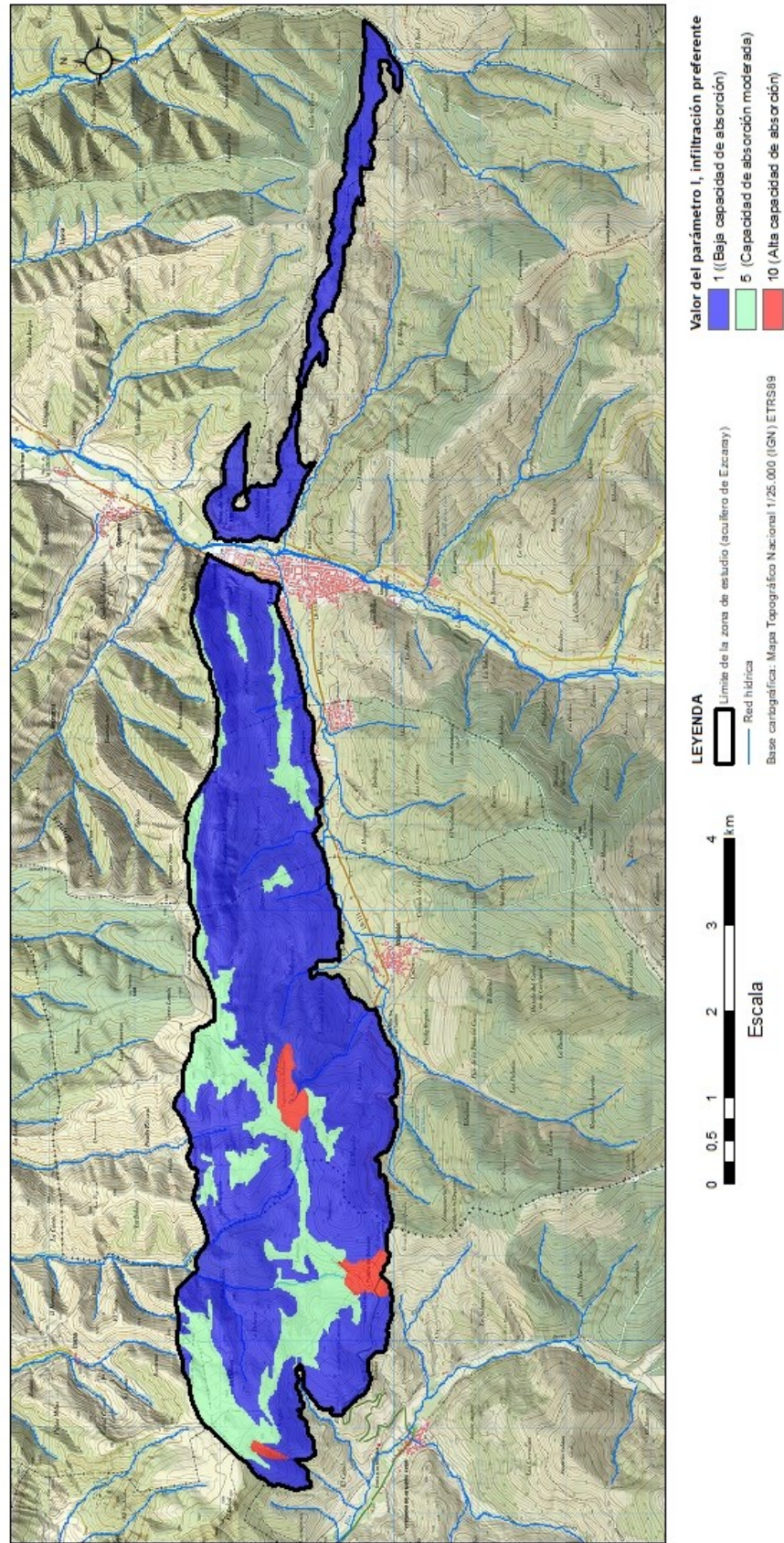


Figura 14.1.3.4-4. Definición de las zonas de infiltración moderada: zonas de baja pendiente (inferior al 10%), en los términos jurásicos con mayor desarrollo de formas kársticas (J1, J2 y J4).



#### 14.1.3.5. Parámetro S, suelo.

Para la asignación de los valores de la variable S, se parte del Mapa de suelos de España, escala 1/1.000.000, del Instituto Geográfico Nacional, estando representados en la zona de Ezcaray cuatro tipos de suelos (Figura 14.1.3.5-1).

La clasificación de suelos del Mapa de suelos de España (IGN, 2005) se basa en la taxonomía de suelos de USDA (United States Department of Agriculture) reconocida internacionalmente y desarrollada por el Ministerio de Agricultura de los Estados Unidos.

Por su parte, el método APLIS v.2 utiliza la clasificación de suelos de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), por lo que, para la asignación de valores de la variable Suelos de la Tabla 14.1.1-5, ha sido necesario establecer una equivalencia entre ambas clasificaciones (Tabla 14.1.3.5-1) utilizando para ello el documento “Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos” (IUSS Working Group WRB, 2015).

**Tabla 14.1.3.5-1. Puntuación asignada a la variable Suelo, según la Tabla 5 del método APLIS v.2, en la zona de estudio.**

| <b>Suelos Ezcaray</b>             | <b>Equivalencia</b>      | <b>Puntuación Suelo</b> |
|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Clasificación USDA</b>         | <b>Clasificación FAO</b> | <b>Tabla 5</b>          |
| Entisol Orthent Xerorthent        | Regosol calcáreo         | 8                       |
| Inceptisol Xerept<br>HaploXerept  | Fluviosol                | 8                       |
| Inceptisol Xerept<br>Dystroxerept | Cambisol cálcico         | 6                       |
| Mollisol Xeroll Haploxerol        | Leptosol móllico         | 10                      |

El resultado cartográfico obtenido de la aplicación del método APLIS v.2 en la variable suelo, en el acuífero carbonático de Ezcaray, se presenta en la Figura 14.1.3.5-2.

Mapa de suelos. Zona de estudio: Ezcaray (La Rioja)

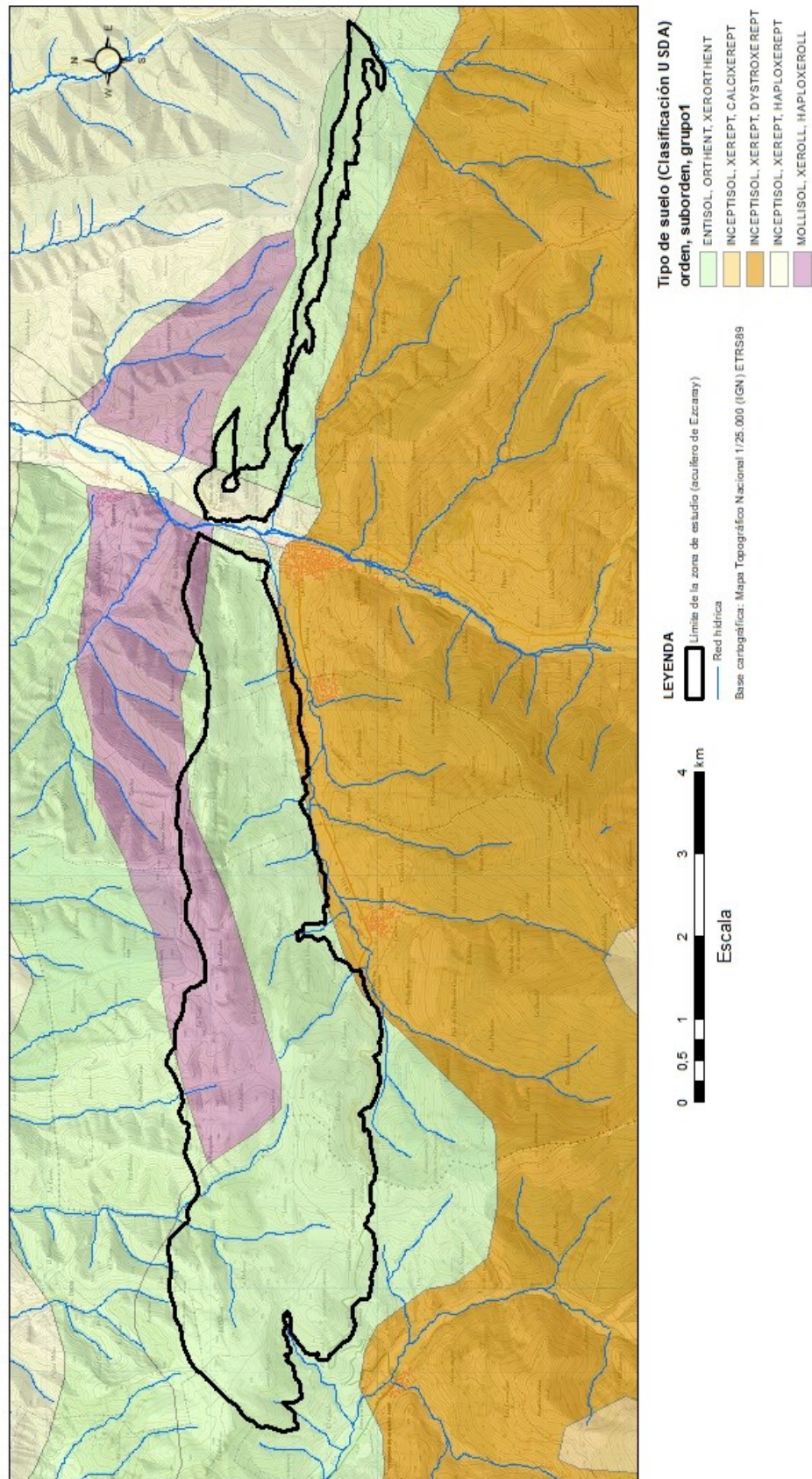


Figura 14.1.3.5-1. Mapa de suelos en la zona de estudio, obtenido del Mapa de Suelos de España, escala 1/1.000.000.



Mapa de la variable S, suelo, en el acuífero carbonático de Ezcaray (La Rioja)  
 Método APLIS v.2

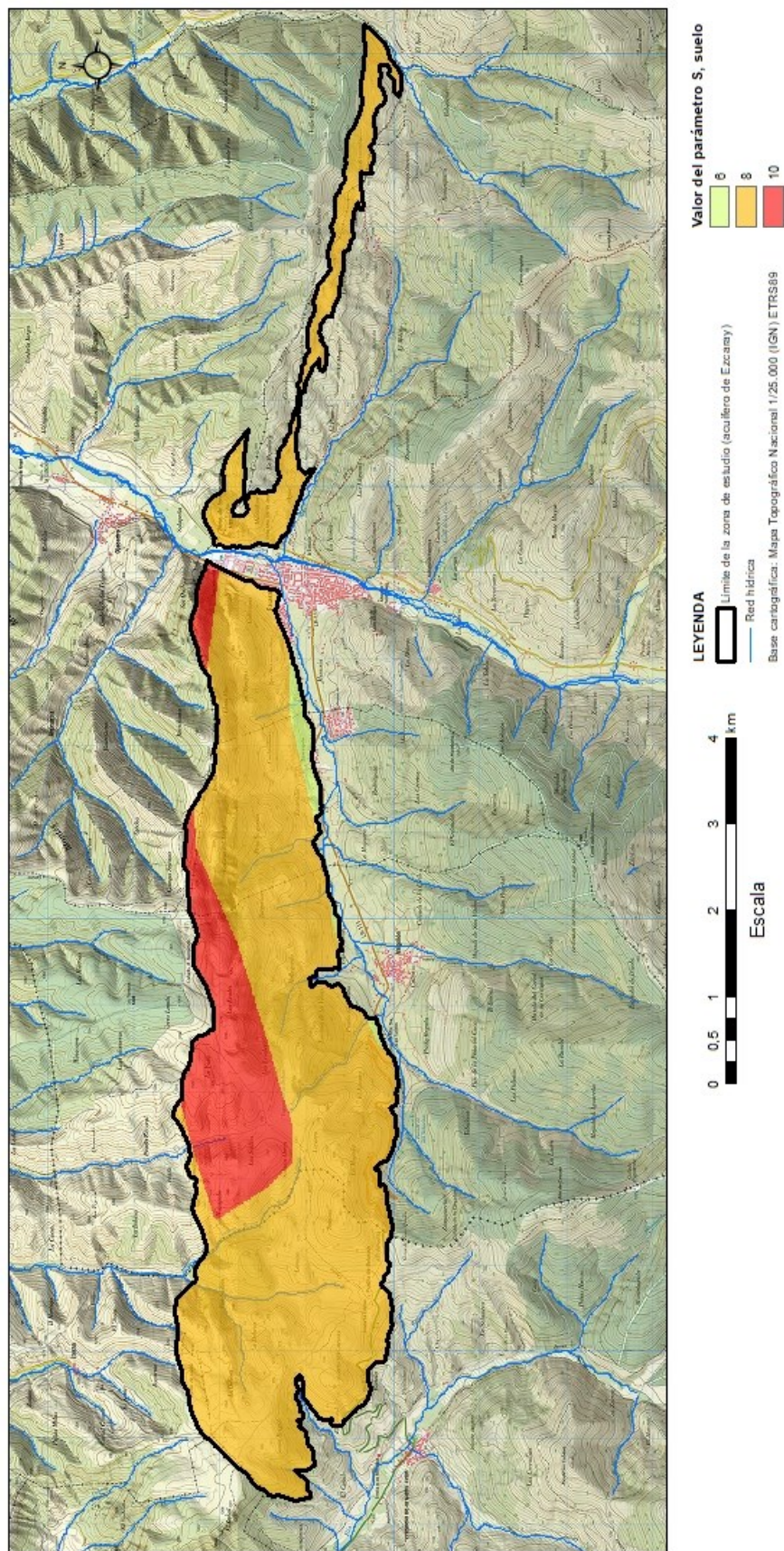


Figura 14.1.3.5-2. Mapa de la variable S, suelo, en el acuífero carbonático de Ezcaray (Método APLIS v.2).

### 14.1.3.6. Factor Fh, características hidrogeológicas.

Para la asignación de los valores de este nuevo factor Fh, se parte del mapa geológico de la zona realizado para el proyecto (Figura 14.1.3.3-7) y de las observaciones de campo. De acuerdo la Tabla 14.1.1-6, se consideran materiales acuíferos (valor 1) todos los materiales del Cuaternario y del Jurásico, los términos T5-T6, T6 y T7 del Terciario, la facies Munschelkalk (Tm) del Triásico y los niveles CB<sub>c</sub> y CA13 del Paleozoico, como se indica en la Figura 14.1.3.6-1. El resto de materiales (valor 0,1) se consideran impermeables a efectos del cálculo.

El resultado cartográfico obtenido se presenta en la Figura 14.1.3.6-2, donde se observa que prácticamente toda la superficie presenta valor 1 ya que la definición de los límites del acuífero sólo se han tomado los términos del acuífero jurásico.

|             |             | LEYENDA       | UNIDADES  |  |  |
|-------------|-------------|---------------|---|--|--|
| CUATERNARIO | PLEISTOCENO | HOLOCENO      | Qa  | Cuaternario Depositos Aluviales  |  |
|             |             | SUPERIOR      | Qcd   | Cuaternario Depositos de Cono de deyección                                     |  |
|             |             | MEDIO         | Qco   | Cuaternario Depositos Coluviales   |  |
|             |             | INFERIOR      | Qfd   | Cuaternario Fondo de dolina  |  |
|             |             |               | Qtr   | Cuaternario Depositos de Terrazas  |  |
| TERCIARIO   | MIOCENO     | PLIOCENO      | T7  | Conglomerados silíceos   |  |
|             |             | TURULENSE     | T6  | Conglomerados silíceos y lutitas   |  |
|             |             | VALLESENSE    | T5-T6   | Conglomerados poligenicos y lutitas  |  |
|             |             | ARAOGNENSE    | T5  | Conglomerados poligenicos  |  |
|             |             |               | T4  | Conglomerados areniscas y lutitas  |  |
| JURÁSICO    | CENOZOICO   | RAMBLIENSE    | T4cg  | Conglomerados  |  |
|             |             | CHADENSE      | T3  | Lutitas y Conglomerados  |  |
|             |             | MEDIO         | GALLOVENSE  | J5   | Margas y Calizas limosas y arenosas (Bath-Calloviense) |
|             |             |               | BATHONENSE  | J4   | Calizas masivas, bioclásticas y oolíticas              |
|             |             |               | BAVOGENSE   | J3   | Margas y calizas nodulosas Fm. Turmiel                 |
|             | INFERIOR    | AULENENSE     | J2  | Calizas Tableadas Fm. Cuevas Labradas  |  |
|             |             | TOARDENSE     | J1  | Calizas tableadas, Camiolas y Brechas Calcareas (Fms. Imon y Cortes de Tajuña) |  |
|             |             | PUENSBACHENSE | J2  | Calizas Tableadas Fm. Cuevas Labradas  |  |
|             |             | SINMURIENSE   | J4  | Calizas masivas, bioclásticas y oolíticas                                      |  |
|             |             | HETTANGIENSE  | J3  | Margas y calizas nodulosas Fm. Turmiel   |  |
| TRIÁSICO    | SUPERIOR    | RHETIENSE     | Tof   | Ofitas   |  |
|             |             | NORRIENSE     | Tk  | Facies Keuper Lutitas rojizas algo limosas con yesos                           |  |
|             |             | CARMIENSE     | Tm  | Facies Munschelkalk Calizas tableadas y laminadas ocreas, y dolomias           |  |
|             | MEDIO       | LADINIENSE    | Tb  | Facies Buntsandstein areniscas, limolitas y Conglomerados                      |  |
|             |             | ANISIENSE     | Tm  | Facies Munschelkalk Calizas tableadas y laminadas ocreas, y dolomias           |  |
| INFERIOR    | CLIMENIENSE | Tb            | Facies Buntsandstein areniscas, limolitas y Conglomerados |  |  |
| CARBONIFERO | SUPERIOR    | WESTFALIENSE  | CB  | Carbonifero Pizarras con areniscas y conglomerados                             |  |
|             |             |               | CBc   | Carbonifero niveles calcareos  |  |
|             | INFERIOR    |               | CBcg  | Carbonifero areniscas y conglomerados  |  |
|             |             |               | CA3   | Alternancia de Areniscas y Pizarras del Najerilla                              |  |
| CAMBRICO    | SUPERIOR    |               | CA21  | Pizarras carbonatadas y calcoesquistos Fm Azarulla                             |  |
|             |             |               | CA2   | Pizarras Fm Gatón  |  |
|             | INFERIOR    |               | CA12  | Dolomias Fms Mansilla y Urbión   |  |
| PRECAMBRIKO | INFERIOR    |               | CA11  | Areniscas y pizarras Fm Puntón   |  |
|             |             |               | PC  | Conglomerados Fm Anguiano  |  |
|             |             |               | PC  | Esquistos y pizarras Fm Anguiano   |  |

**Figura 14.1.3.6-1. Puntuación asignada al Factor Hidrogeológico, según la Tabla 14.1.1-6 del método APLIS v.2, en la zona de estudio. Se indican en rojo, sobre la columna litoestratigráfica de la zona, los valores de 1, el resto de materiales tienen valor de 0,1.**



Mapa del factor Fh, características hidrogeológicas, en el acuífero carbonático de Ezcaray (La Rioja)  
 Método APLIS v.2

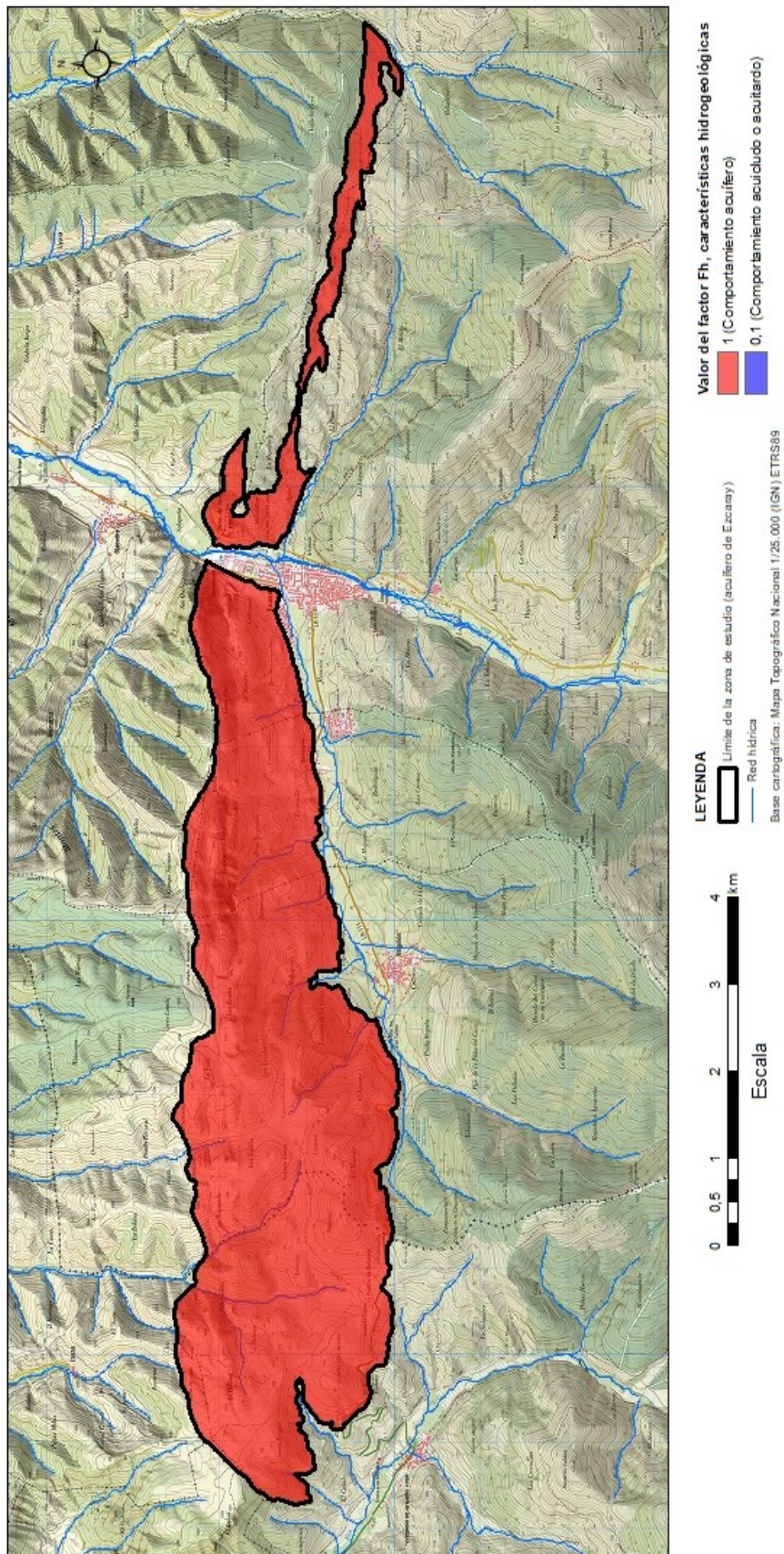


Figura 14.1.3.6-2. Mapa del factor Fh, características hidrogeológicas, en el acuífero carbonático de Ezcaray (Método APLIS v.2).



#### 14.1.4. Evaluación de la recarga.

La aplicación del método APLIS v.2 nos permite obtener el mapa de distribución espacial de la tasa de infiltración del **acuífero carbonático de Ezcaray**, donde la tasa media de recarga anual se representa agrupada en los cinco intervalos regulares recogidos en la Tabla 14.1.1-7 (Figura 14.1.4-1). En este mapa se muestra de forma clara la diferente tasa de recarga entre los dos sectores del acuífero, al Este y Oeste del río Oja, que es mayor en el sector Oeste donde aparecen las tasas de infiltración más elevadas (de entre 60 – 80 %) y que coinciden principalmente con zonas elevadas de escasa pendiente donde aparecen las escasas formas exokársticas del acuífero.

La tasa de recarga media calculada con el método APLIS v.2 en el total de acuífero estudiado es del 43,5 % para el sector Este y del 47 % para el sector Oeste, de acuerdo con los valores recogidos en la Tabla 14.1.4-1 donde se presentan los principales resultados conseguidos.

**Tabla 14.1.4-1. Valores estadísticos individuales de los parámetros y el valor final de la tasa de recarga en los dos sectores del acuífero, obtenidos mediante el método APLIS v.2**

|              | Variable                   | Valor mínimo | Valor máximo | Media        | Desviación estándar |
|--------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|
| <b>Este</b>  | <b>A</b>                   | 3            | 5            | 4,10         | 0,67                |
|              | <b>P</b>                   | 2            | 10           | 5,40         | 1,17                |
|              | <b>L</b>                   | 1            | 8            | 6,60         | 1,42                |
|              | <b>I</b>                   | 1            | 1            | 1            | 0                   |
|              | <b>S</b>                   | 8            | 8            | 8            | 0                   |
|              | <b>Fh</b>                  | 0,1          | 1            | 0,1          | 0,005               |
|              | <b>Tasa de recarga (%)</b> | <b>2,33</b>  | <b>54,44</b> | <b>43,47</b> | <b>5,33</b>         |
| <b>Oeste</b> | <b>A</b>                   | 3            | 5            | 4,43         | 0,60                |
|              | <b>P</b>                   | 2            | 10           | 6,40         | 1,60                |
|              | <b>L</b>                   | 1            | 9            | 6,31         | 2,02                |
|              | <b>I</b>                   | 1            | 10           | 2,10         | 2,09                |
|              | <b>S</b>                   | 6            | 10           | 8,32         | 0,83                |
|              | <b>Fh</b>                  | 0,1          | 1            | 0,1          | 0,02                |
|              | <b>Tasa de recarga (%)</b> | <b>2,33</b>  | <b>72,22</b> | <b>46,96</b> | <b>9,30</b>         |

La superficie total del acuífero carbonático de Ezcaray, que incluye todos los afloramientos de las dos poligonales utilizadas en los cálculos de este apartado, es de 19,963 km<sup>2</sup> (18,116 km<sup>2</sup> del sector Oeste y 1,847 km<sup>2</sup> del sector Este).

La mayor parte del acuífero (82,21 % de la superficie en el sector Este y el 63,92 % en el sector Oeste) presenta una tasa de recarga Moderada (entre 20 y 40% de la precipitación), mientras que las zonas con mayor tasa de recarga (clase Alta), solo ocupan un porcentaje reducido de la superficie (11,23 % de la superficie) (Tabla 14.1.4-

2, Figura 14.1.4-2), y se localizan, como se ha dicho, en el sector Oeste del acuífero en zonas elevadas de escasa pendiente donde son más frecuentes las formas exokársticas.

**Tabla 14.1.4-2. Superficie de tasa de recarga según los intervalos de porcentaje de lluvia que recarga a los dos sectores del acuífero, obtenidos del método APLIS v.2**

|       | <b>Clase de recarga</b> | <b>Intervalo de lluvia infiltrada (%)</b> | <b>Área (km<sup>2</sup>)</b> | <b>Área (%)</b> |
|-------|-------------------------|---|------------------------------|-----------------|
| Este  | Muy baja                | ≤ 20                                      | 0,005                        | 0,24            |
|       | Baja                    | 20 – 40                                   | 0,324                        | 17,55           |
|       | Moderada                | 40 - 60                                   | 1,518                        | 82,21           |
|       | Alta                    | 60 - 80                                   | 0                            | 0               |
|       | <b>Suma</b>             |   | <b>1,847</b>                 | <b>100,00</b>   |
| Oeste | Muy baja                | ≤ 20                                      | 0,008                        | 0,04            |
|       | Baja                    | 20 – 40                                   | 4,494                        | 24,80           |
|       | Moderada                | 40 - 60                                   | 11,580                       | 63,92           |
|       | Alta                    | 60 - 80                                   | 2,035                        | 11,23           |
|       | <b>Suma</b>             |   | <b>18,116</b>                | <b>100,00</b>   |

Mapa de distribución espacial de la tasa de recarga en el acuífero carbonático de Ezcaray (La Rioja)  
 Método APLIS v.2

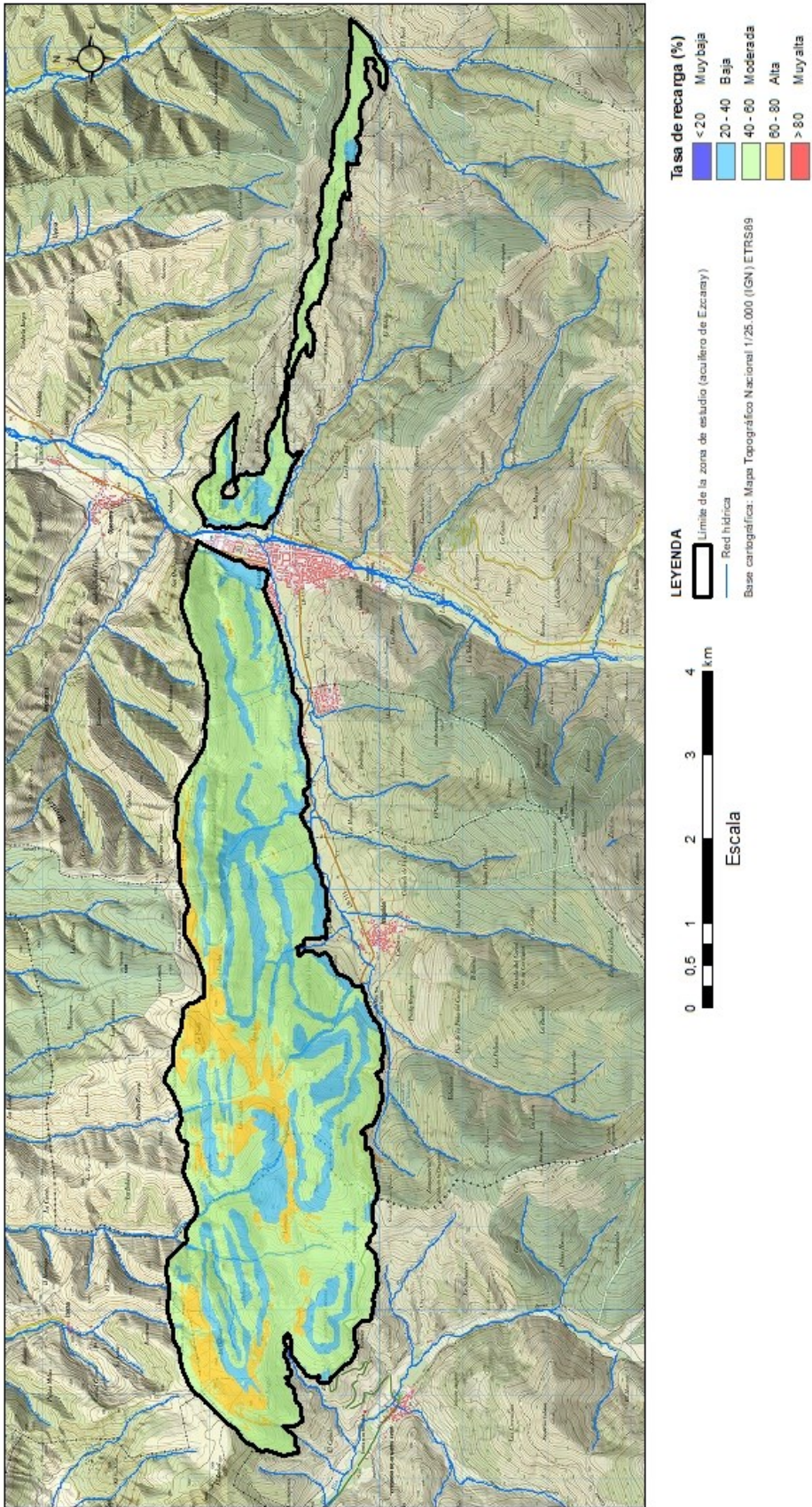
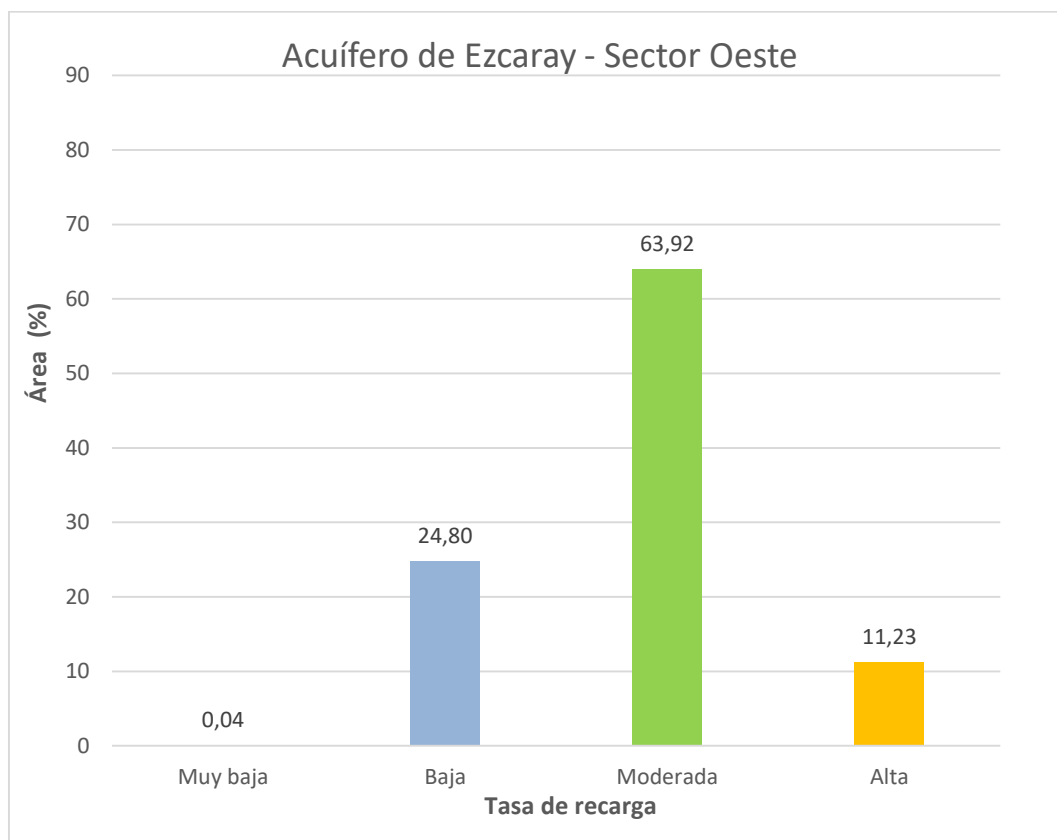
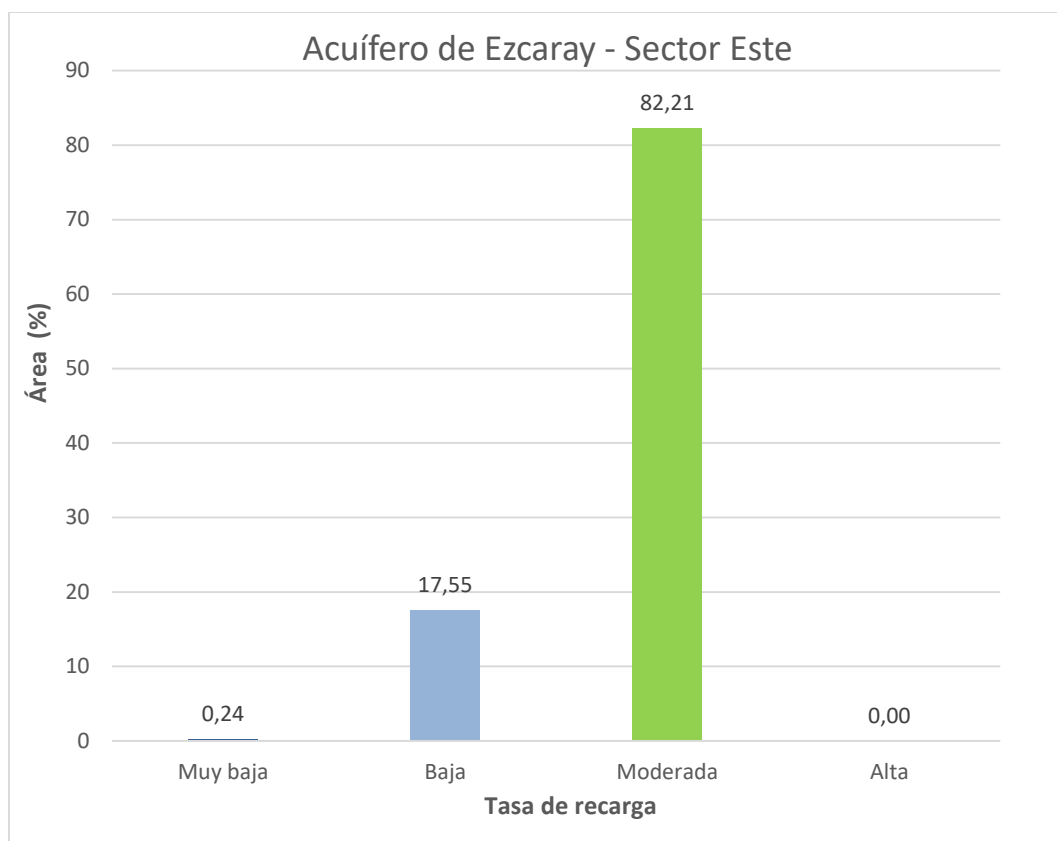


Figura 14.14-1. Mapa de distribución espacial de tasa de recarga en el acuífero carbonático de Ezcaray (Método APLIS v.2).



**Figura 14.1.4-2. Superficie (%) de la tasa de recarga en el acuífero carbonático de Ezcaray.**

La variable I (formas de infiltración preferencial) tiene un peso importante en los resultados, aunque no lo suficiente para incrementar la tasa de recarga hasta el al 80% (clase muy alta) que no aparece representada en el acuífero en ninguno de los sectores.

De acuerdo con el estudio climático realizado en este trabajo (apartado 6.3. Identificación de ciclos climáticos y tipificación climática), la precipitación característica de la zona se ha obtenido en la estación 9115W-Valgañon (cota 927 m s.n.m.) después de restituir los valores de la estación para un periodo de 37 años (01/01/1980 – 30/09/2017), siendo la precipitación media anual de la serie de 791,1 mm/año (Tabla 14.1.4-3).

**Tabla 14.1.4-3. Precipitación media anual de la estación de 9115W-Valgañon (serie 1980-2017)**

| <b>Estación</b>                         | <b>Nº de años</b> | <b>Tipo de año</b>          | <b>Precipitación media (mm/a)</b> |
|---|-------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| 9115W-<br>Valgañon (Serie<br>1980-2017) | 6                 | Muy húmedo                  | 983,1                             |
|   | 7                 | Húmedo                      | 888,6                             |
|   | 11                | Medio                       | 801,3                             |
|   | 8                 | Seco                        | 686,9                             |
|   | 5                 | Muy seco                    | 568,6                             |
|   | <b>37</b>         | <b>Promedio de la Serie</b> | <b>791,1</b>                      |

Aplicando la tasa media de recarga del 43,47 % para el sector Este y del 46,96 % para el sector Oeste, obtenidas en el cálculo del método APLIS v.2, a esta precipitación media anual de la serie (791,1 mm/a), se obtiene una tasa de recarga anual al acuífero carbonático de Ezcaray de 343,89 mm (343.890 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) para el sector Este y 371,50 mm (371.500 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) para el sector Oeste, que, aplicada a sus respectivas superficies (1,847 km<sup>2</sup> sector Este y 18,116 km<sup>2</sup> sector Oeste), supone una recarga media anual de 0,635 hm<sup>3</sup>/año en el sector Este y de 6,73 hm<sup>3</sup>/año en el sector Oeste, lo que representa un total de 7,4 hm<sup>3</sup>/año en el acuífero completo.



## **14.2. Estimación de la recarga mediante el modelo Visual Balan.**

Se utiliza el código Visual BALAN (Samper et al., 2005) para cuantificar el balance hídrico (BH) del acuífero carbonatado comprendido entre los ríos Tritón y Santurdejo de la Masa de Agua Subterránea 65 Pradoluengo-Anguiano (MASb 65). La decisión de emplear este código se basó en que es una metodología ampliamente contrastada, probablemente sea el código numérico más aplicado en la cuantificación del BH en la España peninsular (Heredia et al., 2005, Samper et al., 2005; Heredia, 2016) e insular (Heredia y Murillo, 2002) y, en particular, en la cuenca del Ebro (Samper et al., 2007).

### **14.2.1. Objetivos**

Los objetivos de este estudio son:

- La cuantificación de la recarga al acuífero carbonatado y su evolución temporal.
- El análisis de la recarga en escenarios hidroclimáticos bajo estrés hídrico.

### **14.2.2. Metodología**

Los pasos metodológicos seguidos fueron los siguientes:

- Determinación del dominio espacial de modelación y de su sectorización.
- Análisis de la información climatológica (precipitación y temperatura), que se expone en el capítulo 6, y piezométrica que se realiza en el capítulo 11.
- Modelación del Balance Hídrico de la MASb65:
  - Identificación de parámetros relevantes del modelo: análisis de sensibilidad.
  - Calibración del modelo: identificación de valores óptimos de parámetros.
  - Simulación de BH para todo el período y en todo el ámbito de estudio.
- Análisis de la recarga:
  - Evolución temporal.
  - Identificación de períodos críticos y valores alcanzados.
  - Escenarios estacionales críticos y rangos alcanzados.

### **14.2.3. Modelo de balance hídrico**

#### *14.2.3.1. Código Visual Balan*

El código de modelación Visual BALAN (Samper et al., 2005) permite desarrollar modelos semiagregados. Es de empleo usual para el cálculo de balances hídricos y evaluación de recarga de acuíferos. Además, es una potente herramienta para el análisis hídrico integral de una cuenca a escala de ésta (escala macro) debido a la riqueza de métodos de representación de los componentes del ciclo hídrico que tiene implementados.

A partir de la información de precipitación (líquida o sólida) y temperatura, Visual Balan determina distintos componentes del ciclo hídrico: interceptación, escorrentía superficial, evapotranspiración potencial y real, humedad del suelo, flujo hipodérmico, recarga en tránsito y recarga al acuífero, escorrentía subterránea, caudal total circulante, altura de nieve, escorrentía nival. Para ello, el código simula una serie de procesos del ciclo hídrico mediante diferentes modelos alternativos que describen distintos mecanismos. Esto requiere definir un gran número de parámetros del modelo, muchos de los cuales pueden resultar poco relevantes para la calibración del modelo. Debido a ello, como primer paso metodológico del proceso de calibración se realiza un análisis de sensibilidad, para en una primera aproximación identificar los parámetros para los que el modelo es sensible.

#### 14.2.3.2. Criterios de calibración

Los criterios de calibración valoran cómo de bien reproduce un modelo los datos observados para unos valores de parámetros determinados. Así, en la medida que “mejoran” los valores de estos criterios, se puede determinar cuáles son los valores de los parámetros del modelo más adecuados (valores óptimos) para representar al sistema real. Este proceso de determinación del valor adecuado se llama “calibración de un modelo”.

Los criterios de calibración utilizados para evaluar la bondad con que las modelos reproduce la evolución piezométrica se basa en el residuo de los niveles,  $r_{hi}$ ;

$$r_{hi} = (h_{oi} - h_{ci}) \quad (14.2.3.2-1)$$

Donde:  $r_{hi}$  es el residuo de los niveles en el tiempo  $i$  y  $h_{oi}$  y  $h_{ci}$  son los niveles observados y calculados en el tiempo  $i$ , respectivamente.

Los criterios de calibración seguidos fueron:

1. Media de los residuos de niveles:

$$\overline{res_h} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_{hi} \quad (14.2.3.2-2)$$

Donde,  $N$  es el número de observaciones.

2. Media del valor absoluto de los residuos de niveles:

$$\overline{|res_h|} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |r_{hi}| \quad (14.2.3.2-3)$$

3. Media del cuadrado de los residuos:

$$\overline{res_h^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_{hi}^2 \quad (14.2.3.2-4)$$

4. Coeficiente de correlación entre  $h_{oi}$  y  $h_{ci}$ :

$$R_{h_{O_i}, h_{C_i}} = \frac{cov(h_{O_i}, h_{C_i})}{\sigma_{Q_{O_i}} \sigma_{Q_{C_i}}} \quad (14.2.3.2-5)$$

Donde  $cov(h_{O_i}, h_{C_i})$  es la covarianza entre  $h_{O_i}$  y  $h_{C_i}$  y  $\sigma_{Q_{O_i}}$  y  $\sigma_{Q_{C_i}}$  son las desviaciones estándares de  $h_{O_i}$  y  $h_{C_i}$ , respectivamente.

5. Los parámetros de la recta de correlación entre  $h_{O_i}$  y  $h_{C_i}$ :  $m$  su pendiente e  $y_0$  su término independiente.

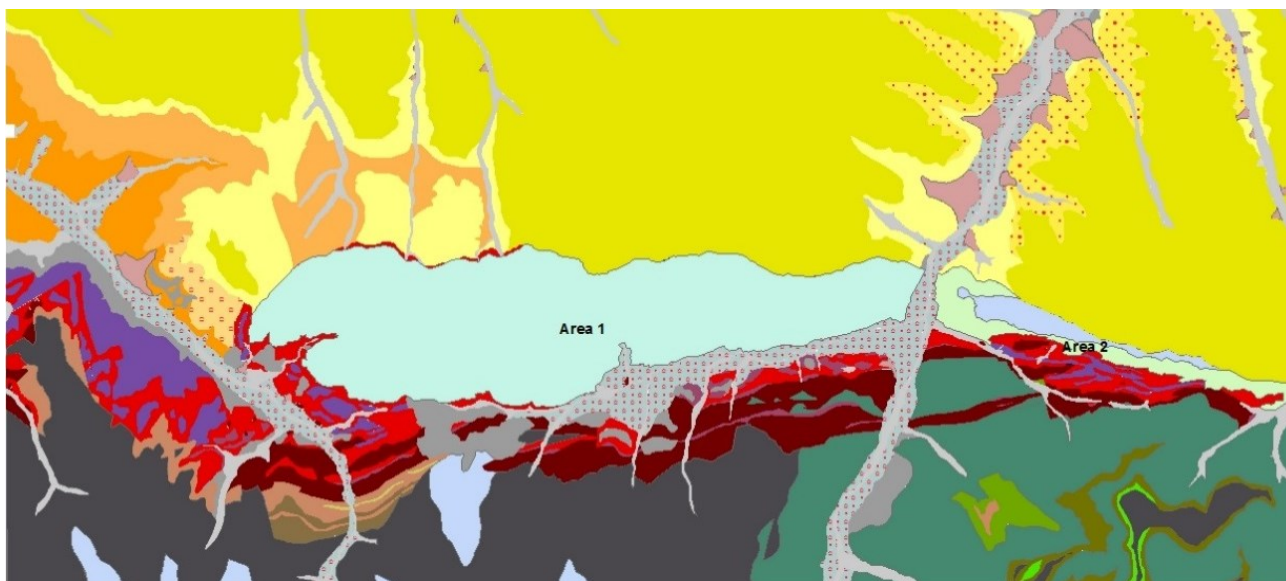
La ecuación (14.2.3.2-3) permite valorar la calidad del ajuste respecto al conjunto de los datos; la ecuación (14.2.3.2-4) evalúa la calidad del ajuste respecto al conjunto de los datos pero dándole un mayor peso al ajuste respecto a los datos de valor alto (por ejemplo los niveles pico), también es la función objetivo de calibración del modelo que emplea Visual BALAN (FOC), y la ecuación (14.2.3.2-5),  $m$  e  $y_0$  indican la calidad con que el modelo reproduce la tendencia del conjunto de las observaciones.

#### 14.2.4. Aplicación del código Visual Balan

##### 14.2.4.1. Zona a modelar

El acuífero carbonatado está atravesado por el río Oja (Figura 14.2.4.1-1), aunque éste no se encuentra en contacto directo con el acuífero pues lo separan un depósito de materiales aluviales. Se definen así, sendos bloques de la formación carbonatada a ambos márgenes del río. En régimen natural, estos bloques se encuentran desconectados hidrodinámicamente entre sí. Debido a ello, en la modelación realizada, ambos bloques se han tratado por separado.

En el bloque del macizo carbonatado situado en la margen izquierda del río (Área 1) se planimetró, en lo referente a superficie de recarga, una extensión aflorante de 18,12 Km<sup>2</sup>. En cuanto al bloque situado en margen derecha, se cuantificó la superficie aflorante de 1,85 km<sup>2</sup> (Área 2).



**Figura 14.2.4.1-1. Delimitación de las zonas de estudio.**

En la margen izquierda del río Oja, en el extremo Este del bloque izquierdo se sitúa el sondeo “Ezcaray -1. PARQUE DE MAQUINARIA”, NIPA: 2111-3-0068 (X UTM-ETRS89: 498409, Y UTM-ETRS89: 4686331). Este sondeo de 209 m de profundidad, es controlado piezométricamente por la Confederación Hidrográfica del Ebro y se mide desde el 18/04/2002 hasta el presente (650 datos de nivel). Por otro lado, analizando el comportamiento de este piezómetro con otros sondeos situados en las inmediaciones del mismo, también en la margen izquierda, se le considera poco o nada influenciado por la actividad antrópica. Debido a esto, se le considera representativo del comportamiento de este bloque. Así, la calidad y extensión de su serie piezométrica ha hecho que el modelo de Balance Hídrico de este bloque se calibre con esta serie de niveles. El período de calibración se extiende del 18/04/2002 al 30/06/2017. El Balance Hídrico para el resto del período 01/10/1980 al 30/09/2017, se realizó mediante simulación del modelo con los parámetros resultantes de la calibración.

En el bloque de la margen derecha del río no se ha encontrado ningún sondeo que posea una serie extensa y, fundamentalmente, que no se encuentre influenciado por los bombeos que se realizan. Por lo tanto, dada la similitud geológica y fisiográfica de ambos bloques, el Balance Hídrico del bloque de la margen derecha se ha obtenido mediante la simulación del modelo con los parámetros obtenidos en la calibración del bloque de la margen izquierda, con la debida modificación de la superficie aflorante.

#### 14.2.4.2. Identificación de parámetros relevantes en la calibración: Análisis de Sensibilidad.

Usualmente, el análisis de sensibilidad es un paso de la modelación que se realiza *a posteriori* de la calibración y tiene como objetivo valorar la relevancia de los parámetros calibrados en el comportamiento del modelo. En este caso particular de modelación, debido a la complejidad y gran número de parámetros con los que está dotado el código Visual BALAN, se realizará un análisis de sensibilidad previo al proceso de calibración, con los objetivos de:

- Identificar los parámetros que *a priori* serían relevantes en el comportamiento del modelo, para abordar la calibración de estos, desestimando los parámetros superfluos.
- Definir valores de parámetros adecuados y plausibles para iniciar el proceso de calibración.

La sensibilidad del modelo ante la variación del valor de un parámetro se evalúa mediante el contraste con la variación de la Función Objetivo de Calibración de Visual BALAN, FOC, (4).

En los resultados del análisis de sensibilidad (Anexo 14.2-I) se observa que los parámetros para los que la FOC del modelo varía son los siguientes:

- La Porosidad presenta valores mínimos entre 0,06 y 0,07 y una variabilidad de orden 1 mm/a.
- La Capacidad de Campo presenta valores mínimos en 0,07 y una variabilidad de orden 1 mm/a.
- El Punto de marchitez presenta un valor mínimo en 0,07 y una variabilidad de 10 mm/a.
- El Espesor del suelo presenta valores mínimos para valores mayores
- El Coeficiente de Penman Grindley (CEPG) presenta el valor mínimo en 1 y una variabilidad de orden  $10^{-1}$  mm/a.
- El Parámetro de flujo preferente (CKRD) presenta unos valores mínimos que son menores a 0,1 y su variabilidad es de orden de 1 mm/a.
- El Coeficiente de agotamiento del flujo hipodérmico (1/días) presenta el valor mínimo en 1 y su variabilidad es de orden de 1 mm/a.
- El Coeficiente de flujo preferente (FRD) presenta el valor mínimo en 0 y su variabilidad es de orden de  $10^{-1}$  mm/a.
- El Coeficiente de agotamiento del acuífero (1/días) presenta valores mínimos a partir de 0,02 y su variabilidad es del orden de la unidad en mm/a.
- La Conductividad hidráulica en la ZNS (mm/días) presenta valores mínimos en 0,7 y su variabilidad es de orden  $10^{-1}$  mm/a por cada 0,1 que aumente la permeabilidad vertical en la zona vadosa.
- El Coeficiente de agotamiento de la percolación (1/días) presenta el valor mínimo en 0,05 y varía un orden de  $10^{-1}$  mm/a.



- El Coeficiente de almacenamiento del acuífero presenta el valor mínimo en 0,02 y tiene una variabilidad de orden de la unidad en mm/a.
- La Capacidad de infiltración para el suelo en condiciones de capacidad de campo ( $CIM_{\phi}$ ) presenta valores mínimos en 10 mm/día y una variabilidad de orden  $10^{-1}$ mm/a.
- La Capacidad de infiltración para el suelo a punto de marchitez ( $CIM1$ ) presenta valores mínimos en 10 mm/día y una variabilidad de 1 mm/a.

#### 14.2.4.3. Calibración

El modelo se ha calibrado para el periodo del 18/04/2002 al 30/06/2017 y representa todo el bloque del acuífero carbonatado situado en la margen izquierda del río Oja y derecha del Tirón. Los métodos y parámetros iniciales en el proceso de calibración fueron los siguientes:

- Suelo edáfico, se adoptó una porosidad de 0,07, con un punto de marchitez de 0,02, una capacidad de campo de 0,063 y una humedad inicial de 0,2. Para el espesor del suelo se adoptó un valor de 0,3 m y una conductividad hidráulica de 0,1 cm/s.
- Marco geográfico, la zona de estudio se encuentra a una latitud aproximada de  $42^{\circ}19'52''$  y el área de la cuenca vertiente supone 18,12 Km<sup>2</sup>.
- Recarga en tránsito diferida, para su cálculo se aplicó el método convencional considerando un flujo preferente por fisuras con un parámetro de flujo preferente (CKRD) de 0,08 y un coeficiente de flujo preferente (FRD) de 0,2.
- Evapotranspiración potencial, se calculó mediante el método de Penman-Grindley modificado con un valor para la constante radicular de Penman-Grindley (CRPG) de 0,1 mm y tomando un coeficiente de Penman-Grindley (CEPG) de 1.
- Escorrentía superficial, se calculó mediante el modelo de Horton, tomando una capacidad de infiltración para el suelo en condiciones de capacidad de campo ( $CIM_{\phi}$ ) de 5 mm/d y una capacidad de infiltración para suelo a punto de marchitez ( $CIM1$ ) de 15 mm/d.
- Zona no saturada, se calculó mediante el método implícito considerando: un coeficiente de agotamiento del flujo hipodérmico de  $0,09 \text{ d}^{-1}$ , que corresponde a un tiempo de semi-agotamiento de 7,7 días; una conductividad hidráulica vertical de 2,3 mm/d; un coeficiente de agotamiento de la percolación de  $0,03 \text{ d}^{-1}$ , que corresponde a un tiempo de semi-agotamiento de 23,1 días y un contenido inicial de agua de 10 mm.
- Acuífero, se adoptó un modelo agregado de una celda, con un coeficiente de agotamiento de  $0,0091 \text{ d}^{-1}$ , que corresponde a un tiempo de semi-agotamiento de 76,2 días, un coeficiente de almacenamiento de 0,011, un nivel inicial de 803 m y un nivel de descarga de 800 m.

Los métodos y valores de parámetros que se modificaron al calibrar el modelo fueron los siguientes:

- Suelo edáfico, la conductividad hidráulica ha tomado un valor de 0,07 cm/s.
- Escorrentía superficial, se ha modificado la capacidad de infiltración para suelo a punto de marchitez (CIM1) a 13 mm/d.
- Zona no saturada, se adopta un coeficiente de agotamiento del flujo hipodérmico de 0,24 d<sup>-1</sup>, que corresponde a un tiempo de semi-agotamiento de 2,9 días; una conductividad hidráulica vertical de 1,82 mm/d; un coeficiente de agotamiento de la percolación de 0,055 d<sup>-1</sup>, que corresponde a un tiempo de semi-agotamiento de 12,6 días.
- Acuífero, se ha modificado el valor del coeficiente de agotamiento a 0,009 d<sup>-1</sup>, que corresponde a un tiempo de semi-agotamiento de 77 días.

En la tabla 14.2.4.3-1 se presenta los criterios de calibración resultantes del modelo final y en la figura 14.2.4.3-1 “Correlación entre niveles observados y calculados” y figura 14.2.4.3.1-2 “Hidrograma observado y calculado” los resultados correspondientes de este modelo. Además del bajo valor de los criterios medios, se aprecia que el coeficiente de correlación es bastante bueno, 0,81. En cuanto a la recta de correlación, la pendiente es cercana a 1 y su término independiente es, aproximadamente un 9,6 % del valor de los niveles, lo cual permite dar una idea de que se ha representado adecuadamente la serie de datos observados (Figuras 14.2.4.3-1 y 14.2.4.3-2).

**Tabla 14.2.4.3-1. Criterios de calibración: Modelo final.**

| MODELO       | Media de los residuos de niveles<br>$\overline{res_h}$ | Media del valor absoluto de los residuos<br>$ \overline{res_h} $ | Media del cuadrado de los residuos<br>$\overline{res_h^2}$ | Coeficiente de correlación<br>$R_{h_{0i},h_{Ci}}$ | Parámetros de la recta de correlación |   |
|--------------|--|--|--|---|---------------------------------------|---|
|              |  |  |  |   | Pendiente<br>m                        | Término independiente<br>Y <sub>0</sub> |
| <b>FINAL</b> | -0,77  | 1,07   | 1,93   | 0,8105  | 0,905                                 | 77,425                                  |

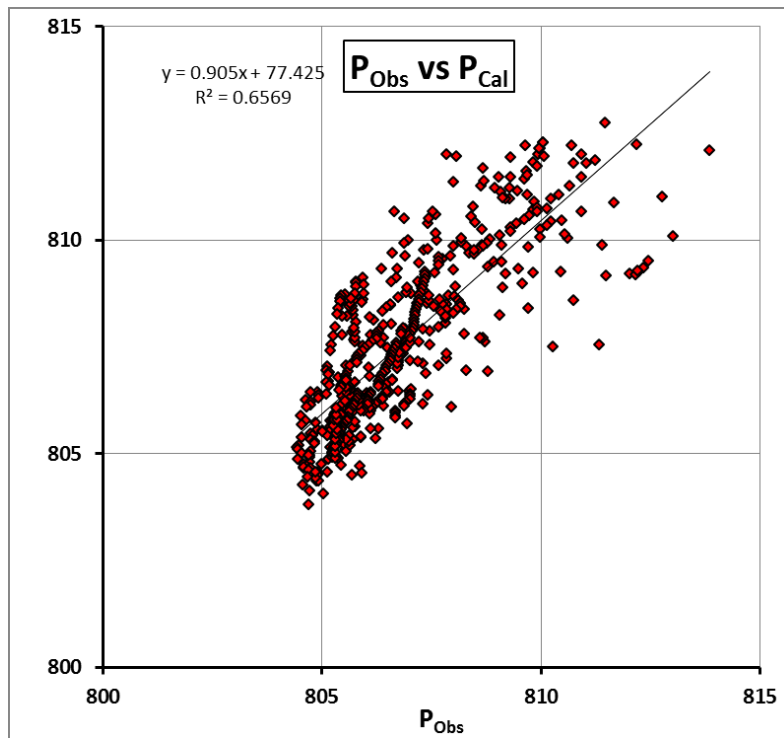


Figura 14.2.4.3-1. Correlación entre niveles observados y calculados

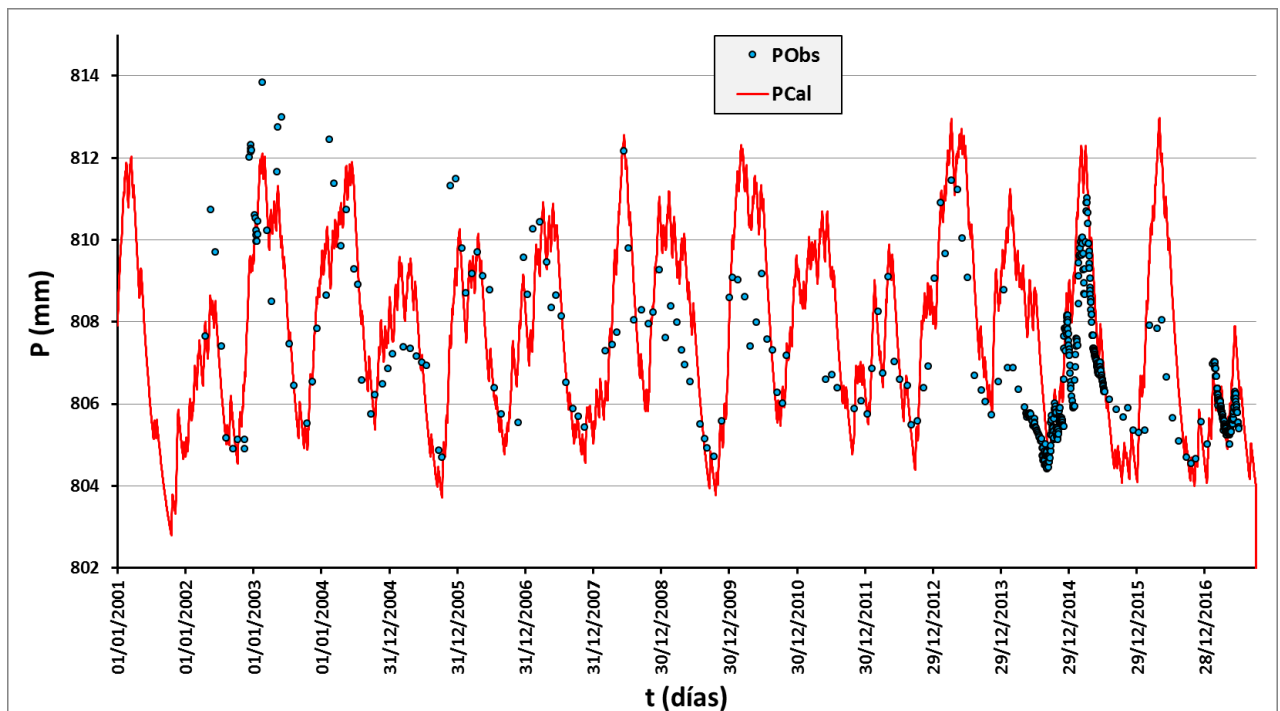


Figura 14.2.4.3-2. Hidrograma observado y calculado: Modelo final.

La simulación de este bloque para el resto del período 01/10/1980 al 30/09/2017, se realizó con los parámetros del modelo.

En el balance de agua para la parte del macizo carbonatado situado en el margen derecho del río Oja comprendido entre este y el río Santurdejo, se han usado los mismos parámetros resultantes de la calibración. En este caso la superficie de la zona de estudio se planimetró en 1,85 Km<sup>2</sup>.

14.2.4.4. Análisis y presentación de resultados

En la figura 14.2.4.4-1 se presenta la evolución de la recarga, la precipitación anual y la relación porcentual entre ellas correspondiente al conjunto del acuífero carbonatado comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo. Igualmente, en la tabla 14.2.4.4-1 se expone la información referente a la recarga anual analizada de forma pormenorizada. En el Anexo 14.2-II se presentan tablas con una estructura analítica similar correspondientes a la recarga natural de los bloques de las márgenes izquierda y derecha del río Oja. No obstante, debe señalarse que, en términos generales, las recargas de cada uno de los bloques guarda una relación con la recarga del conjunto del acuífero igual a la que guardan las respectivas superficies aflorantes. Así, la recarga en el bloque de la margen izquierda (sup.=18,12 Km<sup>2</sup>) es un 90,67% de la recarga total del acuífero (sup.=19,97 Km<sup>2</sup>) y en la margen derecha (sup.= 1,85 Km<sup>2</sup>) es un 9,33%.

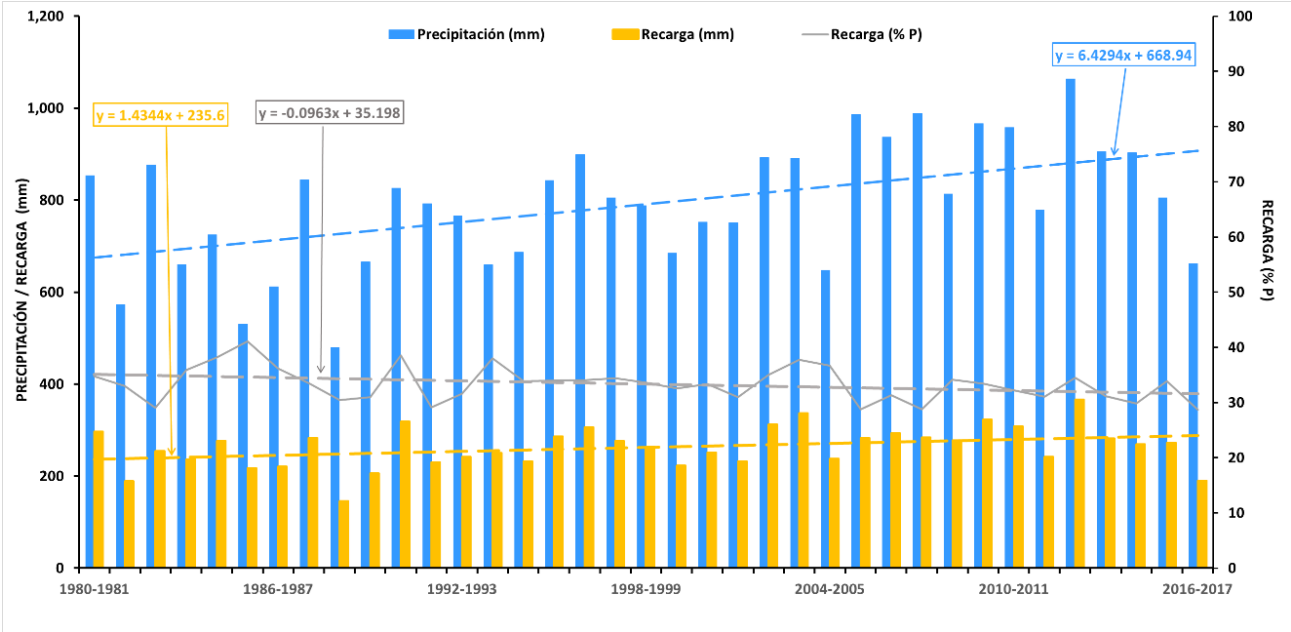


Figura 14.2.4.4-1. Precipitación y recarga anuales y la relación entre ellos: 1980/1981-2016/2017.

La precipitación y la recarga anual en la zona de estudio tienen una tendencia creciente para el período modelado. Este carácter creciente lo condiciona el extenso y marcado ciclo seco con el que empieza el período de estudio (Fig. 14.2.4.4-1, Tabla 14.2.4.4-1). En el caso de la recarga, lógicamente ésta crece con las precipitaciones, aunque no proporcionalmente, lo hace mucho más suavemente -se incrementa 4,5 veces menos que la precipitación-. Esto indica la existencia de un control hidrodinámico en el macizo carbonatado tanto en los mecanismos de recarga del acuífero, como en la capacidad de almacenamiento de éste -ya sea por sus rasgos capacitivos y/o por su cota de desborde-. El hecho que la recarga se incremente a un “ritmo” menor que la precipitación se refleja en la relación Recarga/Precipitación, que tiene una tendencia decreciente.



| Años Hidrol | Precipitación (mm) | Recarga (mm) | Recarga (% P) | Recarga (hmm3) | Recarga mensual máxima (hmm3) | Mes Recarga Max | Recarga mensual mínima (hmm3) | Mes Recarga mínima   | Nº de meses con recarga nula | Ciclo            | Tipo de año    |
|-------------|--------------------|--------------|---------------|----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------------|------------------------------|------------------|----------------|
| 1980-1981   | 853,30             | 296,84       | 35            | 5,93           | 0,92                          | Dic             | 0,00                          | Ago                  | 1                            | Ciclo indefinido | Años muy seco  |
| 1981-1982   | 572,93             | 189,30       | 33            | 3,78           | 0,91                          | Ene             | 0,00                          | Nov                  | 1                            | Ciclo seco       | Años muy seco  |
| 1982-1983   | 876,73             | 254,38       | 29            | 5,08           | 0,88                          | Agos            | 0,00                          | Jun                  |                              | Ciclo seco       | Años muy seco  |
| 1983-1984   | 659,90             | 236,92       | 36            | 4,73           | 0,97                          | Feb             | 0,00                          | Ago                  | 1                            | Ciclo seco       | Años muy seco  |
| 1984-1985   | 724,97             | 276,74       | 38            | 5,53           | 0,88                          | Nov             | 0,00                          | Ago y Sep            | 2                            | Ciclo seco       | Años muy seco  |
| 1985-1986   | 531,06             | 218,17       | 41            | 4,36           | 0,98                          | Nov             | 0,00                          | Oct, Jul y Ago       | 3                            | Ciclo seco       | Años seco      |
| 1986-1987   | 611,67             | 221,26       | 36            | 4,42           | 0,95                          | Feb             | 0,00                          | Ago                  | 1                            | Ciclo seco       | Años seco      |
| 1987-1988   | 843,86             | 282,99       | 34            | 5,65           | 1,28                          | Abr             | 0,00                          | Sep                  | 1                            | Ciclo seco       | Años seco      |
| 1988-1989   | 480,14             | 146,39       | 30            | 2,92           | 0,85                          | Abr             | 0,00                          | Nov, Ago y Sep       | 3                            | Ciclo seco       | Años seco      |
| 1989-1990   | 665,70             | 206,22       | 31            | 4,12           | 1,12                          | Abr             | 0,00                          | Oct, Jul y Ago       | 3                            | Ciclo seco       | Años seco      |
| 1990-1991   | 826,06             | 318,74       | 39            | 6,37           | 1,13                          | Mar             | 0,00                          | Jul y Ago            | 2                            | Ciclo seco       | Años seco      |
| 1991-1992   | 791,89             | 230,70       | 29            | 4,61           | 0,81                          | Jun             | 0,03                          | Jul                  |                              | Ciclo seco       | Años seco      |
| 1992-1993   | 766,17             | 242,13       | 32            | 4,84           | 1,02                          | Oct             | 0,00                          | Ene y Ago            | 2                            | Ciclo seco       | Años seco      |
| 1993-1994   | 659,39             | 250,81       | 38            | 5,01           | 0,98                          | Oct             | 0,00                          | Jul y Ago            | 2                            | Ciclo seco       | Años medio     |
| 1994-1995   | 686,65             | 232,41       | 34            | 4,64           | 0,84                          | Ene             | 0,00                          | Jun                  | 1                            | Ciclo seco       | Años medio     |
| 1995-1996   | 843,31             | 286,42       | 34            | 5,72           | 1,01                          | Feb             | 0,00                          | Oct                  | 1                            | Ciclo indefinido | Años medio     |
| 1996-1997   | 898,95             | 305,92       | 34            | 6,11           | 1,30                          | Dic             | 0,00                          | Mar                  |                              | Ciclo indefinido | Años medio     |
| 1997-1998   | 805,44             | 277,19       | 34            | 5,54           | 0,92                          | Nov             | 0,10                          | Ago                  |                              | Ciclo indefinido | Años medio     |
| 1998-1999   | 787,83             | 264,59       | 34            | 5,28           | 0,71                          | Feb             | 0,04                          | Ago                  |                              | Ciclo indefinido | Años medio     |
| 1999-2000   | 684,18             | 222,89       | 33            | 4,45           | 0,95                          | Abr             | 0,00                          | Ago                  | 1                            | Ciclo indefinido | Años medio     |
| 2000-2001   | 752,58             | 251,22       | 33            | 5,02           | 1,26                          | Ene             | 0,00                          | Jun, Ago y Sep       | 3                            | Ciclo indefinido | Años medio     |
| 2001-2002   | 751,61             | 232,68       | 31            | 4,65           | 0,70                          | May             | 0,00                          | Jul                  | 1                            | Ciclo indefinido | Años medio     |
| 2002-2003   | 892,11             | 312,76       | 35            | 6,25           | 1,05                          | Ene             | 0,00                          | Ago                  | 1                            | Ciclo húmedo     | Años medio     |
| 2003-2004   | 890,98             | 336,73       | 38            | 6,72           | 0,94                          | Dic             | 0,00                          | Jul                  | 1                            | Ciclo húmedo     | Años medio     |
| 2004-2005   | 647,29             | 237,81       | 37            | 4,75           | 0,76                          | Dic             | 0,00                          | Jul                  | 1                            | Ciclo húmedo     | Año húmedo     |
| 2005-2006   | 986,26             | 283,58       | 29            | 5,66           | 0,94                          | Nov             | 0,14                          | May                  |                              | Ciclo húmedo     | Año húmedo     |
| 2006-2007   | 936,90             | 293,73       | 31            | 5,87           | 0,94                          | Feb             | 0,00                          | Jul                  | 1                            | Ciclo húmedo     | Año húmedo     |
| 2007-2008   | 988,34             | 284,47       | 29            | 5,68           | 1,14                          | May             | 0,00                          | Ago                  | 1                            | Ciclo húmedo     | Año húmedo     |
| 2008-2009   | 813,33             | 277,86       | 34            | 5,55           | 0,97                          | Nov             | 0,00                          | Jul y Ago            | 2                            | Ciclo húmedo     | Año húmedo     |
| 2009-2010   | 966,34             | 323,51       | 33            | 6,46           | 1,12                          | Ene             | 0,00                          | Ago                  | 1                            | Ciclo húmedo     | Año húmedo     |
| 2010-2011   | 957,59             | 308,06       | 32            | 6,15           | 0,93                          | Dic             | 0,00                          | Ago                  | 1                            | Ciclo húmedo     | Año húmedo     |
| 2011-2012   | 778,20             | 241,53       | 31            | 4,82           | 1,02                          | Feb             | 0,00                          | Jun                  | 1                            | Ciclo húmedo     | Año muy húmedo |
| 2012-2013   | 1063,10            | 366,58       | 34            | 7,32           | 1,01                          | Oct             | 0,00                          | Ago                  | 1                            | Ciclo húmedo     | Año muy húmedo |
| 2013-2014   | 905,16             | 281,68       | 31            | 5,63           | 1,02                          | Ene             | 0,00                          | Ago                  | 1                            | Ciclo húmedo     | Año muy húmedo |
| 2014-2015   | 902,75             | 269,72       | 30            | 5,39           | 1,19                          | Feb             | 0,00                          | May                  | 1                            | Ciclo húmedo     | Año muy húmedo |
| 2015-2016   | 805,45             | 272,88       | 34            | 5,45           | 1,16                          | Abr             | 0,00                          | Jul y Ago            | 2                            | Ciclo húmedo     | Año muy húmedo |
| 2016-2017   | 662,53             | 189,88       | 29            | 3,79           | 0,81                          | May             | 0,00                          | Dic                  | 1                            | Ciclo indefinido | Año muy húmedo |
| Media       | 791,10             | 262,86       | 33            | 5,25           | 0,98                          |                 | 0,01                          | Total:               | 45                           |                  |                |
| Maximo      | 1063,10            | 366,58       | 41            | 7,32           | 1,30                          |                 | 0,14                          | Max:                 | 3                            |                  |                |
| Mínimo      | 480,14             | 146,39       | 29            | 2,92           | 0,70                          |                 | 0,00                          | Nº de años c/R nula: | 31 (84%)                     |                  |                |

Comentario: Los valores <0.01 se han considerado nulos a efectos de interpretación hidrográfica, por ser producto exclusivamente de redondeo numérico.

Tabla 14.2.4.4-1. Evaluación de la recarga en el acuífero carbonatado.

La recarga media anual del acuífero es de 5,25 hm<sup>3</sup>, pero en el período existe un amplio rango de variación de ±40%, así en 2012/2013 se produce la máxima recarga 7,32 hm<sup>3</sup> (siendo éste el año más lluvioso, 1063,10 mm) y en 1988/1989 se produce la mínima recarga 2,92 hm<sup>3</sup> (siendo también éste el año menos lluvioso, 480,14 mm), ver Tabla 14.2.4.4-1.

Un aspecto relevante del estudio de recarga realizado es el análisis de los meses en que la recarga es nula (Tabla 14.2.4.4-1). Así, de los 37 años en que se extiende el estudio, en 31 años (el 84% de los años estudiados) ha existido un mes o más, en los que no se ha recargado el acuífero. Esta periodicidad se ha mantenido durante el ciclo húmedo, en el que ha habido años de tipo muy húmedo (años hidrológicos 2012/2013 al 2015/2016), en los que hubo uno o dos meses al año con recarga nula al acuífero. Sin embargo, esta periodicidad de la recarga nula durante el estiaje, no indica ningún riesgo excepcional, sino que es un rasgo típico estacional del ciclo hídrico en el clima mediterráneo. La normalidad de este rasgo estacional se evidencia en que sólo en 10 años (el 27 % de los años estudiados) ha habido más de un mes con recarga nula; de estos únicamente en 4 años (el 11 % de los años estudiados) ha habido 3 meses con recarga nula (Tabla 14.2.4.4-1) y nunca ha habido más de tres meses con recarga nula. La frecuencia de ocurrencia de meses con recarga nula indica que estos se concentran en los meses de estiaje: 20 veces fue en agosto, 10 veces fue en Julio y 4 veces fue en Septiembre (Fig. 14.2.4.4-2).

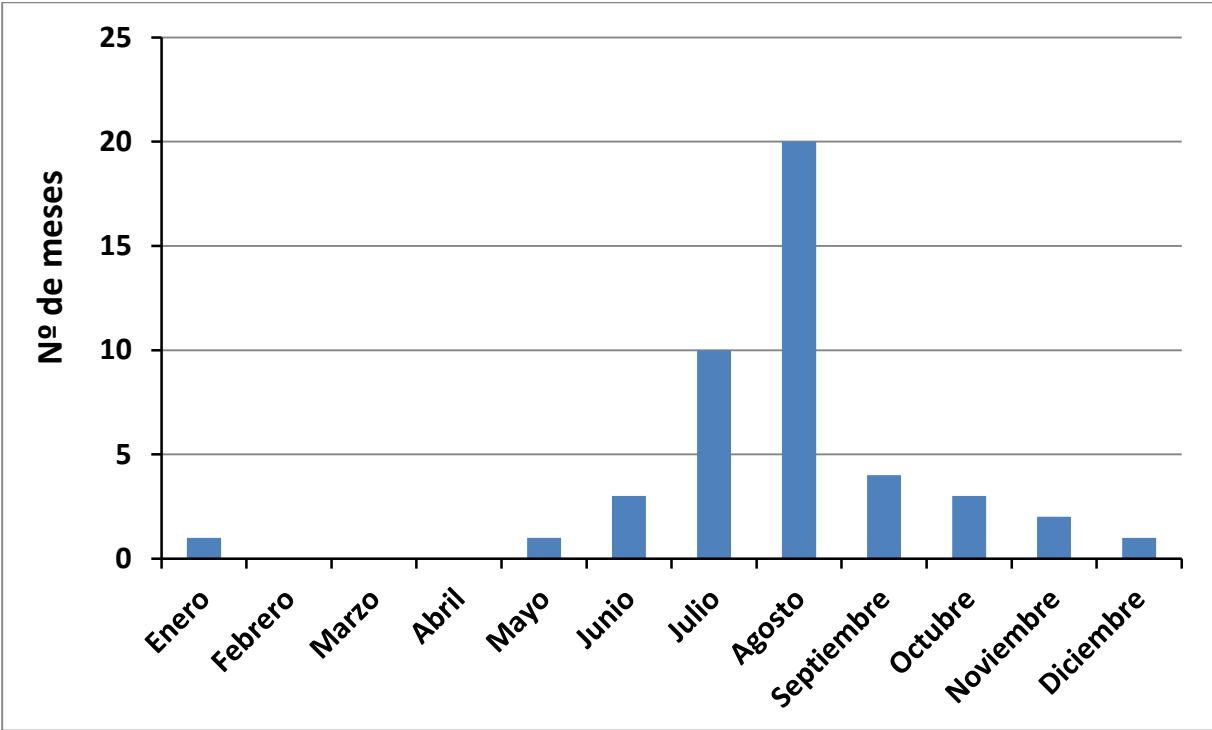


Figura 14.2.4.4-2. Frecuencia de ocurrencia de meses con recarga nula.

Las figuras 14.2.4.4-3 y 14.2.4.4-4 representan la recarga mensual en  $\text{hm}^3$  y en mm, respectivamente. En ambas figuras, se contrasta la precipitación con la recarga. En las figuras se aprecia claramente la fuerte variabilidad mensual (estacional) que tiene la recarga, independientemente del tipo de año o del ciclo hidrológico. El estrés, o déficit, hídrico del sistema en régimen natural no se producirá por la inexistencia de recarga en los meses de estiaje, que como ya se expuso es parte del régimen del clima mediterráneo. El escenario de estrés hídrico en régimen natural se verá propiciado en aquellos años en los que durante los meses húmedos no se produzca una “recarga de entidad” que permita la recuperación del acuífero. Este escenario se produciría en ciclos interanuales secos.

El balance hídrico medio anual (Tabla 14.2.4.4-2) indica que la recarga al acuífero ( $5,25 \text{ hm}^3$ ) es mayor que la Evapotranspiración Real ( $3,62 \text{ hm}^3$ ). Por otro lado, se debe considerar que el flujo hipodérmico ( $3,70 \text{ hm}^3$ ), junto con la escorrentía superficial laminar ( $3,26 \text{ hm}^3$ ) conforman el caudal superficial circulante ( $6,96 \text{ hm}^3$ ). Se puede concluir que la precipitación se reparte entre lo que se recarga al acuífero, la evapotranspiración real y el caudal superficial circulante. No obstante, se debe matizar la magnitud del flujo hipodérmico ya que el modelo no representa explícitamente la nieve, por lo que la escorrentía nival estaría representada a través del flujo hipodérmico. Debido a ello, el valor real de este último sería menor y más acorde a un ambiente como los del macizo carbonatado cuya orografía abrupta no permite un gran desarrollo edáfico. Finalmente, se debe considerar que parte de la escorrentía superficial conforma el caudal base de la red drenaje superficial.

**Tabla 14.2.4.4-2. Balance Hídrico medio anual del acuífero carbonatado.**

|                         |                   |        |
|-------------------------|-------------------|--------|
| Precipitación           | (mm)              | 791,1  |
|                         | ( $\text{hm}^3$ ) | 15,80  |
| Evapotranspiración Real | (mm)              | 181,49 |
|                         | ( $\text{hm}^3$ ) | 3,62   |
|                         | (%P)              | 22,94  |
| Intercepción            | (mm)              | 0      |
|                         | ( $\text{hm}^3$ ) | 0      |
|                         | (%P)              | 0      |
| Escorrentía Superficial | (mm)              | 163,35 |
|                         | ( $\text{hm}^3$ ) | 3,26   |
|                         | (%P)              | 20,65  |
| Flujo Hipodérmico       | (mm)              | 185,12 |
|                         | ( $\text{hm}^3$ ) | 3,70   |
|                         | (%P)              | 23,40  |
| Recarga al acuífero     | (mm)              | 262,85 |
|                         | ( $\text{hm}^3$ ) | 5,25   |
|                         | (%P)              | 33,23  |

#### **14.2.5. Conclusiones del proceso de modelación en Visual Balan.**

Se realizó la modelación del Balance Hídrico del acuífero carbonatado comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo de la Masa de Agua Subterránea 65 Pradoluengo-Anguiano (MASb 65). El período de estudio se extendía desde 01/10/1980 al 30/09/2017. El acuífero se modeló en dos bloques separados, uno en la margen izquierda y el otro en la margen derecha. El modelo se calibró con los datos del piezómetro de la CHE NIPA: 2111-3-0068, por ser representativo del bloque de la margen izquierda y para el período de 18/04/2002 a 30/06/2017. Los parámetros calibrados permitieron simular el bloque de la margen izquierda para el resto del período de estudio y el bloque de la margen derecha para todo este período. Con los resultados se definieron los recursos conjuntos del acuífero carbonatado.

En el análisis de los resultados del modelo y del tratamiento de la información vinculado a éste, se observa para el período de estudio que:

- La recarga media anual estaría en torno a los 5,25 hm<sup>3</sup>, aunque con una variación de un  $\pm 40\%$ .
- La recarga sufre una fuerte variación estacional, independientemente del tipo de año climático o que se esté en un ciclo interanual seco o húmedo.
- En los meses de estiaje -Julio, agosto, septiembre- se concentra los valores de recarga más baja. No siendo excepcional que la recarga en Julio y agosto sea nula o inapreciable.
- La fuerte variación estacional de la recarga del acuífero y las características de ésta en los meses de estiaje son rasgos típicos del ciclo hídrico en el clima mediterráneo.
- El estrés hídrico del sistema en régimen natural se verá propiciado en los años en los que durante la estación húmeda no se satisfaga la recuperación del acuífero.
- La evolución de la recarga está vinculada a la lluvia, aunque no es proporcional. Un incremento de la lluvia produce un aumento de la recarga proporcionalmente menor. En igual sentido, una disminución de la precipitación genera en la recarga una mengua relativamente menor. Esto sugiere la existencia de un tipo de control hidrodinámico en el macizo carbonatado ya sea en los mecanismos de recarga y/o en su capacidad de almacenamiento dados por sus rasgos capacitivos y/o por su cota de desborde.

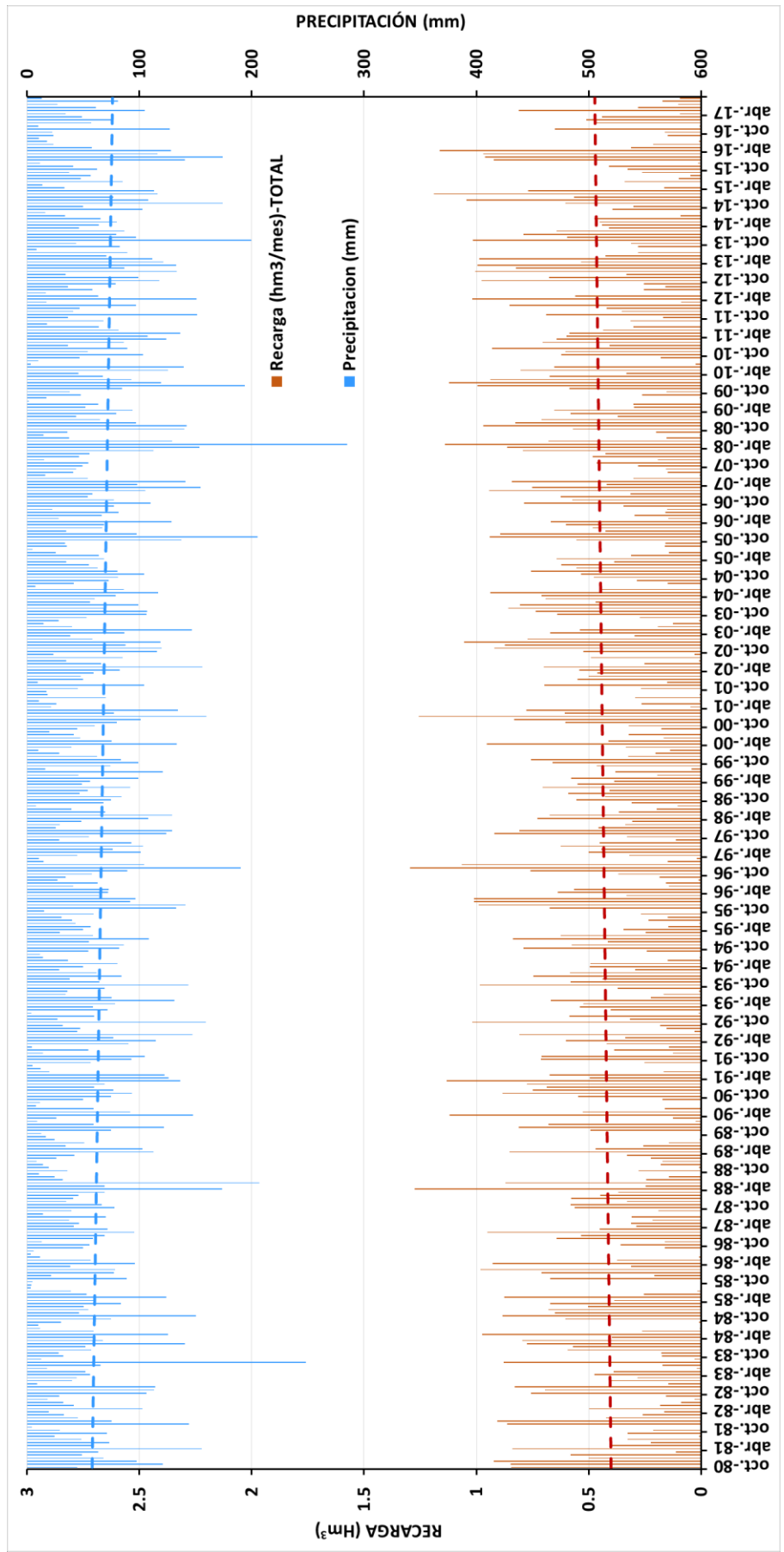


Figura 14.2.4.4-3. Recarga mensual (Hm3) y Precipitación mensual (mm).



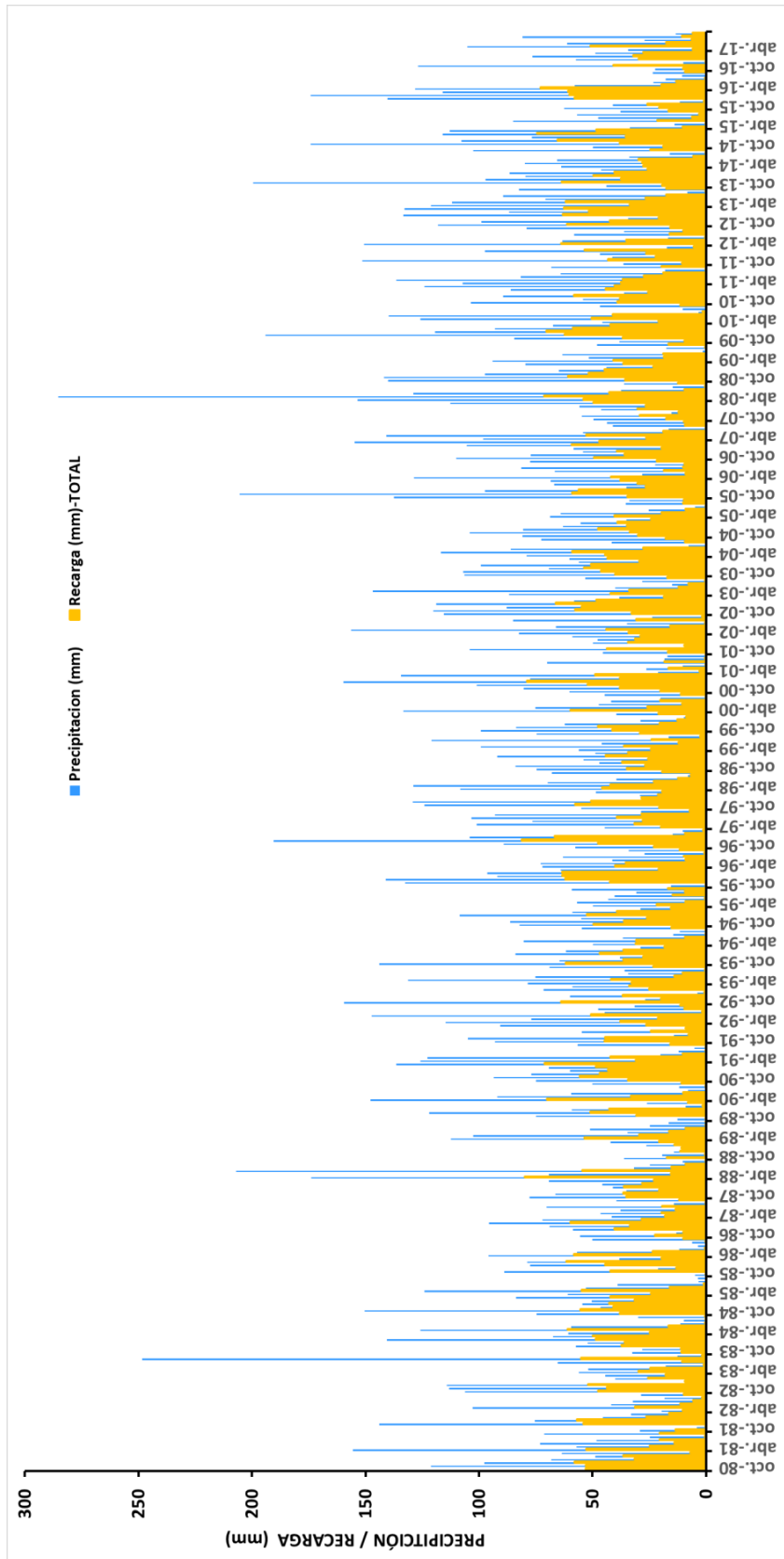


Figura 3. Recarga mensual (mm) y Precipitación mensual (mm).

### **14.3 Estimación de la recarga mediante el modelo RENATA.**

En este capítulo, se pretenden evaluar los recursos del acuífero carbonatado jurásico con objeto de determinar sus posibilidades de explotación y garantías que puede aportar para el citado abastecimiento.

El proyecto incluye, entre otros trabajos, la aplicación por parte del IGME del código RENATA para el cálculo de la recarga natural al sector acuífero de Ezcaray, que forma parte de la masa de agua subterránea Pradoluengo-Anguiano (ES091MSBT065). De esta forma se pueden estimar los recursos renovables del acuífero que serían susceptibles de explotación.

#### **14.3.1 Fundamentos del modelo Renata.**

Se ha utilizado el programa RENATA (IGME-DPA, 2012), desarrollado para calcular la recarga de agua en los acuíferos a partir de los procesos que tienen lugar en el suelo. La aplicación ha sido diseñada para ser utilizada en acuíferos con diferentes características superficiales, tanto en propiedades como en usos del suelo, las cuales condicionan la recarga del agua.

El objetivo final del programa es calcular la recarga, y otras variables, en cada celda del modelo en unidades de mm ( $l/m^2$ ) para cada período de tiempo en el que se han discretizado las series climáticas.

La aplicación de RENATA conlleva las siguientes fases:

a. Inserción y modificación de series temporales: son necesarias las series de precipitación, temperatura y dotaciones de riego (esta última cuando sea aplicable). Las series de evapotranspiración potencial que son utilizadas por RENATA, pueden ser calculadas por la propia aplicación u obtenidas con otros programas y posteriormente importadas.

b. Definición de sectores: El modelo se discretiza en zonas o sectores, que pueden ser de tres tipos temáticos:

- Sectores climáticos: a cada sector climático se atribuye la influencia de una pareja de series temporales pluviométrica y de evapotranspiración potencial.

- Sectores de suelo: corresponden a zonas del modelo con unas características comunes definidas por los parámetros: límite inferior de la capacidad de almacenamiento o capacidad de campo; límite superior de la capacidad de almacenamiento, si se emplea el método de cálculo de Thornthwaite modificado por G. Girard (1981); y umbral de escorrentía o número de curva.

- Sectores de riego: zonificación espacial para tener en cuenta los posibles retornos de riego según el tipo de cultivo.

c. Realización de cálculos: los cálculos que realiza el programa son los de la evapotranspiración potencial (obligatorio sino se ha importado la serie desde otra fuente), evapotranspiración real, lluvia útil, infiltración y escorrentía. Para ello se puede optar entre varias metodologías disponibles en la aplicación. El cálculo se puede realizar a nivel diario o mensual.

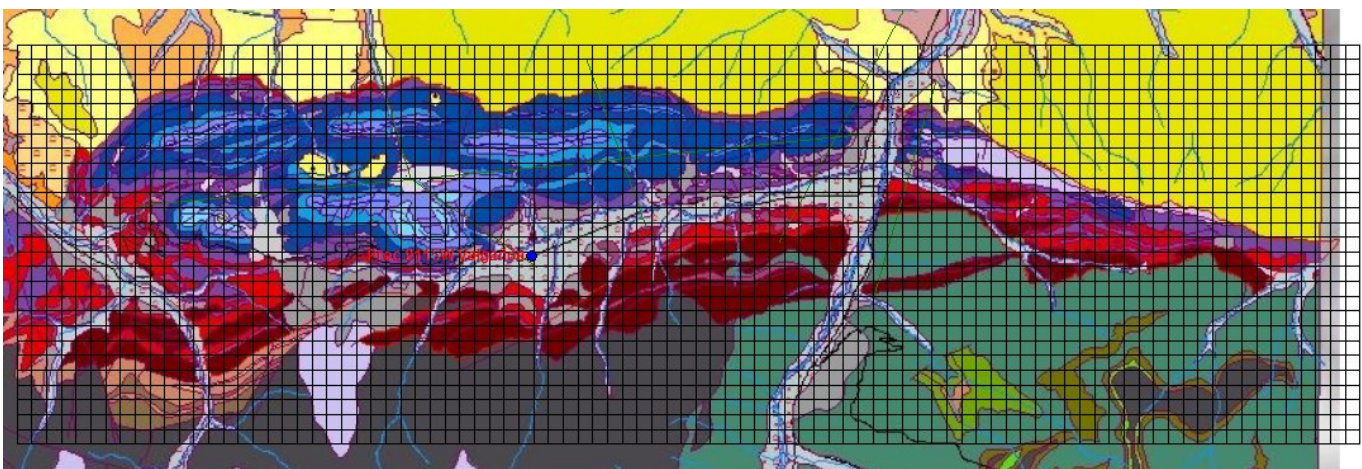
A partir de la temperatura se puede calcular la evapotranspiración potencial por cualquiera de los métodos disponibles en el programa: Thornthwaite, Hargreaves o Blaney-Criddle. Con la evapotranspiración potencial y la precipitación se calculan por el método del balance de Thornthwaite, o mediante la modificación introducida por G. Girard, la evapotranspiración real y la lluvia útil. Finalmente se pueden calcular la infiltración (recarga) y la escorrentía superficial descomponiendo la lluvia útil según el método del Soil Conservation Service de los EEUU (número de curva).

#### **14.3.2 Delimitación de sectores.**

La aplicación del modelo RENATA requiere la discretización espacial de la zona de estudio en un mallado de celdas exportable a un modelo de flujo.

La zona de estudio comprende la Masb de Pradoluengo-Anguiano en su sector de Ezcaray, entre los ríos Tirón al oeste y Santurdejo al este. El acuífero carbonatado jurásico aflora en una franja alargada en dirección E-O entre los citados ríos. La recarga en este sector se produce por infiltración de lluvia y las descargas tienen lugar principalmente hacia el río Oja y su aluvial en la zona de Ezcaray, donde el río atraviesa el acuífero. También se produce alguna descarga de menor entidad por otros manantiales, principalmente el de las Tres Fuentes en Valgañón.

Como base para la delimitación del dominio de este estudio se ha tomado la cartografía geológica a escala 1:10.000 realizada en el marco de este mismo proyecto. En la figura adjunta se observa el dominio discretizado.



**Figura 14.3.2.1. Mallado de la zona de estudio.**

La zona se ha discretizado con un mallado regular formado por celdas de 200x200 m, sobre el cual se ha procedido a la delimitación de los sectores que precisa RENATA para los cálculos: climáticos, de suelo y de riego.

En cuanto a sectores climáticos se ha definido un único sector que comprende toda la zona de estudio, al cual se han asociado las series restituidas de precipitación y temperatura vistas en el apartado de estudio climático.

Respecto a precipitación se ha tomado como estación representativa la de Valgañón (9115W), por su ubicación en el centro del sector acuífero estudiado y por disponer de una serie lo suficientemente completa, a la vez que una buena correlación con el resto de estaciones de cara al completado de la serie.

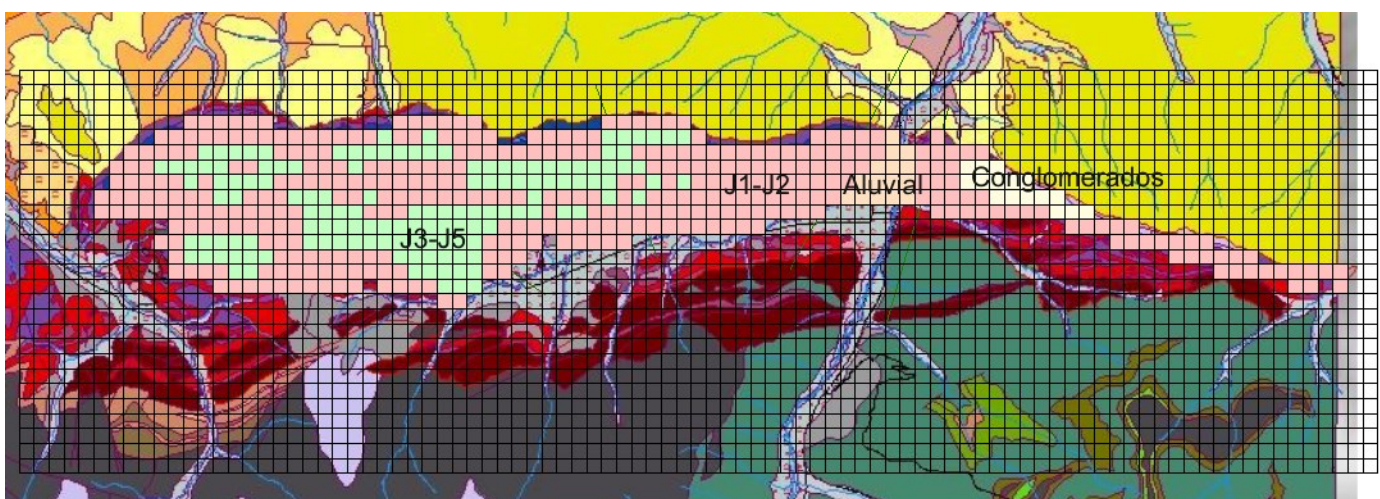
Por su parte para la temperatura se ha seleccionado la estación de Valdezcaray (9115X) por ser la más cercana con una serie suficientemente larga.

Se han restituido las series de precipitación (9115W) y temperatura (9115X) para el periodo 1990-2017 (27 años) mediante la correlación existente con el resto de estaciones.

Por su parte, y puesto que no hay regadíos sobre el acuífero, se ha definido también un único sector de riegos con una serie de dotaciones mensuales nula, ya que es un requerimiento del programa definir este sector.

Y por último se han delimitado los sectores de suelo en función de los afloramientos de distintas litologías carbonatadas o detríticas, que suponen distintas características de los parámetros que utiliza RENATA para el cálculo de la recarga.

En la figura adjunta se observan los sectores de suelo delimitados.



**Figura 14.3.2.2. Sectores de suelo delimitados.**

Para el tipo de suelo se han considerado cuatro sectores:

- Sector Jurásico basal J1-J2: corresponde a las celdas que cubren los afloramientos de materiales carbonatados del Jurásico inferior J1 y J2, que constituyen la principal formación acuífera de la Masb. Comprende 364 celdas con una superficie de 14.56 km<sup>2</sup>.
- Sector Jurásico inferior-medio J3-J5: corresponde a las celdas que cubren los afloramientos de materiales carbonatados y margosos del Jurásico inferior y medio, J3 a J5, que suponen formaciones de menor permeabilidad por sus intercalaciones margosas. Abarca 137 celdas con una superficie de 5.48 km<sup>2</sup>.
- Sector Aluvial del Oja: corresponde a las celdas sobre afloramientos del Cuaternario aluvial del río Oja. La superficie del sector es de 0.6 km<sup>2</sup>, correspondientes a 15 celdas.
- Sector conglomerados terciarios: corresponde a las celdas que cubren los afloramientos de materiales conglomeráticos terciarios que se asientan discordantemente sobre el Jurásico al este del río Oja. La superficie que abarcan estas 16 celdas es de 0.64 km<sup>2</sup>.

A cada uno de los sectores de suelo definidos se asigna unos valores de capacidad de campo y umbral de escorrentía o número de curva para realizar los cálculos de la recarga.

### **14.3.3 Aplicación y calibración del código.**

A partir de la serie de temperaturas medias diarias de la estación de Valdezcaray (9115X), corregida para la altitud media de la zona de estudio, se ha calculado la serie diaria de evapotranspiración potencial mediante el método de Thornthwaite.

Con la ETP, la precipitación y la capacidad de campo (cantidad de agua que puede almacenar el suelo) de cada sector se calculan las series diarias de evapotranspiración real y lluvia útil mediante el método de balance Thornthwaite modificado por Girard. Y finalmente, con los valores de umbral de escorrentía o del número de curva de cada sector, se calcula la infiltración (recarga) y la escorrentía superficial descomponiendo la lluvia útil según el método del Soil Conservation Service de los EEUU.

La serie de recarga, y por tanto los valores de los parámetros asociados para su cálculo en Renata, se han calibrado mediante su aplicación a un modelo de flujo simplificado del acuífero jurásico diseñado al efecto.

### **Modelo de flujo.**

El modelo de flujo se ha realizado con *ModelMuse*, que es un pre y post-procesador desarrollado por el USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) para simulaciones de flujo con *Modflow*.

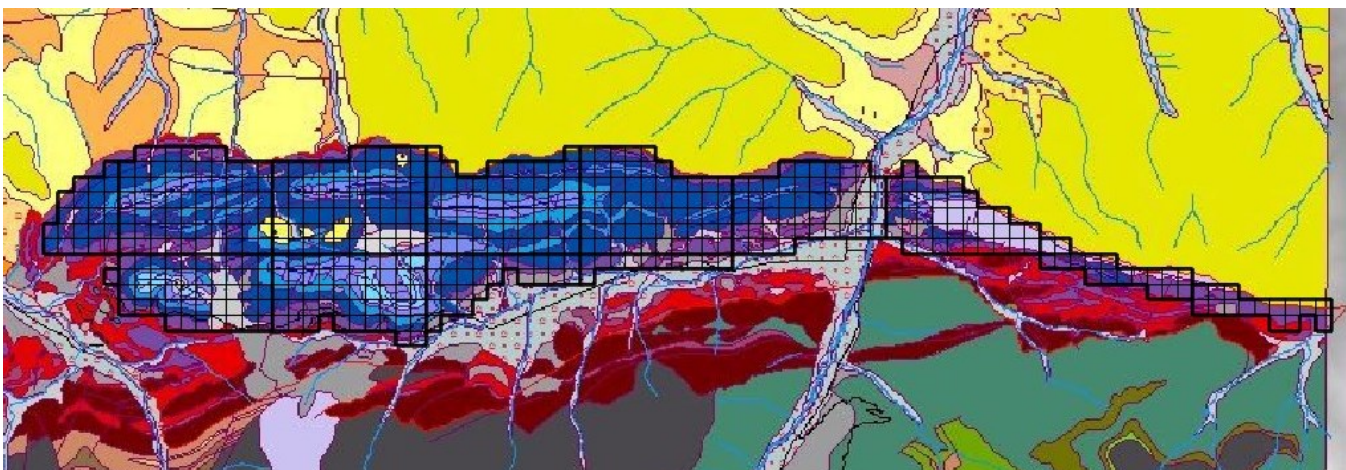


El modelo hidrogeológico conceptual implica una formación acuífera principal constituida por las calizas y carniolas del Jurásico basal (J1-J2), situándose por encima dos paquetes más margosos (J3 y J5) con otra formación acuífera de calizas más masivas intercalada (J4). La recarga del conjunto se produce por infiltración del agua de lluvia, y su descarga se produce fundamentalmente hacia el río Oja y su aluvial, que es la zona de cotas más bajas. No obstante, la intercalación de los materiales margosos menos permeables del J3, hace que en algunos sectores se produzca un drenaje a favor de ciertos manantiales en cotas más elevadas, entre los que destaca el caso del manantial de Tres Fuentes de Valgañón.

Se ha realizado un modelo simplificado de una capa considerando todo el conjunto de formaciones jurásicas como un único acuífero, aunque a través de los valores de los parámetros (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento) se trate de reflejar las diferencias entre las distintas columnas litológicas en cada celda.

La discretización espacial ha sido la misma en el modelo de flujo que en Renata, para permitir la calibración de la recarga. Así se ha establecido una malla cuadrada formada por celdas de 200x200m, con un dominio activo análogo al de Renata.

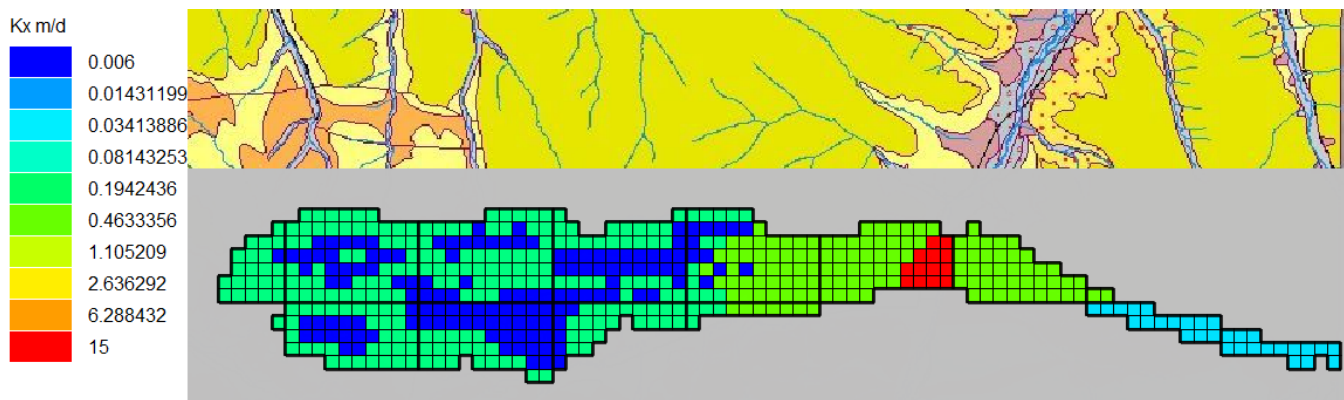
Por su parte la discretización temporal ha sido diaria, con un periodo de simulación de 27 años, de octubre de 1990 a septiembre de 2017. Se ha reducido el periodo de simulación a 27 años (en vez de los 37 de Visual Balan) por restricciones en el dimensionamiento del modelo en ModelMuse.



**Figura 14.3.3.1. Mallado del modelo de flujo.**

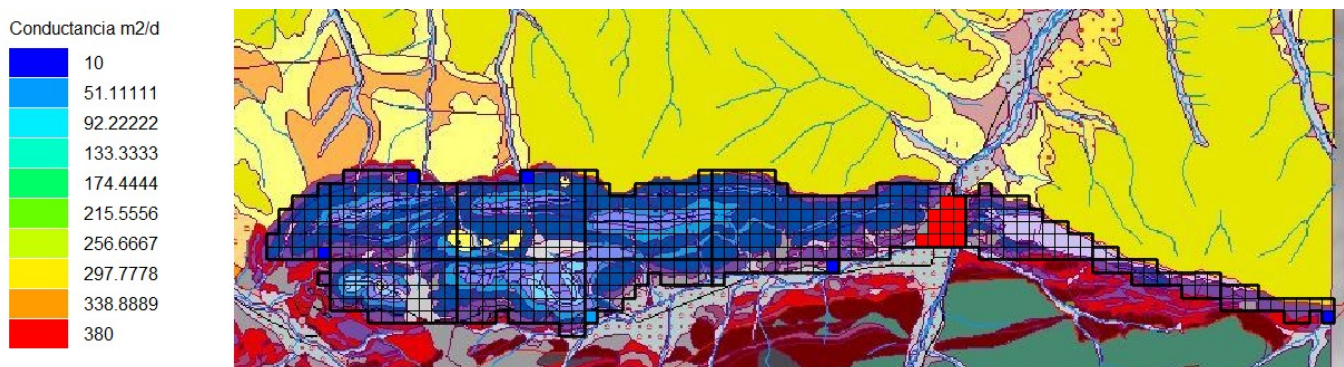
La distribución de valores para los parámetros hidrodinámicos del modelo ha venido condicionada por la disposición espacial de las distintas formaciones geológicas y la presencia de condicionantes estructurales (fallas con posible inyección de materiales arcilloso-yesíferos del Keuper).

Así, para la conductividad hidráulica se ha utilizado la siguiente distribución de valores reflejada en la figura adjunta.



**Figura 14.3.3.2. Valores de conductividad hidráulica horizontal utilizados (m/día).**

Asimismo se han simulado como celdas de tipo dren las zonas de descarga del acuífero jurásico, descarga que como ya se ha dicho se produce fundamentalmente hacia el acuífero aluvial del río Oja y en menor medida a través de algunos manantiales, entre los que cabe destacar el de Tres Fuentes en Valgañón.



**Figura 14.3.3.3. Celdas tipo dren en el modelo.**

Para la calibración del modelo se cuenta con la serie de piezometría correspondiente al sondeo 2111-3-0068 de la ETAP de Ezcaray, perteneciente a la red de la Confederación Hidrográfica del Ebro. Se dispone de datos desde 2002 hasta 2017, aunque las incertidumbres observadas en la referencia de las medidas en los primeros años, hacen que se haya considerado sólo los datos a partir de 2008.

Con los valores asignados a los distintos parámetros se ha conseguido un ajuste aceptable de la piezometría en el sondeo de la ETAP. Este ajuste se refleja en las figuras adjuntas.

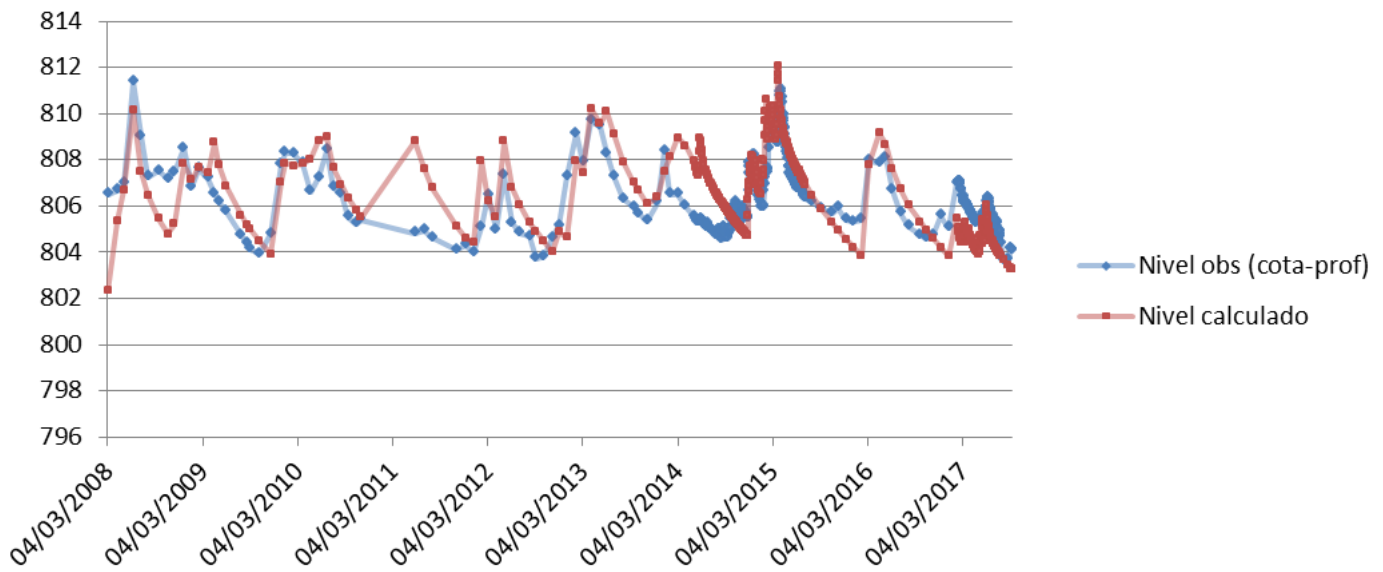


Figura 14.3.3.3. Series de piezometría observada y calculada en el sondeo de la ETAP.

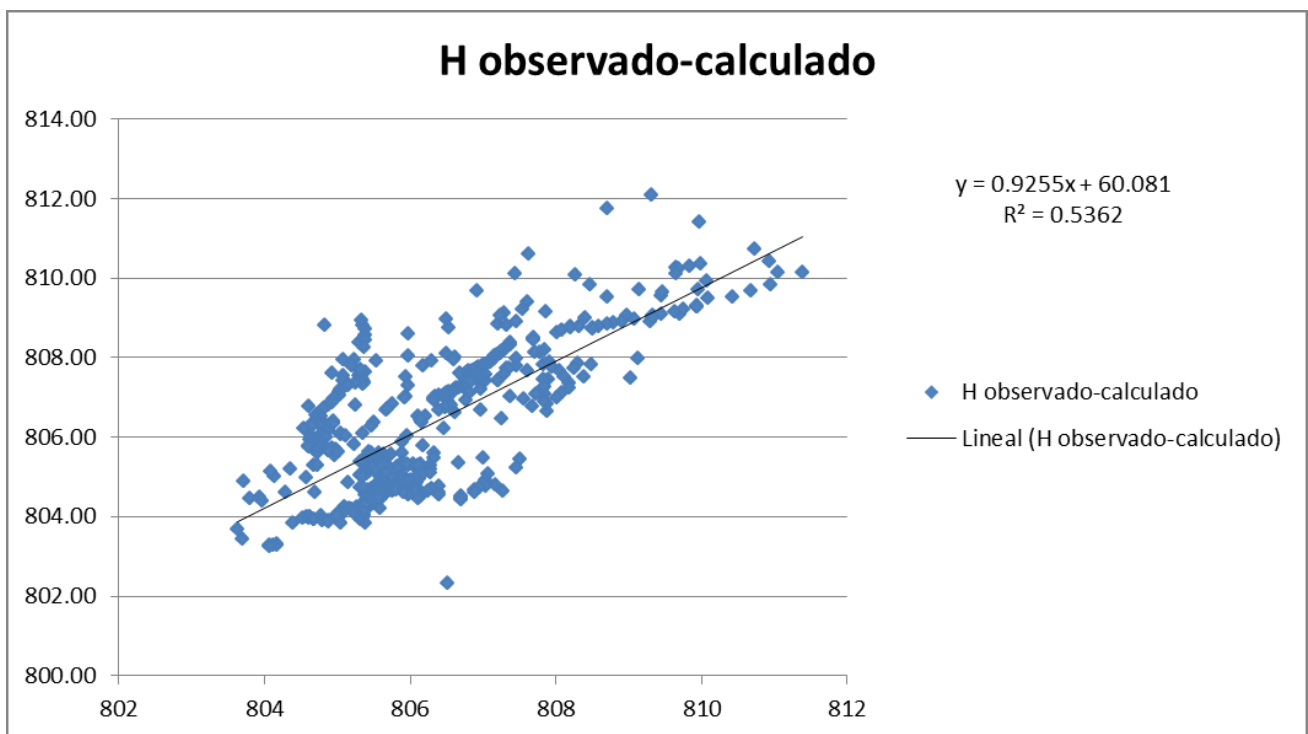
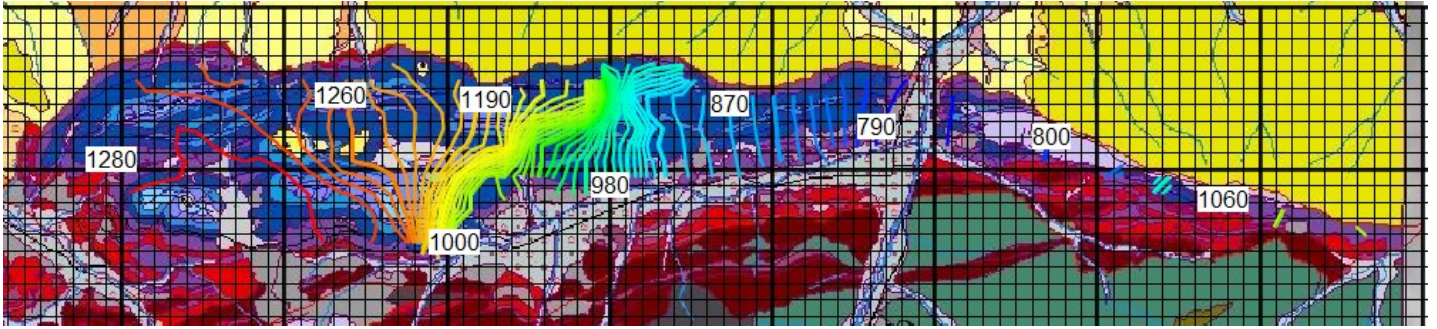


Figura 14.3.3.4. Recta de correlación de las series observada y calculada.

Los estadísticos del ajuste muestran una calibración aceptable, con un coeficiente  $R^2$  de 0.54, coeficiente de correlación de 0.74, y un error cuadrático medio de 1.13. Por su parte la recta de correlación presenta una pendiente de 0.92 con un término independiente de 60, que supone un 7.4% respecto al nivel medio en ese punto, lo que indica que la simulación refleja aceptablemente bien el comportamiento medio del acuífero.





**Figura 14.3.3.5. Isopiezas calculadas para el final del periodo de simulación, día 30-09-2017.**

Hay que señalar que la simplicidad del modelo no permite un mejor ajuste, y que por tanto estos parámetros podrían ser mejorados con un modelo más completo.

No obstante se considera suficiente para obtener una primera aproximación a los valores de recarga del acuífero jurásico.

#### **14.3.4. Presentación y análisis de resultados**

Así, para esta calibración del modelo se han utilizado en RENATA los valores de los parámetros asignados a cada sector de suelo que se reflejan en las figuras adjuntas.

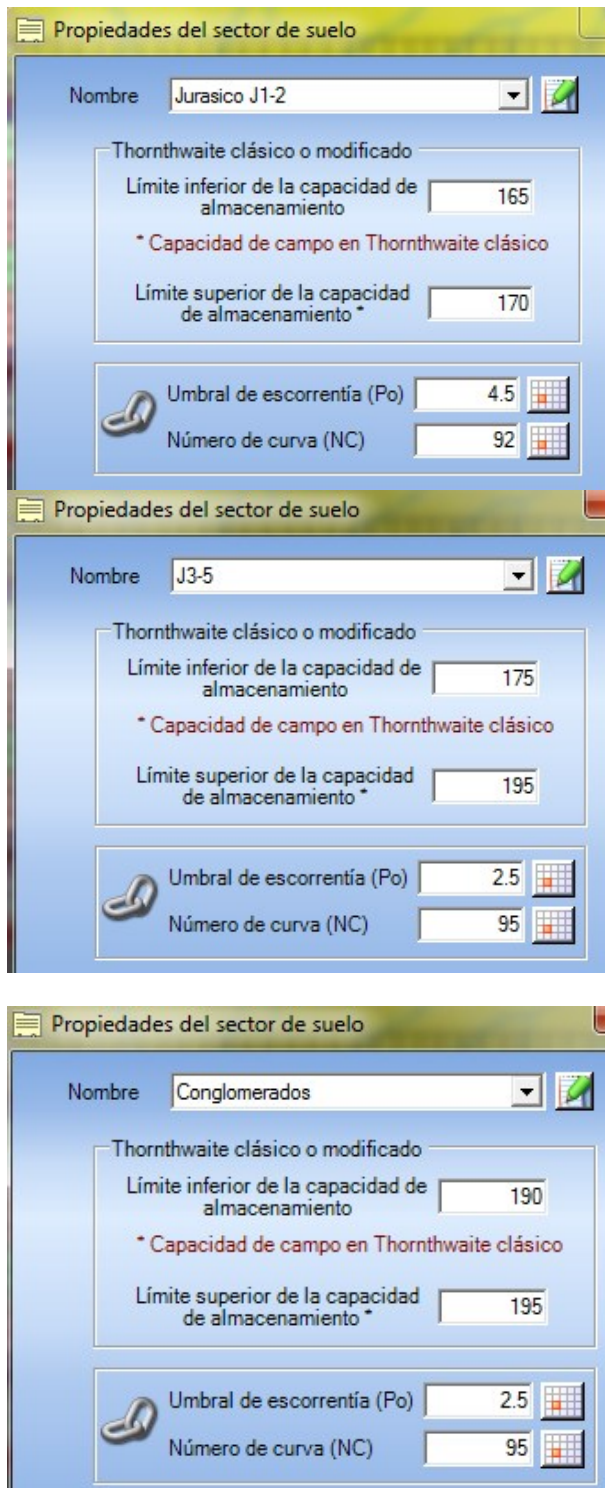


Figura 14.3.4.1. Valores de los parámetros para los distintos sectores de suelo en RENATA.

Para el sector del aluvial del río Oja se ha considerado recarga nula, puesto que la recarga se produciría al acuífero aluvial superficial, mientras que en el acuífero jurásico esta zona constituye un área de descarga hacia ese aluvial suprayacente.

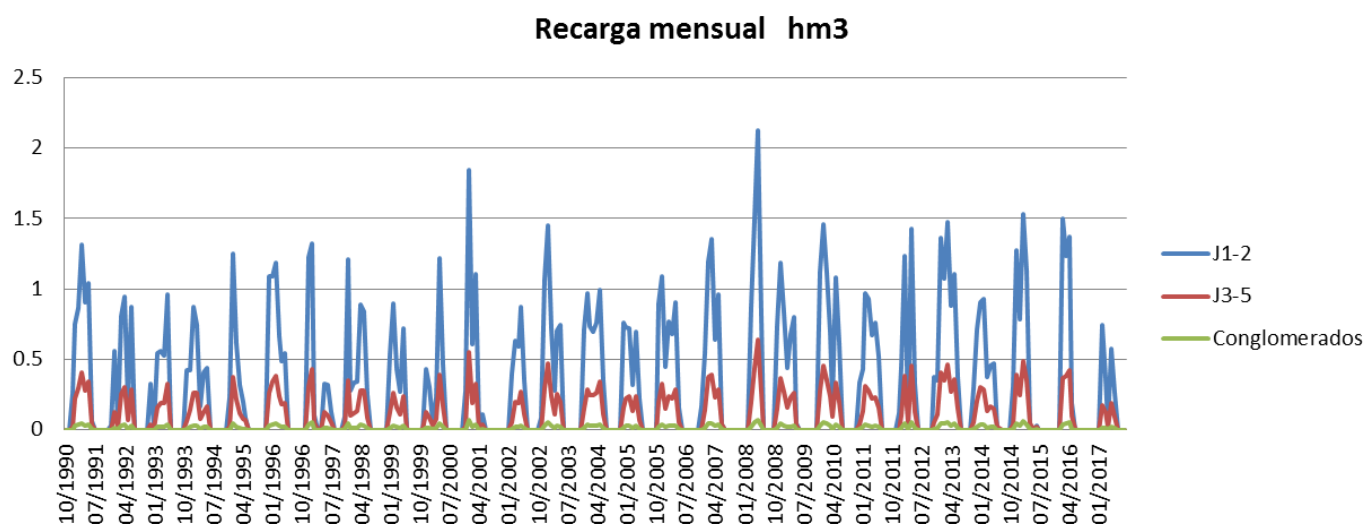


Con estos valores asignados y las series de precipitación y ETP antes referidas se han obtenido las series diarias de recarga natural para cada sector en el periodo 1990-2017.

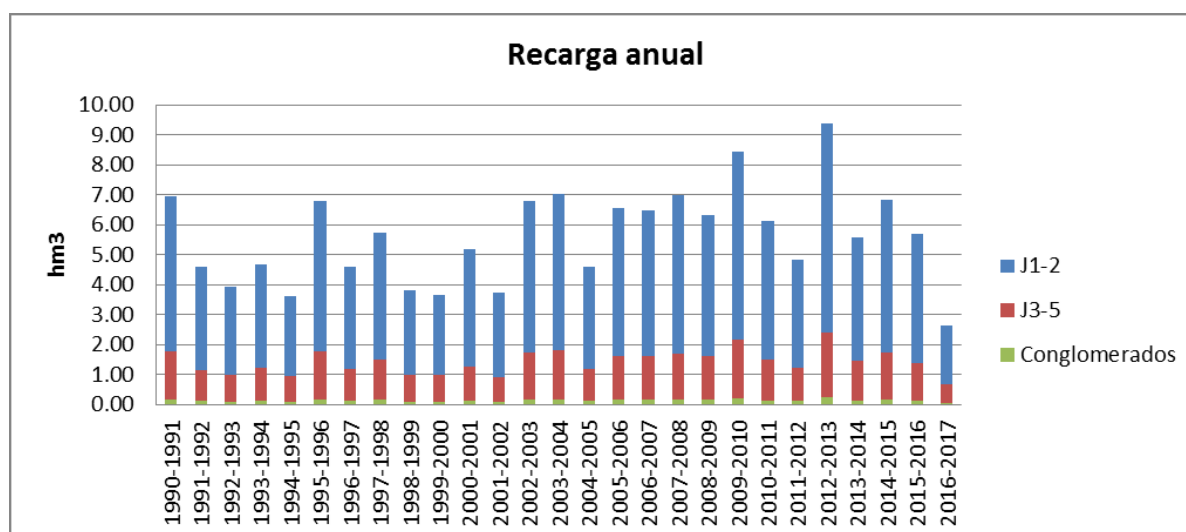
A partir de las series diarias se han obtenido las series mensuales y anuales que se reflejan en las tablas adjuntas a continuación.

**Tabla 14.3.4.1. Serie anual de recarga obtenida para el periodo 1990-2017**

| Años Hidrológicos | Recarga anual hm <sup>3</sup> |               |               |       | Tipo de año    | Ciclos       |
|-------------------|-------------------------------|---------------|---------------|-------|----------------|--------------|
|                   | Jurásico J1-2                 | Jurásico J3-5 | Conglomerados | Total |                |              |
| 1990-1991         | 5.20                          | 1.59          | 0.18          | 6.97  | Año medio      | Ciclo seco   |
| 1991-1992         | 3.44                          | 1.06          | 0.11          | 4.61  | Año medio      | Ciclo seco   |
| 1992-1993         | 2.93                          | 0.90          | 0.10          | 3.93  | Año medio      | Ciclo seco   |
| 1993-1994         | 3.47                          | 1.09          | 0.12          | 4.69  | Año seco       | Ciclo seco   |
| 1994-1995         | 2.69                          | 0.85          | 0.09          | 3.63  | Año seco       | Ciclo seco   |
| 1995-1996         | 5.05                          | 1.59          | 0.18          | 6.82  | Año medio      |              |
| 1996-1997         | 3.43                          | 1.08          | 0.12          | 4.62  | Año húmedo     |              |
| 1997-1998         | 4.24                          | 1.37          | 0.16          | 5.76  | Año medio      |              |
| 1998-1999         | 2.86                          | 0.88          | 0.10          | 3.84  | Año medio      |              |
| 1999-2000         | 2.70                          | 0.88          | 0.10          | 3.67  | Año seco       |              |
| 2000-2001         | 3.94                          | 1.13          | 0.13          | 5.20  | Año medio      |              |
| 2001-2002         | 2.84                          | 0.83          | 0.09          | 3.76  | Año seco       |              |
| 2002-2003         | 5.05                          | 1.56          | 0.17          | 6.79  | Año húmedo     |              |
| 2003-2004         | 5.22                          | 1.64          | 0.18          | 7.04  | Año húmedo     |              |
| 2004-2005         | 3.45                          | 1.06          | 0.12          | 4.62  | Año muy seco   |              |
| 2005-2006         | 4.93                          | 1.47          | 0.17          | 6.57  | Año muy húmedo | Ciclo húmedo |
| 2006-2007         | 4.89                          | 1.45          | 0.16          | 6.50  | Año muy húmedo | Ciclo húmedo |
| 2007-2008         | 5.30                          | 1.54          | 0.17          | 7.01  | Año muy húmedo | Ciclo húmedo |
| 2008-2009         | 4.72                          | 1.47          | 0.16          | 6.35  | Año medio      | Ciclo húmedo |
| 2009-2010         | 6.27                          | 1.94          | 0.22          | 8.43  | Año muy húmedo | Ciclo húmedo |
| 2010-2011         | 4.61                          | 1.37          | 0.15          | 6.13  | Año muy húmedo | Ciclo húmedo |
| 2011-2012         | 3.62                          | 1.11          | 0.12          | 4.85  | Año medio      | Ciclo húmedo |
| 2012-2013         | 7.00                          | 2.16          | 0.25          | 9.40  | Año muy húmedo | Ciclo húmedo |
| 2013-2014         | 4.14                          | 1.31          | 0.15          | 5.60  | Año húmedo     | Ciclo húmedo |
| 2014-2015         | 5.09                          | 1.57          | 0.17          | 6.83  | Año húmedo     | Ciclo húmedo |
| 2015-2016         | 4.29                          | 1.27          | 0.14          | 5.70  | Año medio      |              |
| 2016-2017         | 1.97                          | 0.60          | 0.06          | 2.63  | Año seco       |              |
| Media             | 4.20                          | 1.29          | 0.14          | 5.63  |                |              |



**Figura 14.3.4.2. Serie de recarga mensual por sectores y total.**



**Figura 14.3.4.3. Serie de recarga anual por sectores y total.**

Los resultados obtenidos con Renata indican que la recarga media anual para el periodo 1990-2017 en el sector jurásico J1-2 sería de 4.20 hm<sup>3</sup>, en el sector jurásico J3-5 sería de 1.29 hm<sup>3</sup>, y en el sector cubierto por conglomerados de 0.14 hm<sup>3</sup>. Esto supondría un total de recarga media anual en el conjunto del acuífero jurásico de 5.63 hm<sup>3</sup>.

Por otra parte, si consideramos la recarga media según el tipo de año, se obtienen los valores reflejados en la tabla adjunta.

**Tabla 14.3.4.2. Recarga media anual por sectores y tipo de año (hm<sup>3</sup>)**

| Recarga media anual por tipo de año (hm <sup>3</sup> ) |      |      |               |       |
|--|------|------|---------------|-------|
|  | J1-2 | J3-5 | Conglomerados | Total |
| Año muy húmedo   | 5.50 | 1.65 | 0.19          | 7.34  |
| Año húmedo   | 4.58 | 1.43 | 0.16          | 6.18  |
| Año medio  | 4.03 | 1.24 | 0.14          | 5.40  |
| Año seco-muy seco                                      | 2.85 | 0.89 | 0.10          | 3.83  |

Finalmente hay que recordar que los cálculos realizados se deben considerar como una primera aproximación, a falta de disponer de un modelo de flujo más completo del acuífero que permita calibrar las series de recarga con mayor precisión.

Como consideraciones finales de este apartado cabe reseñar que la mayor parte de los recursos de este acuífero corresponden al sector carbonatado jurásico delimitado entre los ríos Tirón y Oja (sector jurásico oeste), mientras que en el sector jurásico este (al este del Oja) la superficie de afloramientos es sensiblemente menor según la cartografía realizada, y por tanto lo son también sus recursos.

El sector oeste drena principalmente hacia el río Oja y su aluvial en la zona de contacto entre ambos, aguas abajo de Ezcaray, y en menor medida a través del manantial de las Tres Fuentes en Valgañón y otros de menor entidad. Por su parte el sector este parece estar más compartimentado, y es probable que sólo una parte drene hacia el río Oja.

En cuanto al balance medio anual obtenido con el modelo de flujo para el periodo 1990-2017, los resultados reflejan como entrada una recarga anual media de 5.63 hm<sup>3</sup> por infiltración de agua de lluvia, mientras las salidas se producirían mediante descargas naturales, principalmente hacia el río Oja y su aluvial ( $\approx 4$  hm<sup>3</sup>) y en menor medida hacia otros manantiales entre los que destaca el de Tres Fuentes ( $\approx 1.6$  hm<sup>3</sup> en su conjunto).



## **15. ANÁLISIS DE USOS Y DEMANDAS DE AGUA**





## 15. ANÁLISIS DE USOS Y DEMANDAS DE AGUA

### 15.1 Usos y demandas en la cuenca del río Oja

Como se indicaba en diversos estudios (MIMAM, 2005; ACUAEBRO, 2005), varios núcleos de población en las cuencas de los ríos Oja y Tirón padecían desde hace tiempo, problemas en su abastecimiento de agua, tanto en cantidad como en calidad. Por otra parte, desde 2001 se declaró como Zona Vulnerable a la contaminación por nitratos zonas del acuífero aluvial del Zamaca y del Aluvial del Oja debido a los efectos de una agricultura intensiva dominada por el cultivo de remolacha, patata y cereal de invierno. Por ello, ya desde el Plan Director de abastecimiento de agua a poblaciones en la Comunidad Autónoma de La Rioja de 2002-2015, se planteaba la utilización de recursos subterráneos del acuífero carbonatado de la Masa de agua subterránea Pradoluengo-Anguiano, mediante la construcción de una infraestructura de abastecimiento a unos 50 municipios del subsistema Oja-Tirón y del de Montes Obarenes. Esta actuación está declarada de Interés General para el Estado por la Ley 10/2001 del Plan Hidrológico Nacional. El esquema general del abastecimiento propuesto inicialmente (ACUAEBRO, 2005) se refleja en la figura 15.1.1.

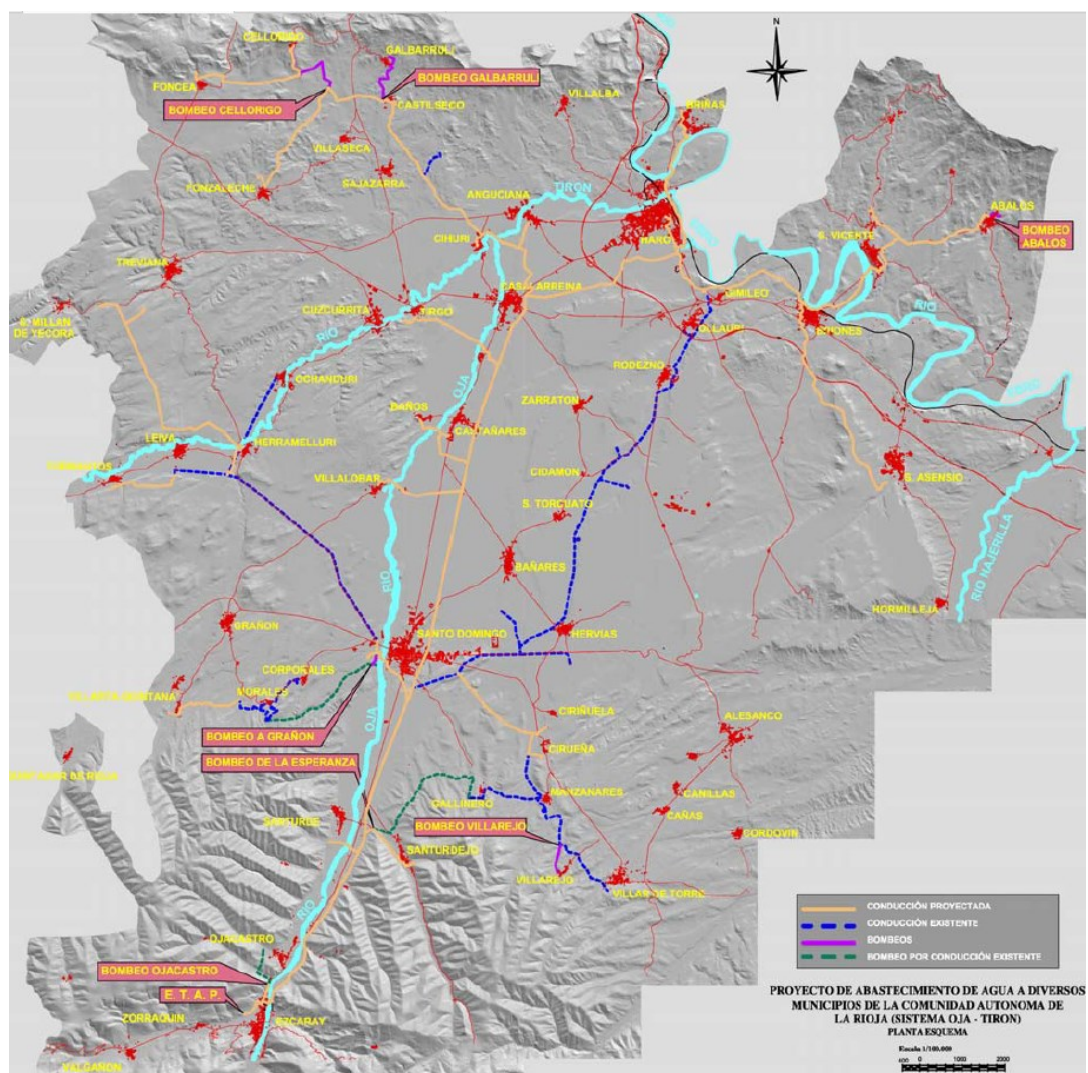


Figura 15.1.1. Esquema del proyecto de abastecimiento. (MIMAM, ACUAEBRO, 2005)

Estas cifras se actualizan en el documento “Convenio suscrito entre ACUAES S.A, el Gobierno de La Rioja y el Consorcio de Aguas y Residuos de La Rioja para la operación y mantenimiento de las obras del proyecto de abastecimiento de los municipios de la zona del río Oja” de 13 de enero de 2017, en donde se describen las características del sistema de abastecimiento (Tabla 15.1.1)

**Tabla 15.1.1 Características principales del sistema de abastecimiento Oja-Tirón (ACUAES, 2017)**

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Nº núcleos abastecidos            | 46  |
| Q máximo de cálculo               | 312 l/s ( $\pm$ 27.000 m <sup>3</sup> /día) |
| Población fija horizonte 2025     | $\pm$ 32.000 habitantes                     |
| Dotación teórica calculada máxima | $\pm$ 840 l/hab/día                         |
| Caudal de diseño de la ETAP       | 325 l/s ( $\pm$ 28.000 m <sup>3</sup> /día) |
| Longitud Red de tubería principal | 34,9 km                                     |
| Longitud Red tubería ramales      | 88 km                                       |

Desde la ETAP de Ezcaray se inicia una red ramificada con una conducción principal de Ezcaray a Haro con distintos ramales a los municipios con una longitud total de más de 120 km de tubería (Figura 15.1.2). Las captaciones de aguas subterráneas y superficiales que suministran el agua a la misma, se describen en la siguiente tabla.

**Tabla 15.1.2 Captaciones del sistema de abastecimiento Oja-Tirón conectadas a la estación de tratamiento de agua potable (ETAP) de Ezcaray (ACUAES, 2017).**

| Captaciones  | Equipo bombeo   | Q (l/s) |
|--|---|---------|
| Pozo San Torcuato-1 realizado por el IGME.               | Bombas 190 kW compartiendo mismo cuadro eléctrico seleccionadas por conmutador (sólo puede funcionar uno) | 200     |
| Pozo San Torcuato-2 realizado por ACUAES                 |   |         |
| Pozo Cantera realizado por el IGME                       | Bomba 50 kW (instalado pero sin contrato de suministro eléctrico)   | 35      |
| Captación superficial de la Mancomunidad de La Esperanza |   | 27      |

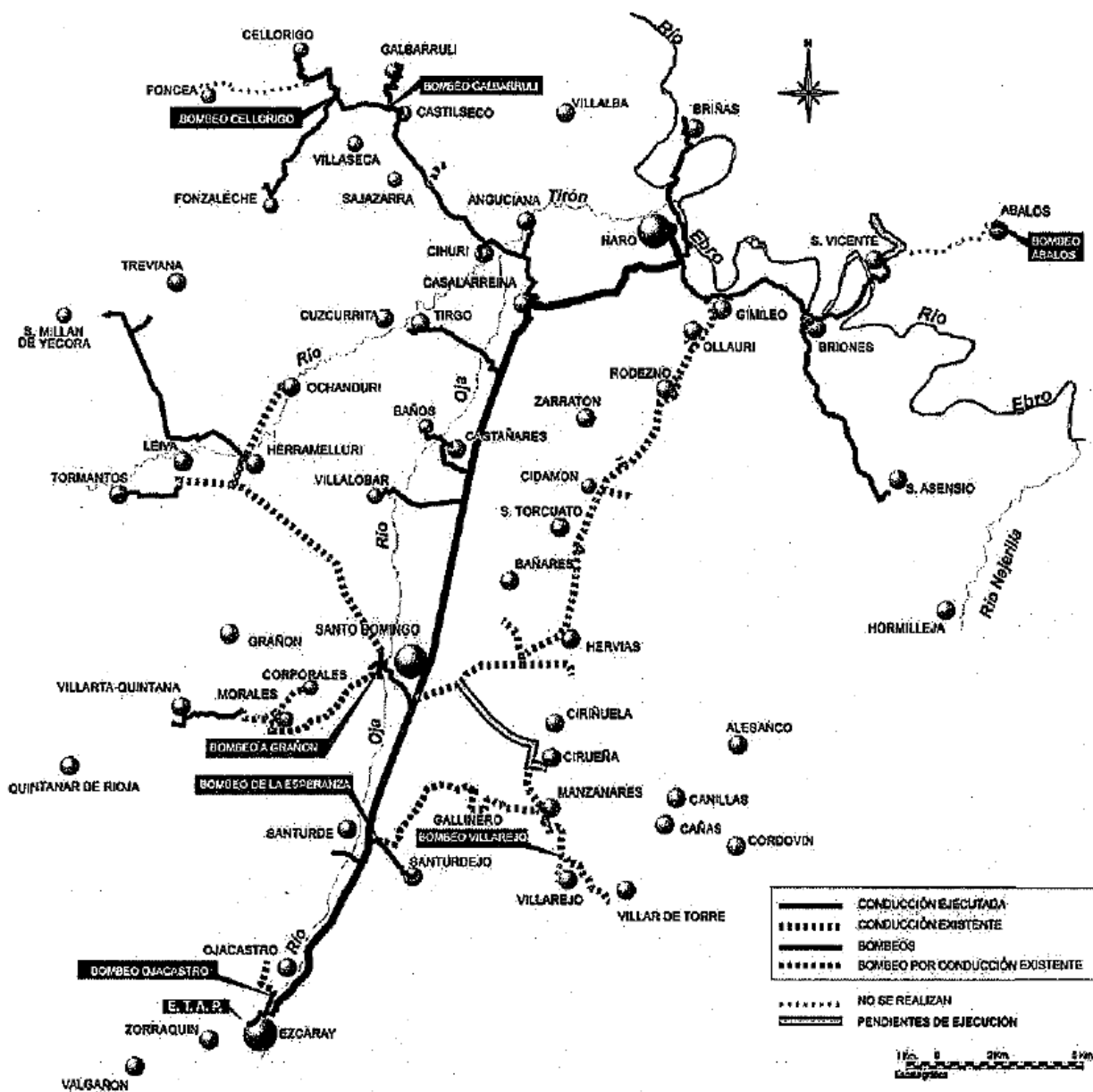


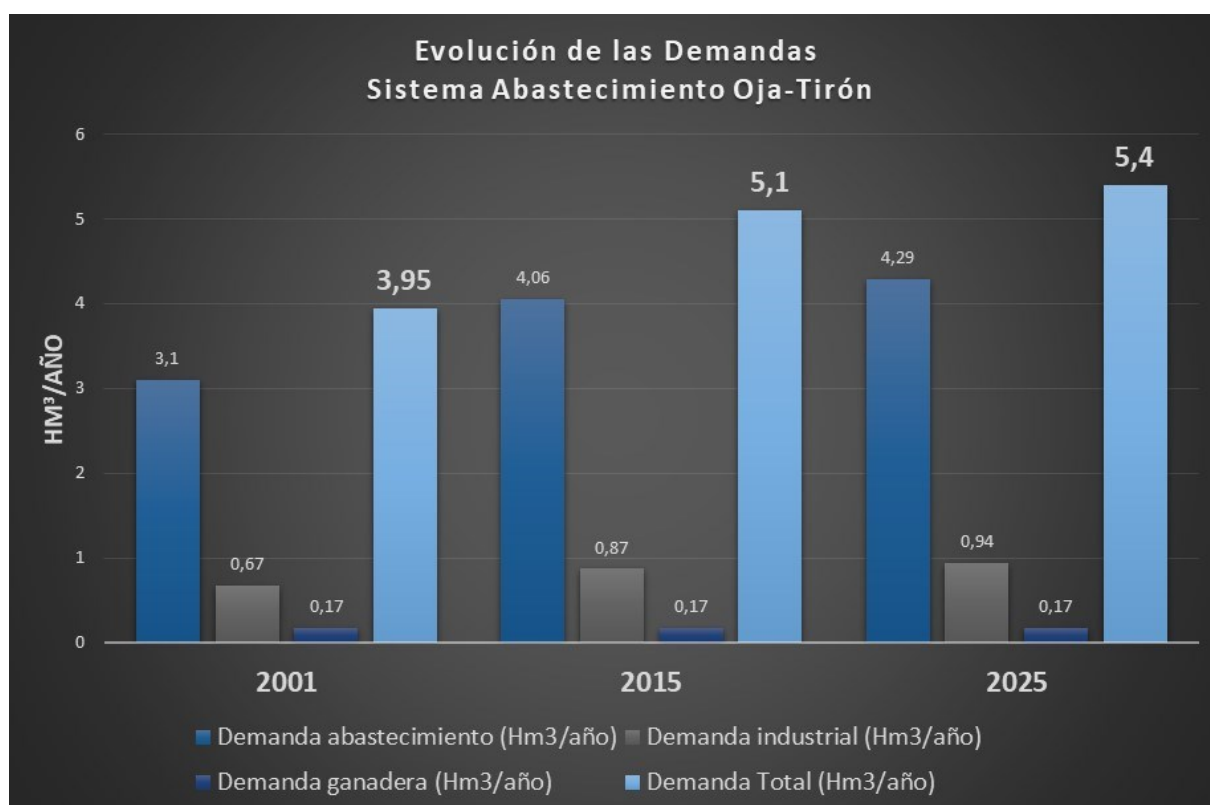
Figura 15.1.2. esquema del sistema de abastecimiento (Fuente: ACUAES, 2017)

Los datos más recientes corresponden al capítulo de “Estudio de la demanda” y su Anejo nº 2, del proyecto de abastecimiento facilitados por el Consorcio de Aguas y Residuos de La Rioja. Este estudio se llevó a cabo para determinar las demandas actuales y las futuras para el año horizonte de 2025. Los datos de demandas actuales se extrajeron de las encuestas de campo realizadas en el “Plan Director de Abastecimiento a Poblaciones de La Rioja del año 2000”. La estimación del consumo se llevó a cabo considerando una permanencia de la población estacional de dos meses al año e incluyen las estimaciones de las demandas industriales y

ganaderas. Para las demandas futuras se ha tenido en cuenta la evolución poblacional estimada en cada núcleo urbano de los 45 abastecidos por el Sistema (Tabla y figura 15.1.3)

**Tabla nº 15.1.3. Estimación de la evolución de la población (fija y estacional) y demandas**  
(Fuente: Estudio de la Demanda-Anejo nº 2. Consorcio de Aguas y Residuos de la Rioja)

| Año  | Pobl. fija | Pobl. estaci. | Dotación media (lhab/día) | Demanda abto. (Hm <sup>3</sup> /año) | Demanda industrial (Hm <sup>3</sup> /año) | Demanda ganadera (Hm <sup>3</sup> /año) | <b>Demanda Total (Hm<sup>3</sup>/año)</b> |
|------|------------|---------------|---------------------------|--------------------------------------|---|---|---|
| 2001 | 28.710     | 40.802        | 240                       | 3,10                                 | 0,67                                      | 0,17                                    | <b>3,95</b>                               |
| 2015 | 30.792     | 46.377        | 280                       | 4,06                                 | 0,87                                      | 0,17                                    | <b>5,10</b>                               |
| 2025 | 32.587     | 48.899        | 280                       | 4,29                                 | 0,94                                      | 0,17                                    | <b>5,40</b>                               |



**Figura 15.1.3. Evolución de las Demandas teóricas en el sistema de abastecimiento.** (Fuente: Estudio de la Demanda-Anejo nº 2. Consorcio de Aguas y Residuos de la Rioja)



En relación con los usos para abastecimiento de los núcleos urbanos de la zona de estudio y que no están conectados a la Mancomunidad destaca Ezcaray, cuyo abastecimiento se lleva a cabo a través de una captación de aguas en el subálveo del río Oja (ver apartado 7,2)

El núcleo de Valgañón se abastece de varios manantiales o zanjas drenantes en las pizarras y cuarcitas paleozoicas aguas arriba, fuera del ámbito del acuífero carbonatado como son:

- En el Barranco de Los Canalones: Fuente Los Canalones (2111-2-0016) y Fuente El Maestro
- En el Barranco Roñadero: Fuente La Salud y Fuente del Barranco del Valle (2111-2-0029)

Las conducciones llegan al depósito de agua de Valgañón está situado en el Camino de la Tejera (ver Figura 7.2 de Captaciones de agua subsuperficiales)

El núcleo de Zorraquín se abastece de una toma o dren subterráneo en el Barranco de Monte Mayor (2111-2-0018) en el contacto entre los materiales paleozoicos y las areniscas del Buntsandstein. Las aguas se recogen en una caseta de acometida situada en Los Campos, que va al depósito de agua situado en el paraje “Rendogaña”.

La urbanización Usarena de Zorraquín tiene un depósito distinto e independiente del municipal. Este depósito toma el agua del Barranco de Usarena, pero como es escasa y discontinua, se complementa con caudales procedentes del Barranco de Monte Mayor que se recogen en la antigua caseta de acometida municipal, situada 500 m aguas abajo de la actual, en el paraje “Los Campos” (2111-2-0018). El agua que llega aquí es la sobrante de la que se va hacia el depósito municipal de Zorraquín, cuando éste se llena, el sobrero se lleva también hasta el depósito de la Urbanización Usarena. Este conjunto de aprovechamientos, parece insuficiente para abastecer a la urbanización de manera continua en períodos secos, y se dispone además de un pozo situado junto al depósito, que capte algún retazo de calizas triásicas del Munschelkalk.

## **15.2 Explotación y aprovechamiento del acuífero Jurásico**

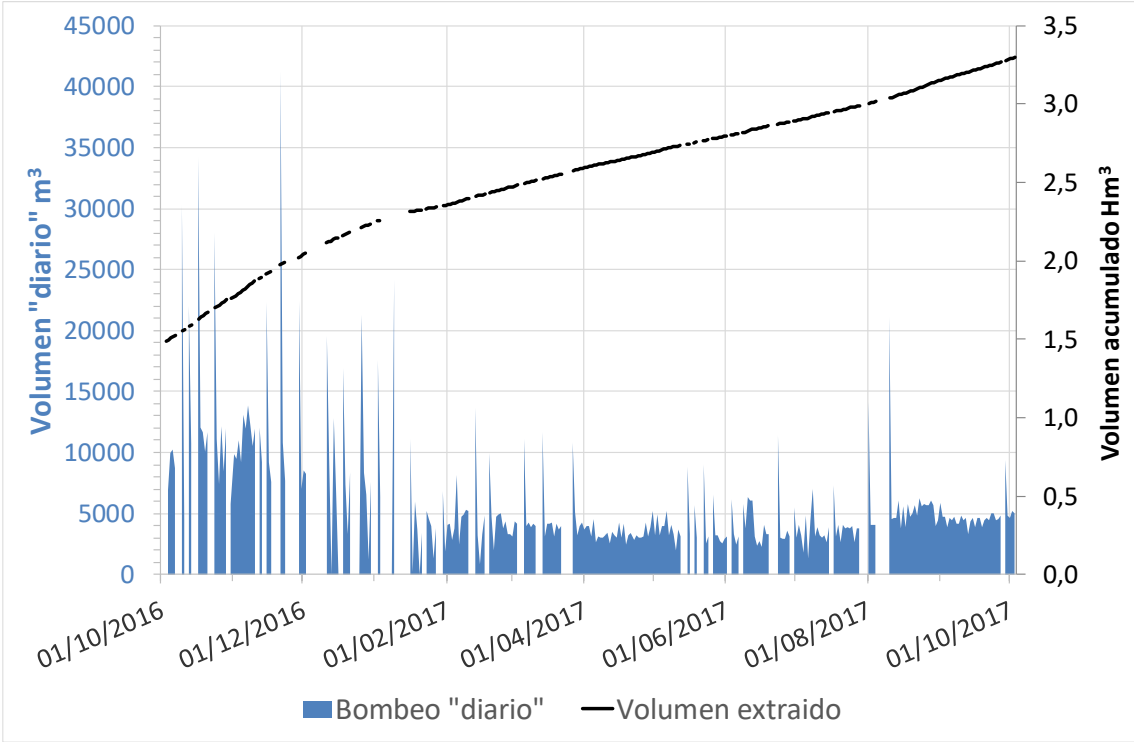
Actualmente sólo se explota este acuífero mediante las extracciones realizadas en los pozos de San Torcuato y más concretamente ahora desde el SanTorcuato-1 o pozo antiguo realizado por el IGME, cuyos datos de explotación se reflejan en el siguiente apartado.

Como se refleja en el capítulo 7 sobre el inventario de puntos de agua I, en la zona de estudio existen algunos manantiales que drenan el acuífero carbonatado que se aprovechan para distintos usos, pero no se han localizado bombeos mediante pozos o sondeos, a parte del sondeo de San Torcuato.

Los datos de explotación del pozo facilitados por el Consorcio abarcan el año hidrológico de 2016-2017 (de octubre de 2016 a octubre de 2017). Corresponden a datos diarios de lectura de contador en metros cúbicos. A la entrada de la ETAP por lo que para conocer lo que se ha bombeado en cada día se resta la lectura del día anterior. Los datos de contadores desde octubre de 2016 hasta enero de 2017 son datos manuales y desde enero de 2017 con registro automático. El resumen de volumen explotado es:

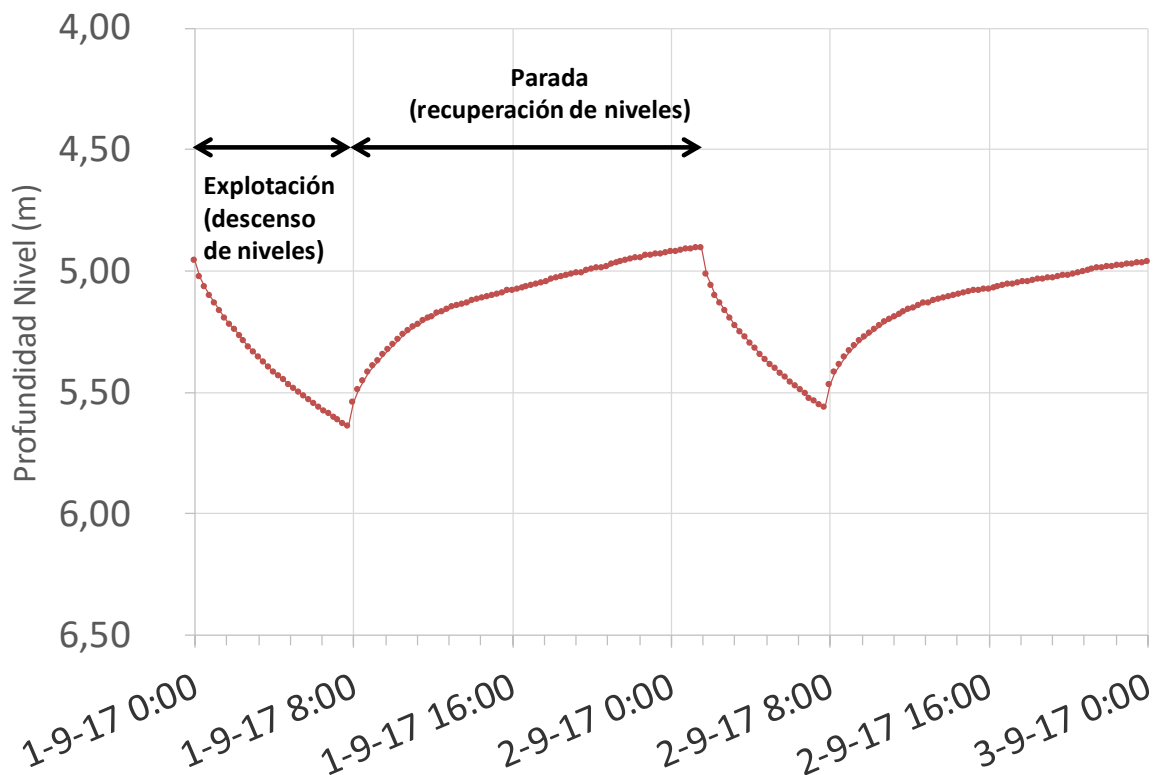
**Tabla 15.2.1 Datos de explotación del pozo San Torcuato-1 año hidrológico 2016-2017 (Fuente Aguas de Valencia S.A)**

|                                   |                              |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Período de datos                  | <b>3-10-2016 a 3-10-2017</b> |
| Contador inicio del período       | <b>1490493 m<sup>3</sup></b> |
| Contador final del período        | <b>3298603 m<sup>3</sup></b> |
| Volumen explotado periodo (anual) | <b>1808110 m<sup>3</sup></b> |
| Volumen medio diario (365 días)   | <b>± 5000 m<sup>3</sup></b>  |



**Figura 15.2.1 Datos de explotación del sondeo de San Torcuato-1 año hidrológico 2016-2017 facilitados por el Consorcio de Aguas**

En el gráfico de detalle (evolución de 3 días) se observa que la explotación del sondeo se realiza generalmente 8 horas al día, de las 12 de la noche a las 8 de la mañana (aprovechando la tarifa eléctrica más económica). El nivel dinámico se deprime 50 cms durante el período de funcionamiento de la bomba, y al cese de la misma, el nivel se recupera totalmente. Este período de explotación está en concordancia con las cifras ofrecidas de volúmenes diarios. Los 5000 m<sup>3</sup> medios aproximados extraídos diariamente corresponderían a una explotación de 8 horas a un caudal de unos 170 l/s.



**Figura 15.2.2. Detalle de la evolución diaria del nivel del agua en el pozo frente a la explotación. El día 1 de septiembre comienza el bombeo a las 0:00 y finaliza a las 8:00 horas del mismo día.**

Los datos suministrados por la empresa Aguas de Valencia S.A, disponibles sobre los volúmenes explotados hasta el día 10 de enero de 2018, ponen de manifiesto que la explotación del pozo San Torcuato continúa sin interrupción a lo largo del tiempo, independientemente del período estacional en el que nos encontremos. (Figura 15.2.2). Como se destacaba en el capítulo 7, se da la circunstancia que, a partir del mes de octubre, la utilización de recursos superficiales en la ETAP es casi nula (Captación de La Esperanza. Ver figura 7.1.5), y se siguen utilizando recursos

captados por el sondeo de San Torcuato en contra de lo que cabría esperar en un modelo habitual de gestión y utilización conjunta de recursos subterráneos y superficiales.

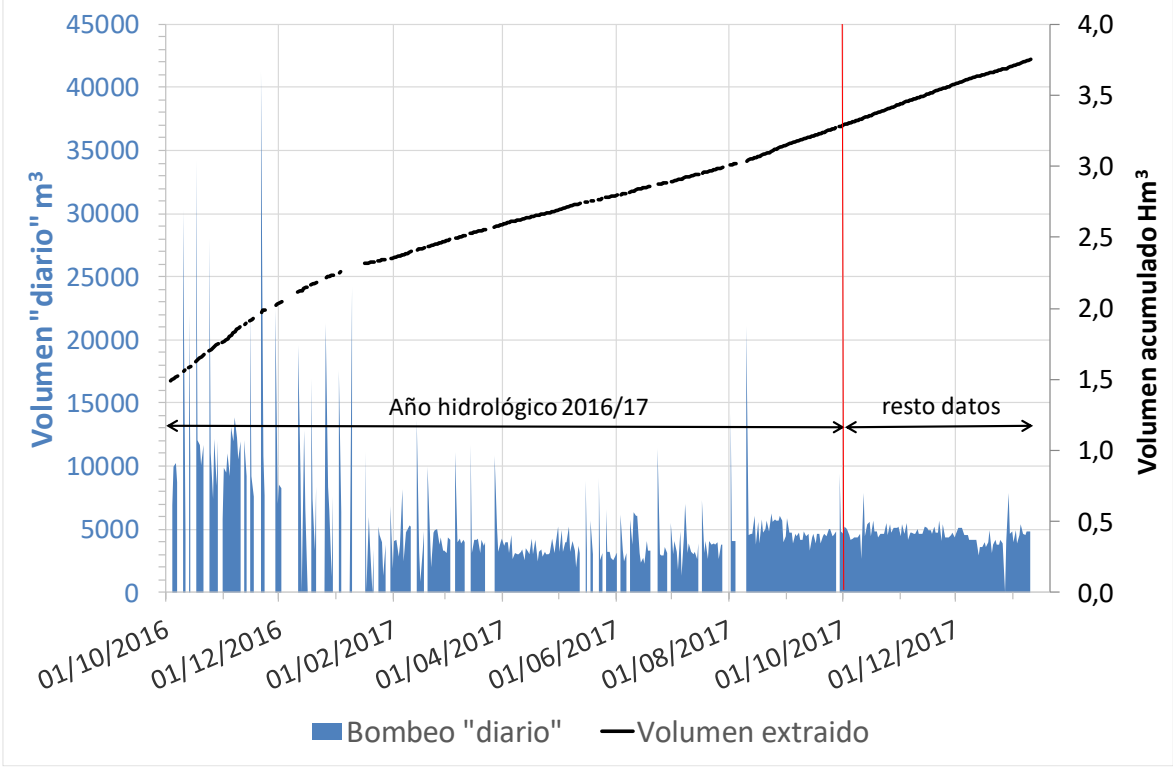


Figura 15.2.3 Datos disponible de explotación del sondeo de San Torcuato-1 (octubre 2016 a enero de 2018)

**16. ESQUEMAS DE GESTIÓN Y  
BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO  
JURÁSICO COMPRENDIDO ENTRE  
LOS RÍOS TIRÓN Y SANTURDEJO  
BAJO DIFERENTES HIPÓTESIS DE  
FUNCIONAMIENTO**





## 16. ESQUEMAS DE GESTIÓN Y BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO JURÁSICO COMPRENDIDO ENTRE LOS RÍOS TIRÓN Y SANTURDEJO BAJO DIFERENTES HIPÓTESIS DE FUNCIONAMIENTO.

En el presente capítulo se plantean una serie de esquemas de gestión hídrica con el objeto de aprovechar los recursos de agua subterránea del acuífero jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo en el abastecimiento urbano de la mancomunidad del río Oja. Para la simulación de dichas hipótesis de gestión se hace uso de un modelo matemático unicelular.

### 16.1. Fundamento matemático de los modelos unicelulares de acuíferos.

Los acuíferos (Figura 16.1-1) en los modelos unicelulares se simulan mediante una única celda (Figura 16.1-2) que posee un cierto volumen de almacenamiento sujeto al efecto de una entrada y una salida de agua.

En la naturaleza, la descarga de agua de un acuífero puede tener lugar tanto de manera difusa a uno o varios ríos como de forma puntual a través de uno o varios manantiales, e incluso mediante transferencia subterránea a otros acuíferos.

La descarga de agua puede producirse tanto a través de una única tipología de drenaje (superficial difuso, superficial puntual o subterráneo) como mediante una combinación de todas ellas, pero cuando se simula un acuífero mediante un modelo unicelular todas las descargas de agua deben concretarse en un único valor medio para cada paso de tiempo. La apreciación realizada no solo afecta al llamado régimen natural, sino también al influenciado donde una parte del agua almacenada en el acuífero se extrae mediante captación artificial.

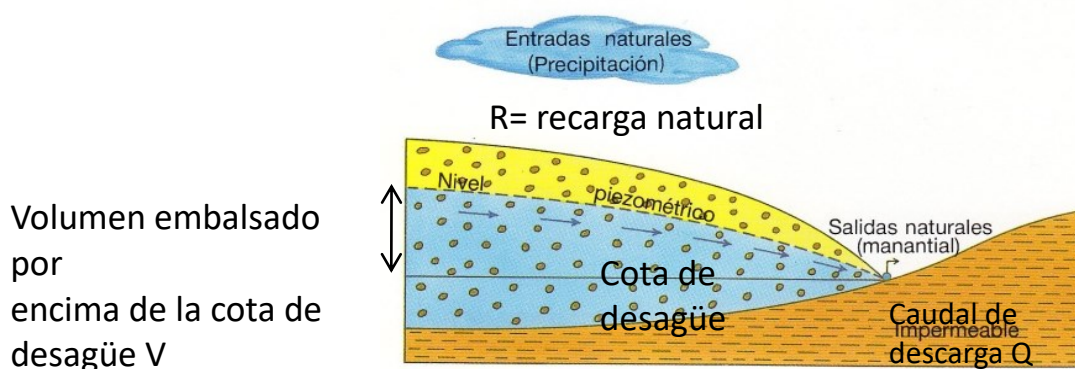
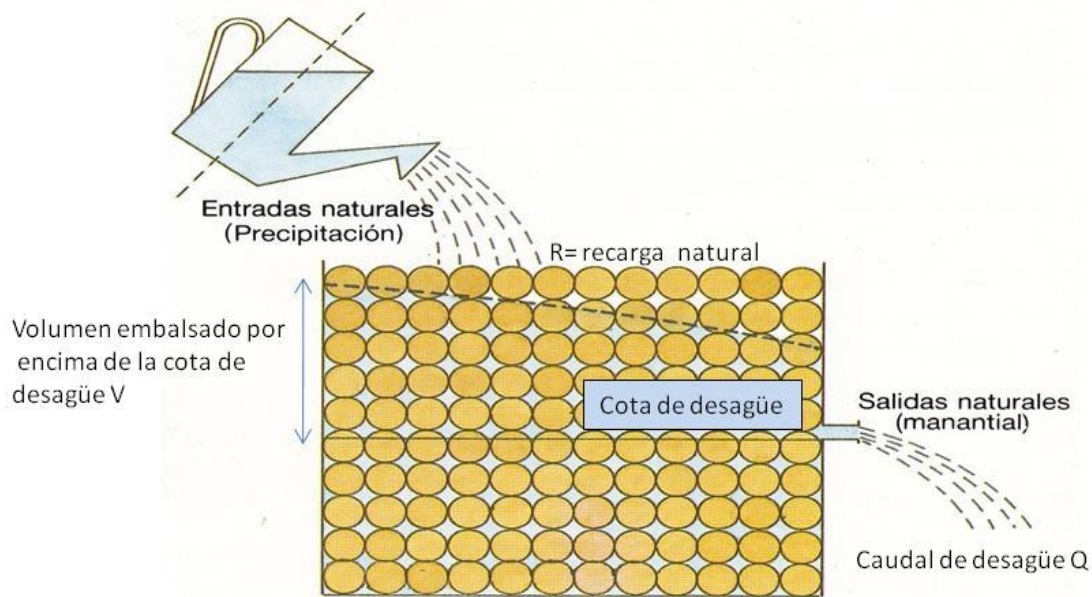


Figura 16-1-1. Sección transversal de un acuífero detrítico que recibe una recarga (R) procedente de las precipitaciones, que en un instante determinado almacena un volumen (V) por encima de la cota de desagüe y que en ese mismo instante descarga un caudal (Q) a través de un manantial.

La recarga de agua a los acuíferos en los modelos unicelulares también se encuentra sujeta al anterior condicionante, tanto si el régimen de funcionamiento es el natural (las entradas de agua al acuífero solo tienen lugar por precipitación, infiltración a través del lecho de los ríos y por transferencia subterránea desde otros acuíferos) como si es influenciado (recibe agua de los retornos de riegos y por pérdidas en las infraestructuras hidráulicas de conducción y almacenamiento).



**Figura 16.1-2. Esquema conceptual del acuífero de la figura 16.1-1 al objeto de su simulación mediante un modelo unicelular con indicación de las acciones a las que se encuentra sometido.**

Los modelos unicelulares se utilizan cuando no se requiere una modelización detallada del acuífero. Utilizan muy pocos parámetros que globalizan el comportamiento del acuífero, por lo que solo proporcionan valores medios de las variaciones piezométricas e intercambios de flujo de agua con el sistema superficial.

La base matemática en que se sustentan parte de la relación que existe entre el volumen ( $V$ ) almacenado en un acuífero por encima de la cota de desagüe y el caudal ( $Q$ ) que descarga a la red de drenaje superficial, que viene dada por la expresión:

$$Q = \alpha V \quad (16.1-1)$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de desagüe o de agotamiento del acuífero. Dicho coeficiente tiene dimensiones de la inversa del tiempo. La ecuación diferencial que sintetiza el funcionamiento del acuífero y expresa el balance de agua en la única celda del modelo es la siguiente:

$$R - \alpha V = dV/dt \quad (16.1-2)$$

La solución de dicha ecuación para una recarga constante  $R$  que comienza en un tiempo  $t=0$  cuando  $V=V_0$  y  $Q=Q_0$  viene dada por:

$$V = V_0 e^{-\alpha t} + R (1 - e^{-\alpha t}) / \alpha \quad (16.1-3)$$

y

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t} + R (1 - e^{-\alpha t}) \quad (16.1-4)$$

Si se considera que en la celda que representa el comportamiento del acuífero tiene lugar un bombeo continuo  $B$ , la solución del problema que se plantea viene dada por las siguientes ecuaciones:

$$V=V_0e^{-\alpha t} + R (1-e^{-\alpha t}) / \alpha - B (1-e^{-\alpha t}) / \alpha \quad (16.1-5)$$

y

$$Q=Q_0e^{-\alpha t} + R (1-e^{-\alpha t}) - B (1-e^{-\alpha t}) \quad (16.1-6)$$

A partir de las ecuaciones 16.1-5 y 16.1-6, y dado que un modelo unicelular es un modelo lineal que permite aplicar el principio de superposición, se tiene que al considerar condiciones iniciales nulas ( $V_0=0$  y  $Q_0=0$ ) se obtiene que las afecciones de un bombeo sobre el volumen ( $V$ ) y el caudal ( $Q$ ) son respectivamente:

$$- B (1-e^{-\alpha t}) / \alpha \text{ y } -B (1-e^{-\alpha t}) \quad (16.1-7)$$

Si la simulación se realiza para periodos de tiempo constantes  $\Delta t$  la solución, si no hay bombeos en el acuífero, se puede obtener a partir de las siguientes ecuaciones:

$$V_n=V_{n-1}e^{-\alpha \Delta t} + R_n (1-e^{-\alpha \Delta t}) / \alpha \quad (16.1-8)$$

y

$$Q_n=Q_{n-1}e^{-\alpha \Delta t} + R_n (1-e^{-\alpha \Delta t}) \quad (16.1-9)$$

Pero si se tiene en cuenta la ecuación 16.1-1, la expresión 16.1-9 adopta la siguiente forma:

$$Q_n=\alpha V_n= \alpha V_{n-1}e^{-\alpha \Delta t} + R_n (1-e^{-\alpha \Delta t}) \quad (16.1-10)$$

Cuando hay bombeos en el acuífero las ecuaciones que proporcionan las soluciones al problema son las siguientes:

$$V_n=V_{n-1}e^{-\alpha \Delta t} + R_n (1-e^{-\alpha \Delta t}) / \alpha - B_n (1-e^{-\alpha \Delta t}) / \alpha \quad (16.1-11)$$

y

$$Q_n=Q_{n-1}e^{-\alpha \Delta t} + R_n (1-e^{-\alpha \Delta t}) - B_n (1-e^{-\alpha \Delta t}) \quad (16.1-12)$$

Si se tiene en cuenta la ecuación 16.1-1, la expresión 16.1-12 adopta la siguiente forma:

$$Q_n=\alpha V_n= \alpha V_{n-1}e^{-\alpha \Delta t} + R_n (1-e^{-\alpha \Delta t}) - B_n (1-e^{-\alpha \Delta t}) \quad (16.1-13)$$

Donde  $V_n$ ,  $R_n$ ,  $B_n$  y  $Q_n$  son respectivamente el volumen, la recarga, el bombeo y el caudal descargado por el acuífero en el periodo  $n$ .

La simulación de un acuífero mediante un modelo unicelular precisa evaluar previamente la recarga natural mediante un modelo de transferencia precipitación-recarga y determinar el valor del coeficiente de agotamiento a partir del análisis de hidrogramas de caudal en aquellos periodos en los que no se producen recargas al acuífero. El coeficiente de agotamiento también se puede aproximar mediante la expresión:

$$\alpha = \pi^2 T / 4 S L^2 \quad (16.1.14)$$

Donde  $T$  es la transmisividad del acuífero,  $S$  el coeficiente de almacenamiento y  $L$  la distancia del río al borde impermeable o a la divisoria hidrogeológica.

Si el régimen de funcionamiento es el natural (no hay extracciones),  $V$  y  $Q$  siempre serán positivos. Si  $V$  toma un valor negativo por causa de un bombeo, hay que tener presente que  $Q$  no puede ser físicamente negativo, por lo que, si la descarga se produce a través de manantiales,  $Q$  tiene que permanecer igual a cero —el manantial se seca y su caudal de descarga es nulo— hasta que  $V$  vuelve a ser positivo. Si se trata de ríos conectados con el acuífero,  $Q$  si puede ser negativo, y en este caso el río recargará al acuífero.

Los modelos unicelulares tienen la ventaja de ser muy sencillos y la desventaja de simplificar excesivamente el sistema hídrico que se quiere simular. Una de las mayores indefiniciones que presentan es no tener en cuenta la distancia de los pozos al río o a los manantiales, por lo que los resultados que proporcionan son aproximados, aunque muchas veces resultan ser suficientemente precisos para el objetivo que se analiza.

La mayor crítica que se le puede imputar a un modelo unicelular es que no tiene en cuenta la distribución espacial de las acciones externas que tienen lugar sobre el acuífero. Este hecho puede dar lugar a que el modelo unicelular proporcione resultados que pueden estar alejados de la realidad. No obstante, en numerosos casos constituye una aproximación suficiente o un primer paso que permite analizar la necesidad de plantear la realización de modelos de mayor complejidad como son los modelos de flujo de parámetros distribuidos.

## **16.2. Diseño y programación de un modelo unicelular sobre una hoja excel. Aplicación al acuífero jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo.**

Las ecuaciones 16.1-8, 16.1-10, 16.1-11 y 16.1-13 se han programado sobre una hoja EXCEL al objeto de poder simular distintas hipótesis de funcionamiento hídrico y explotación hidráulica de un acuífero mediante sondeos localizados en el mismo. En el caso del presente documento se trata del acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo. Dicho acuífero pertenece a la masa de agua subterránea “Pradoluengo-Anguiano”.

En la programación que se ha realizado sobre la hoja EXCEL no se ha contemplado el supuesto que, en el acuífero Jurásico, cuando el nivel piezométrico se sitúe por debajo de la cota de desagüe por causa de la explotación que se venga realizando en el mismo, se produzca recarga inducida a partir del agua que circule por los ríos Oja, Tirón, Santurdejo y Ciloría.

A este respecto es factible, según la interpretación de los ensayos de bombeo realizados en el pozo San Torcuato, que cuando se bombee en el acuífero Jurásico, el río Oja, si circula agua por el mismo, ceda un cierto caudal, más o menos importante, a dicho acuífero, aunque este supuesto precisa para su confirmación de la realización de una investigación específica de un mayor detalle que la efectuada hasta la fecha. La misma no se ha llevado a cabo porque escapaba a los objetivos planificados en el pliego de prescripciones técnicas del presente proyecto.

Un escenario como el anteriormente expuesto, donde los ríos, por causa del fenómeno de interrelación hídrica entre aguas superficiales y subterráneas, suministraran agua al acuífero Jurásico cuando se bombeara un determinado



caudal en el mismo, proporcionaría un resultado más favorable que el aportado por el supuesto donde no existe interrelación hídrica entre el río Oja y el acuífero Jurásico. Esta última hipótesis ha sido la contemplada en el presente estudio.

En la programación que se ha realizado sobre la hoja EXCEL se ha contemplado la no linealidad que implica el secado de manantiales en aquellas ocasiones en que los bombeos den lugar a este hecho, por lo que siempre que la piezometría se sitúe por debajo de la cota de desagüe del acuífero, el caudal descargado por los manantiales tomará matemáticamente un valor negativo, pero dado que este hecho no es físicamente posible, para que el programa pueda proseguir los cálculos adecuadamente, la descarga de agua a través de los manantiales tiene que adoptar un valor nulo hasta que vuelva a almacenarse agua en el acuífero por encima de la cota de desagüe. El código que se ha desarrollado se ha programado de acuerdo a las siguientes reglas:

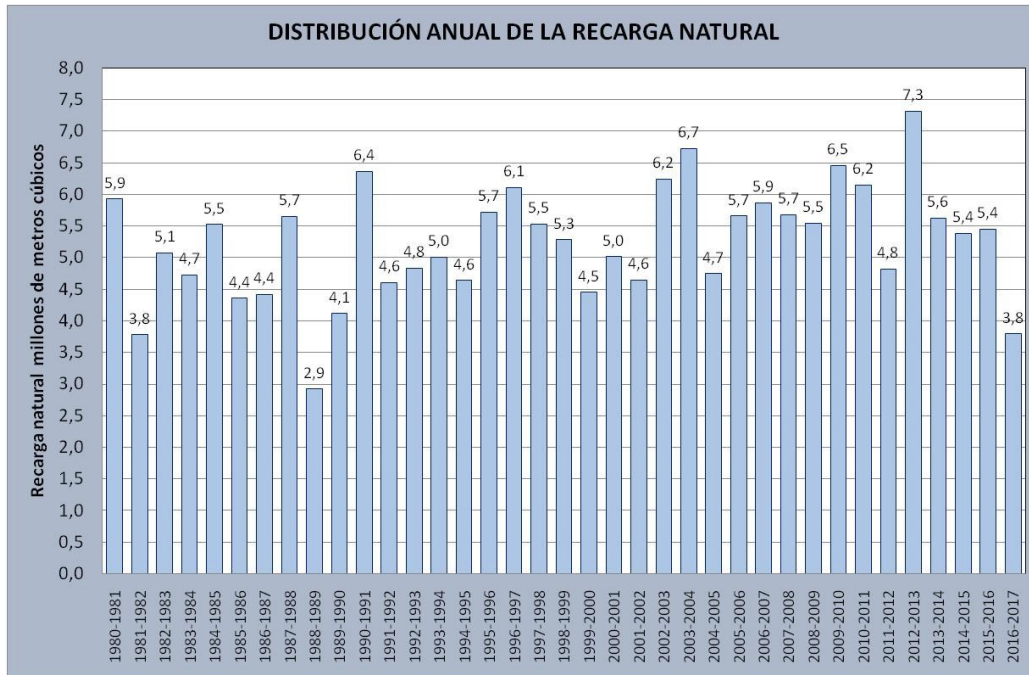
- 1) El acuífero se recarga solo a partir de la precipitación que cae sobre los afloramientos permeables del mismo.
- 2) La descarga tiene lugar de forma puntual a través de uno o varios manantiales que el modelo unifica en un único punto de drenaje.
- 3) El modelo solo contempla cesión de agua desde el acuífero a los ríos Tirón, Oja, Santurdejo y Ciloría a través de manantiales. En ningún caso tiene presente que puedan existir transferencias de agua entre los ríos y el acuífero de forma que los primeros aporten agua al segundo por efecto de los bombeos que puedan tener lugar en el acuífero. La transferencia de agua solo se contempla en un único sentido que es el determinado por el flujo que tiene lugar entre el acuífero y la red fluvial.

### **16.3. Datos de partida.**

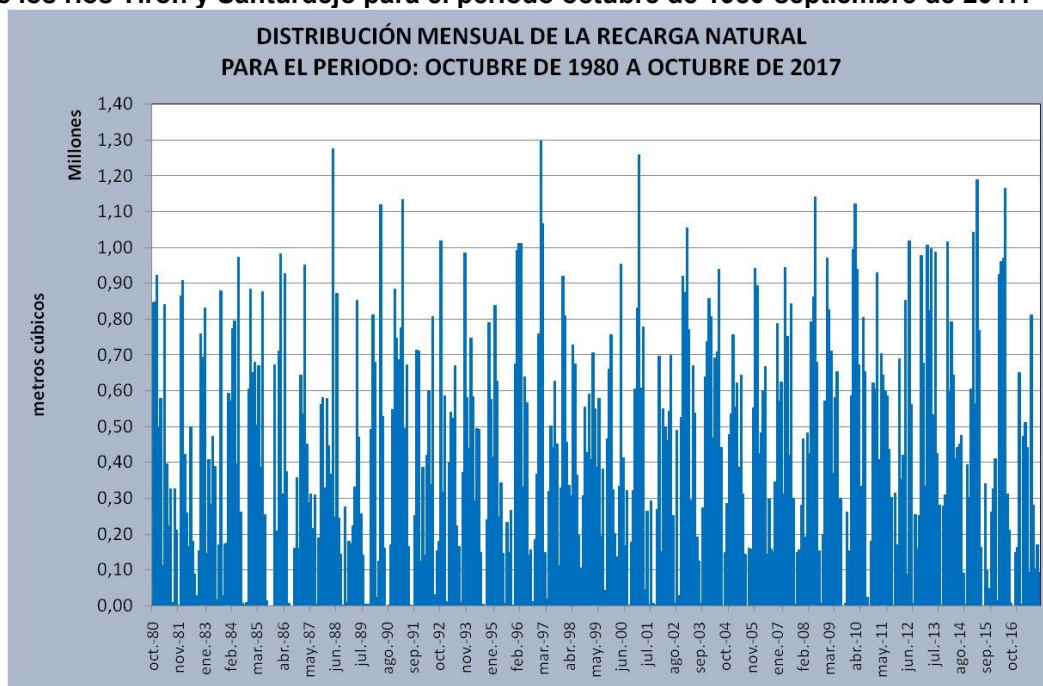
Como datos de partida el modelo necesita conocer la serie de recarga al acuífero, el coeficiente de agotamiento y el volumen inicial almacenado por encima de la cota de desagüe. Así mismo se precisa definir el periodo de simulación que en el presente caso ha estado comprendido inicialmente entre octubre de 1980 y septiembre de 2017.

#### **16.3.1. Serie de recarga natural al acuífero.**

En los apartados 14.1, 14.2 y 14.3 se ha estimado la recarga al acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo mediante el empleo de diferentes metodologías. Se ha considerado que los mejores resultados los ofrece la aplicación realizada con el código Visual Balance dado que se trata de una metodología muy contrastada. En las figuras 16.3.1-1, 16.3.1-2, 16.3.1-3 y 16.3.1-4 se exponen diferentes gráficos que muestran la distribución de la recarga natural al acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo a escala anual, mensual, mensual media y mensual acumulada para todo el periodo analizado. Así como una comparativa (Figura 16.3.1-5) entre los meses en que tiene lugar la mayor y la menor recarga, que respectivamente son enero y agosto.



**Figura16.3.1-1. Distribución anual de la recarga natural al acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo para el periodo octubre de 1980-septiembre de 2017.**



**Figura 16.3.1-2. Distribución mensual de la recarga natural al acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo para el periodo octubre de 1980-septiembre de 2017.**

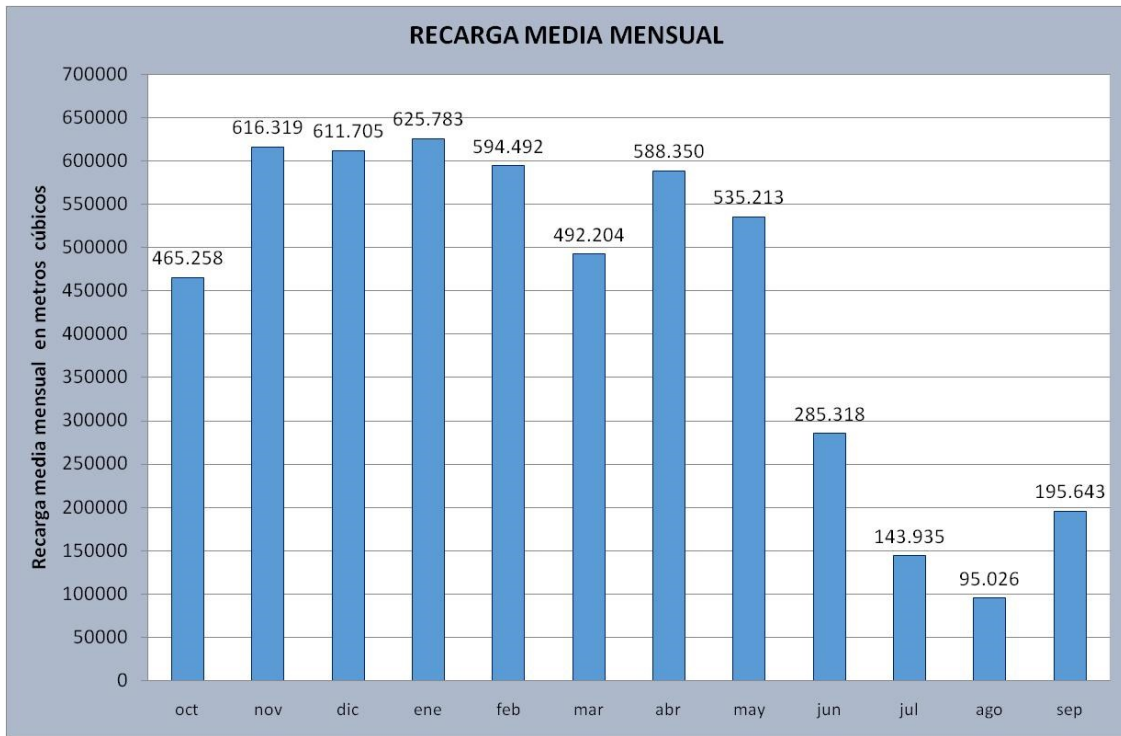


Figura 16.3.1-3. Distribución mensual media de la recarga natural al acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo para el periodo octubre de 1980-septiembre de 2017.

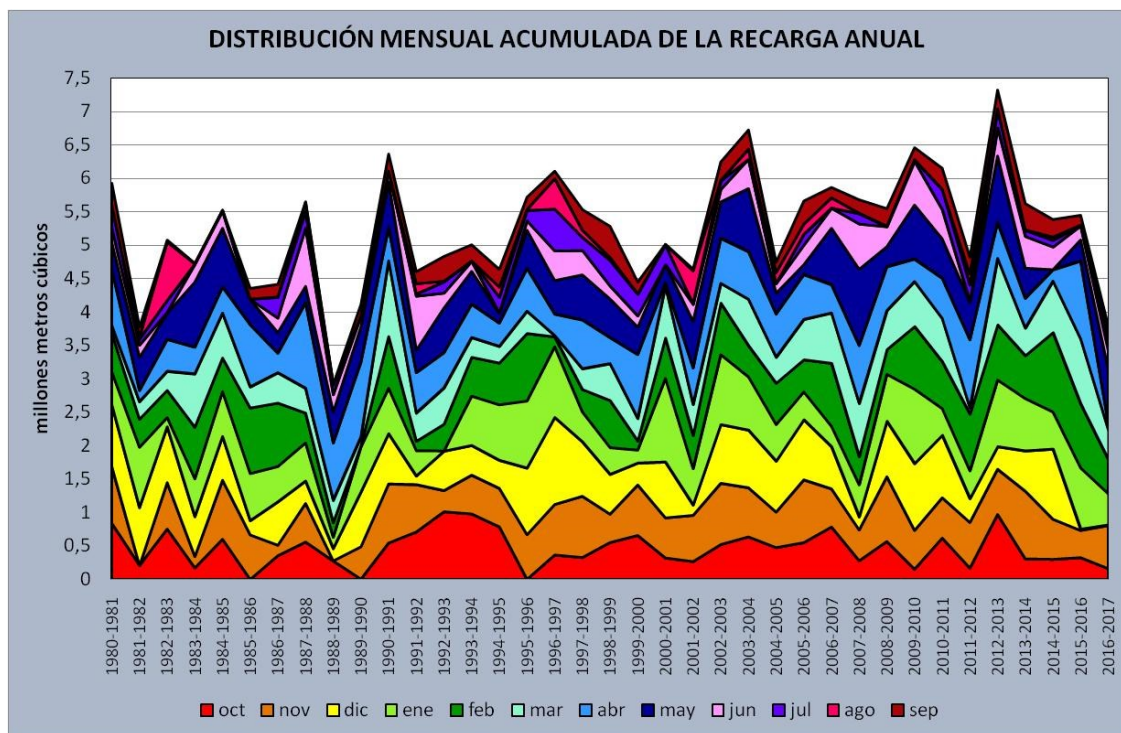
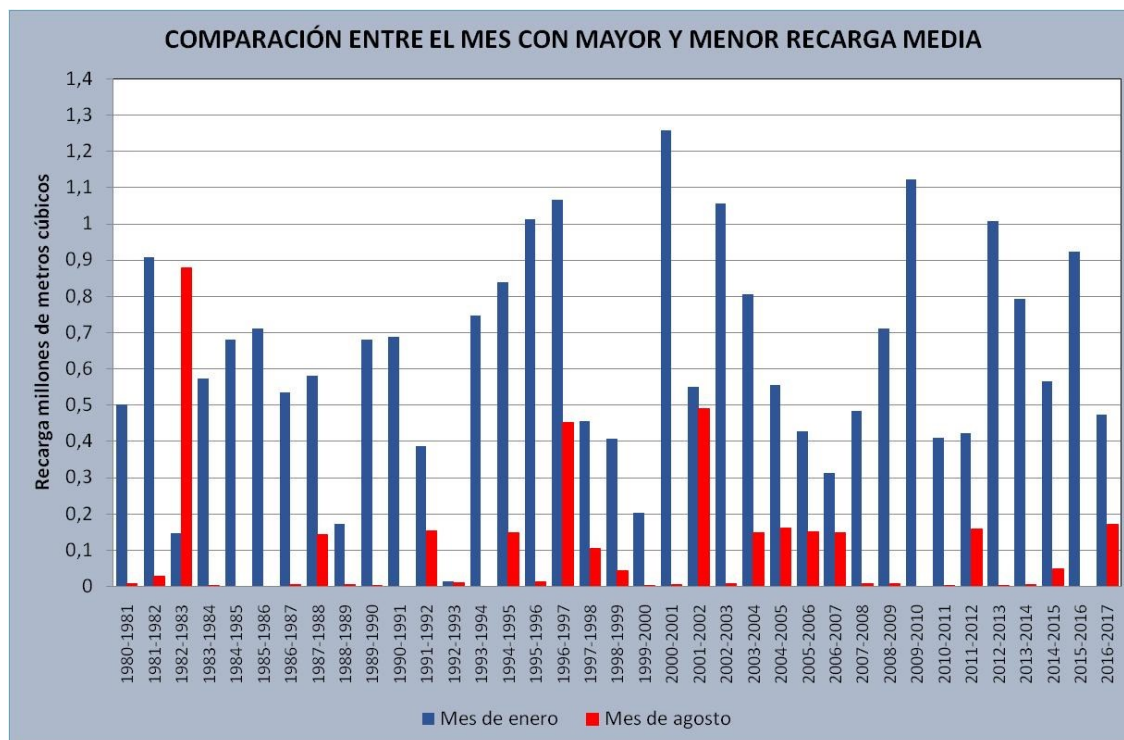


Figura 16.3.1-4. Distribución mensual acumulada de la recarga natural al acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo para el periodo octubre de 1980-septiembre de 2017.



**Figura 16.3.1-5. Comparativa entre el mes (enero) en que tiene lugar la mayor recarga natural al acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo y el mes (agosto) en que tiene lugar la menor recarga. Periodo de estudio octubre de 1980-septiembre de 2017.**

En los anexos 16.3.1-1 y 16.3.1-2 se muestran los valores mensuales de la recarga natural para el periodo de estudio que abarca desde octubre de 1980 a septiembre de 2017 totalizando 37 años. La recarga anual media para el periodo de tiempo anteriormente referenciado es de 5,25 hm<sup>3</sup>.

### 16.3.2. Coeficiente de agotamiento del acuífero Jurásico.

El coeficiente de agotamiento de un acuífero se puede aproximar mediante la expresión 16.1.14 que es función de la transmisividad del acuífero, del coeficiente de almacenamiento y de la distancia que hay desde el río al borde impermeable o a la divisoria hidrogeológica del acuífero. La aplicación de esta fórmula exige que el acuífero sea homogéneo y el río completamente penetrante y bien conectado con el acuífero. Estos supuestos suelen ser teóricos y los acuíferos son normalmente heterogéneos y los ríos poco penetrantes o con conexión parcial, por lo que en principio no se cumplen las condiciones para poder aplicar la fórmula anteriormente referenciada.

Los cálculos que se han realizado en el presente apartado, para estimar unos primeros coeficientes de agotamiento con los que iniciar la etapa de calibración del modelo matemático unicelular del acuífero Jurásico, han partido de los resultados que proporciona el ensayo de bombeo realizado en octubre de 2014 por la empresa Zeta Amaltea en el sondeo Zorraquín. En el informe técnico que elaboró dicha empresa se proporcionan diferentes resultados de transmisividad y coeficiente de almacenamiento, que varían para la transmisividad desde 50 m<sup>2</sup>/día a 800 m<sup>2</sup>/día y

para el coeficiente de almacenamiento desde 0,01 a 0,07. El valor de L se ha estimado en 4000 m atendiendo a la geología realizada en el presente proyecto y a la distancia que existe entre el pozo de Zorraquín y la divisoria hidrogeológica entre los ríos Tirón y Oja. A partir de dichos datos el valor más elevado que se obtiene para el coeficiente de agotamiento es de  $0,01 \text{ días}^{-1}$  y el más bajo de  $0,0008 \text{ días}^{-1}$ .

### **16.3.3. Volumen almacenado inicialmente en el acuífero Jurásico por encima de la cota de desagüe.**

El volumen almacenado inicialmente en el acuífero Jurásico por encima de la cota de desagüe es función de:

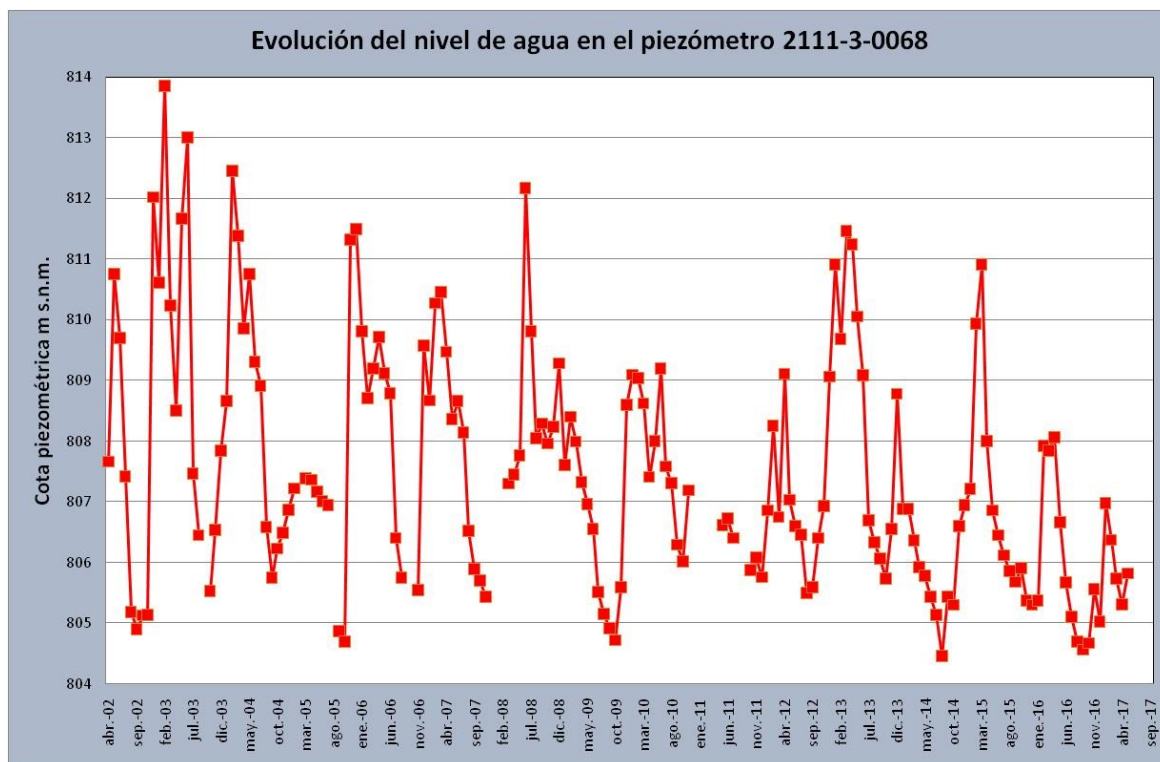
- 1) La diferencia de cotas existentes entre la piezométrica inicial en el acuífero Jurásico y la correspondiente al punto de desagüe por el que el acuífero drena a la red hidrográfica superficial.
- 2) La extensión de sus afloramientos permeables.
- 3) El coeficiente de almacenamiento.

La piezometría inicial se ha determinado como media aritmética de todas las cotas piezométricas correspondientes a cada uno de los meses de octubre presentes en la serie de 15 años sobre la que existen medidas de nivel de agua en el piezómetro 2111-3-0068 (Figura 16.3.3-1). Este piezómetro se ha considerado el punto de control más representativo del acuífero Jurásico por tener un mayor número de registros piezométricos y pertenecer a la red oficial de control de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE).

El registro de medidas que se ha utilizado se extiende desde octubre de 2002 a septiembre de 2016. Dicho periodo corresponde a una tipología climática húmeda y muy húmeda (apartado 6 del presente documento). Se han seleccionado los meses de octubre porque el valor inicial de la piezometría que se precisa para iniciar la simulación matemática debe corresponder al inicio de un año hidrológico, que en el presente estudio se ha hecho coincidir con el mes de octubre de 1980.

En los otros 22 años, que también abarca la serie climática utilizada en el estudio - que se extienden desde octubre de 1980 a octubre 2001- se carece de medidas piezométricas. En dicha serie climática se pueden identificar dos ciclos (apartado 6 del presente documento). El primero de ellos, que abarca desde octubre de 1981 a septiembre de 1995, es de tipo seco y muy seco. El otro, que se extiende desde octubre 1995 hasta septiembre de 2001, presenta una tipología climática de tipo medio.





**Figura 16.3.3-1. Evolución del nivel de agua en el piezómetro 2111-3-0068. Datos medidos.**

De lo anteriormente expuesto se desprende que se ha asignado a un mes (octubre de 1980), perteneciente a un año con una tipología climática de tipo muy seco (apartado 6 del presente documento), un valor medio de piezometría deducido a partir de una serie climática de tipo húmedo y muy húmedo. Este hecho implica utilizar un valor inicial de piezometría que puede plantear una cierta incertidumbre. No obstante, dado que, con carácter general, los procesos de simulación matemática, durante sus primeros pasos de tiempo, tienden a autocorregir las posibles incertidumbres que se pueden derivar de los valores iniciales que se utilizan para comenzar el proceso de simulación, basta descartar los resultados asociados a ese periodo inicial de tiempo, que se podría denominar de autoajuste, para proceder a realizar los análisis que se estime oportuno efectuar.

El valor que se ha estimado para la piezometría inicial correspondiente al mes de octubre de 1980 ha sido de 805,64 m s.n.m.

En el apartado 10 se describe la nivelación topográfica de precisión realizada tanto del cauce del río Oja a su paso por la localidad de Ezcaray como de la red piezométrica del acuífero cuaternario del río Oja en el entorno de dicha ciudad. Los piezómetros correspondientes al acuífero Jurásico ya se habían nivelados en estudios anteriores. A partir de los trabajos mencionados se ha podido establecer que la cota de desagüe del piezómetro 2111-3-0068 con el que se calibrará el modelo unicelular es de 800 m s. n. m.

Los dos valores a los que se hace referencia en el presente apartado permiten estimar que, para el instante inicial de la simulación, la diferencia de alturas entre el nivel piezométrico inicial y la cota de desagüe correspondiente al piezómetro representativo que se va utilizar en la calibración del modelo es de 5,64 m.

La extensión de afloramientos permeables del acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo obtenida mediante planimetrado utilizando el GIS de la cartografía geológica realizada en el presente proyecto es de 1.9970.000 m<sup>2</sup>.

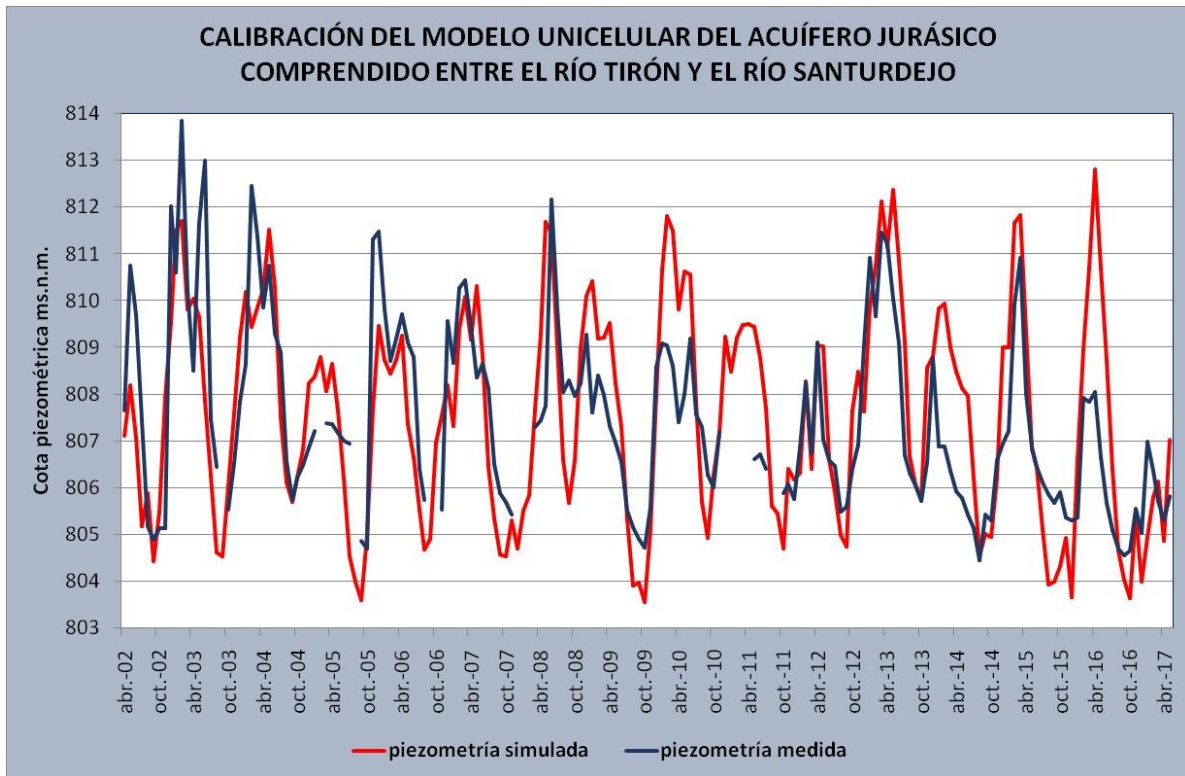
En función de los valores que se han determinado para la altura de la lámina de agua, que inicialmente hay por encima de la cota de desagüe, y de la extensión de los afloramientos permeables, y dado que el coeficiente de almacenamiento, según se ha indicado anteriormente, puede estar comprendido entre 0,01 y 0,07, el volumen almacenado inicialmente por encima de la cota de desagüe puede estar comprendido entre 1.126.308 m<sup>3</sup> y 7.884.156 m<sup>3</sup>.

#### 16.4. Calibración y análisis de sensibilidad

El mejor coeficiente de correlación que se ha podido conseguir entre la piezometría medida y la simulada (Figura 16.4-1) ha sido de 0,72. Dicho coeficiente de correlación se ha obtenido para los valores que figuran en la tabla 16.4-1. De acuerdo a los resultados que se muestran en dicha tabla se puede afirmar que se trata de un acuífero que presenta una respuesta muy rápida entre los procesos de recarga y descarga, pues su periodo de semivaciado o semiagotamiento es de 66 días.

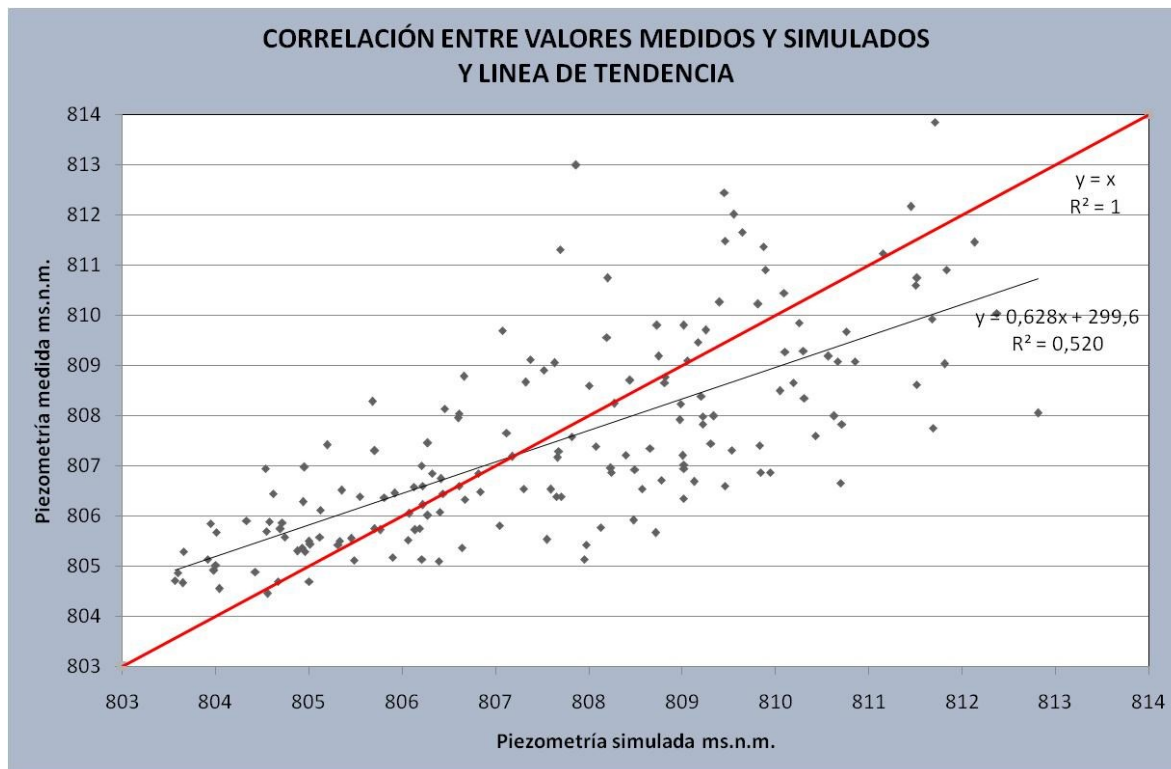
**Tabla 16.4-1. Valores de calibración.**

| Concepto   | Valor                     |
|--|---------------------------|
| Superficie de afloramientos permeables                       | 19.970.000 m <sup>2</sup> |
| Cota piezométrica inicial                                    | 805,64 ms.n. m.           |
| Cota de desagüe  | 800 ms.n.m.               |
| Altura inicial de la lámina de agua sobre la cota de desagüe | 5,64 m                    |
| Volumen inicial almacenado sobre la cota de desagüe          | 1.126.308 m <sup>3</sup>  |
| Coeficiente de almacenamiento                                | 0,01                      |
| Coeficiente de agotamiento o de desagüe                      | 0,0105 días <sup>-1</sup> |
| Periodo de calibración                                       | abril 2002-mayo 2017      |



**Figura 16.4-1. Calibración del modelo. Comparación entre la piezometría medida y la simulada. Piezómetro 2111-3-0068.**

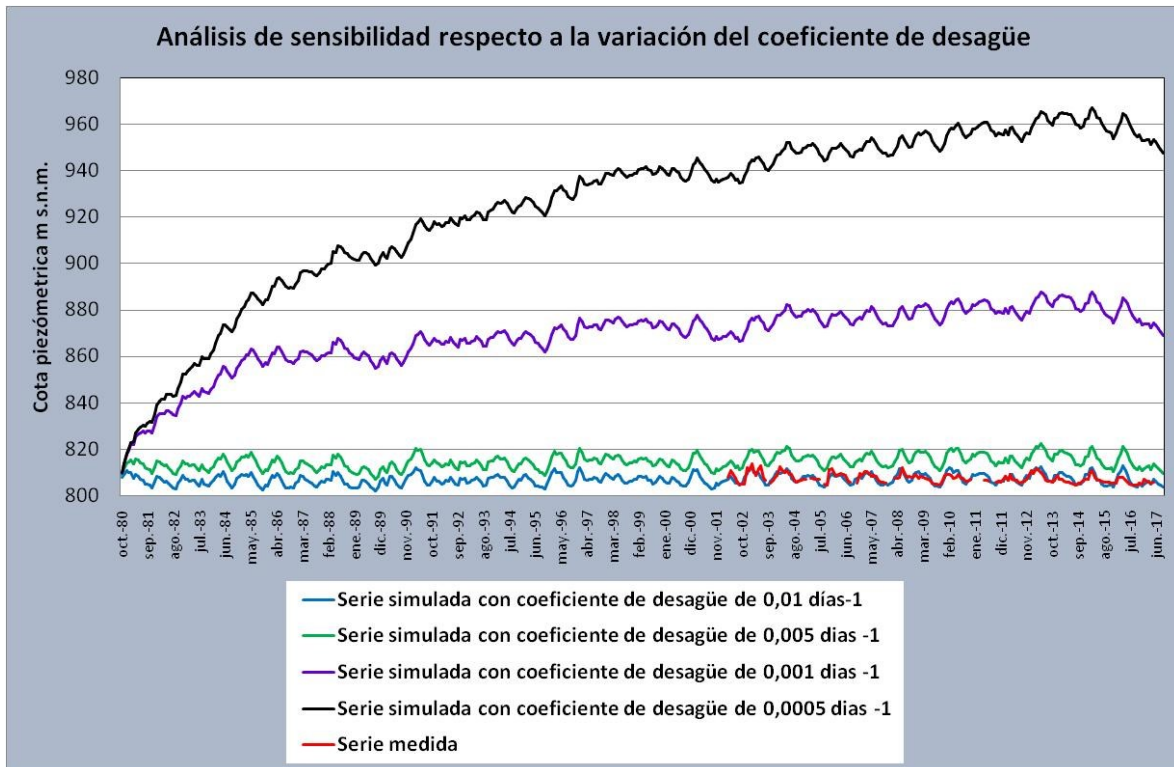
En la figura 16.4-2 se muestra la línea de tendencia entre los valores medidos y los simulados en el proceso de calibración del modelo unicelular del acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo. La ecuación que liga dichos valores viene dada por la recta  $y = 0,628x + 299,6$ . En dicha figura también se muestra la disposición de los puntos simulados respecto de los medidos en relación a la posición ideal de los mismos que viene expresada por la recta de ecuación  $y=x$ .



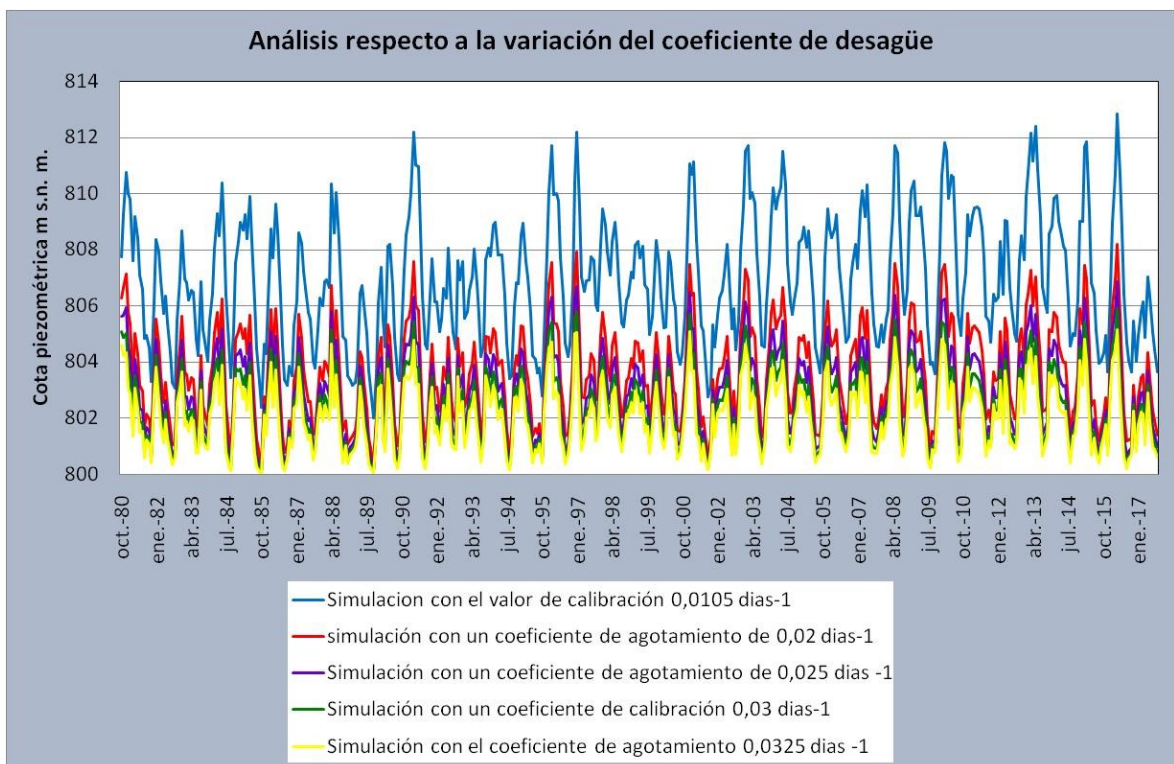
**Figura 16.4-3. Línea de tendencia y ecuación que liga los valores medidos y simulados en el proceso de calibración. Disposición de los puntos simulados respecto a los medidos en relación a la posición ideal que deben ocupar.**

La figura 16.4-3 muestra gráficamente el análisis de sensibilidad realizado para la variación del coeficiente de agotamiento del acuífero cuando este toma valores inferiores al de calibración. Los resultados obtenidos indican que cuanto menor es el coeficiente de agotamiento, respecto a su valor de calibración, más se aleja la respuesta piezométrica simulada de los datos medidos en el piezómetro representativo del acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo, y más lento es el drenaje a la red hidrográfica superficial.

El análisis de sensibilidad realizado respecto de la variación del coeficiente de agotamiento, cuando se incrementa la cuantía del mismo por encima del valor de calibración, se muestra gráficamente en la figura 16.4-4. En la misma se observa que los resultados obtenidos empeoran al incrementar el valor del coeficiente de desagüe por encima del óptimo de calibración, y que según se aumenta dicho valor más fácilmente se vacía el agua contenida en el acuífero.

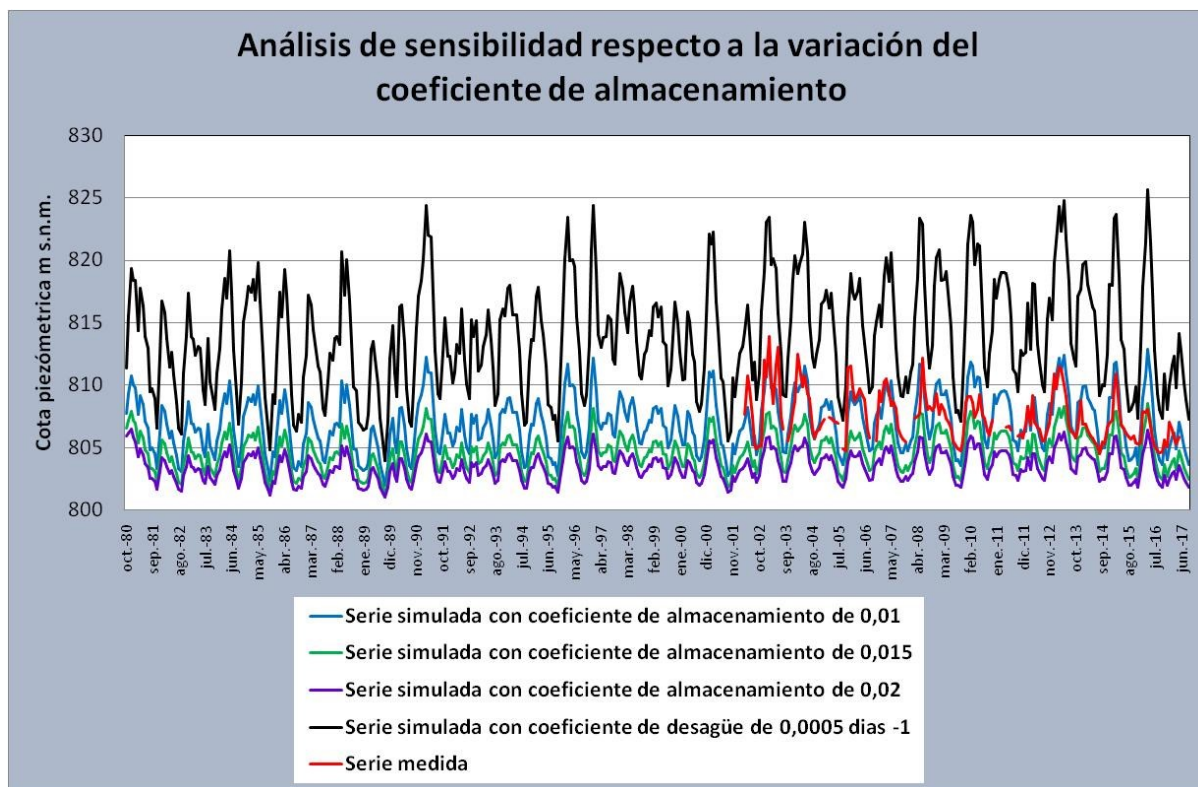


**Figura 16.4-3 Análisis de sensibilidad respecto a la variación del coeficiente de desagüe cuando su valor es inferior al de calibración.**



**Figura 16.4-4 Análisis de sensibilidad respecto a la variación del coeficiente de desagüe cuando este adopta un valor superior al de calibración.**





**Figura 16.4-5. Análisis de sensibilidad respecto a la variación del coeficiente de almacenamiento.**

En la figura 16.4-5 se muestra gráficamente el análisis de sensibilidad realizado respecto a la variación del coeficiente de almacenamiento. En la misma se puede observar que cuanto más se aparta el valor del coeficiente de almacenamiento del obtenido en la calibración, tanto por exceso como por defecto, los valores piezométricos que se simulan se apartan y difieren más en su valor y tendencia de los correspondientes a la serie real que se ha medido.

El periodo de tiempo que se ha utilizado para realizar los análisis de sensibilidad ha sido el comprendido entre octubre de 1980 y septiembre de 2017.

### 16.5. Periodo de validez del modelo.

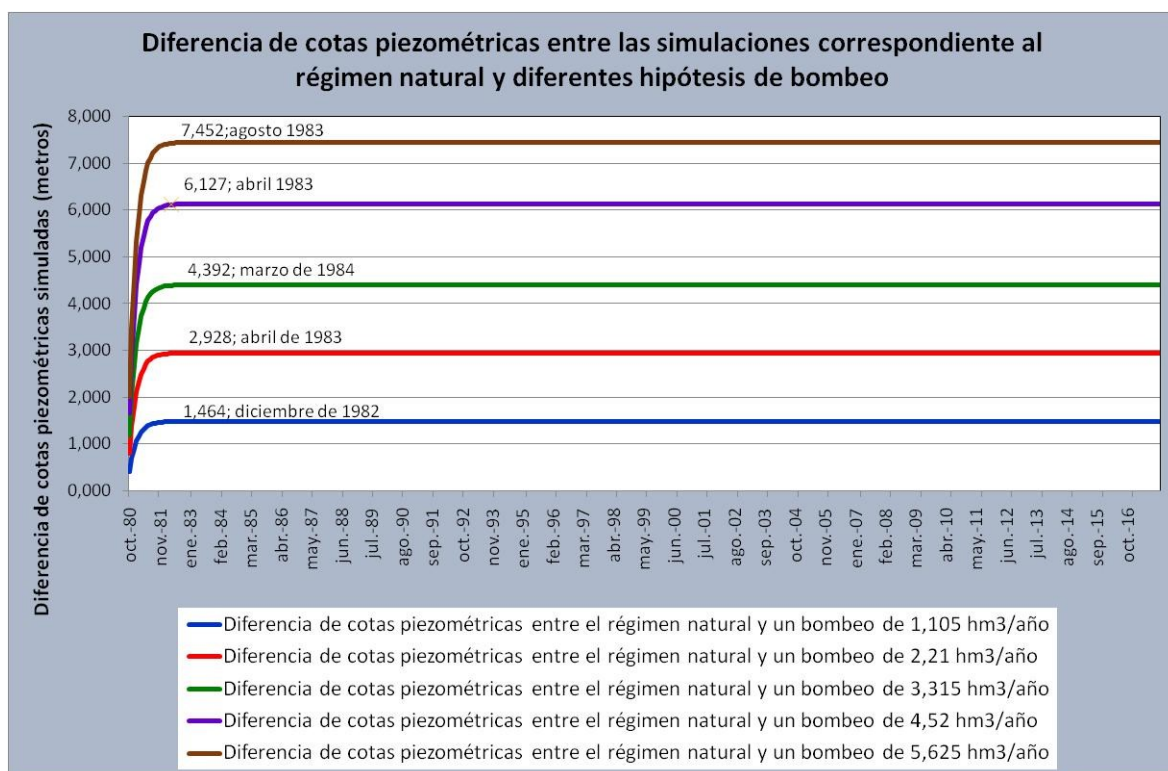
La duración del periodo de autoajuste del modelo se ha determinado simulando para el periodo octubre de 1980 a septiembre de 2017 distintas hipótesis de bombeo. A partir de los resultados que proporcionan estas simulaciones se ha calculado el instante en que la diferencia de cotas piezométricas entre las series correspondientes al régimen natural y a las distintas hipótesis de bombeo alcanza un valor constante (Figura 16.5-1). El error máximo que se ha admitido para determinar dicho valor ha sido de 1 mm.

Cada una de las series resultantes a que dan lugar las anteriores operaciones proporciona una fecha diferente en la que se alcanza un valor constante para la diferencia de cotas piezométricas. Dicho valor se ha denominado de estabilización. El instante a partir de la cual se admite que los resultados proporcionados por el modelo empiezan a tener validez lo determina aquella fecha de entre todas las obtenidas que presenta una mayor demora en alcanzar el valor de estabilización.

Las hipótesis de funcionamiento en régimen influenciado que se han comparado con el régimen natural han sido las siguientes: bombeo de 1,105 hm<sup>3</sup>/año, bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año, bombeo de 3,315 hm<sup>3</sup>/año, bombeo de 4,52 hm<sup>3</sup>/año y bombeo de 5,625 hm<sup>3</sup>/año.

Las cuantías de los bombeos contemplados en dichas hipótesis responden a una progresión aritmética de razón 1,105 hm<sup>3</sup>/año. El motivo por el que se ha generado dicha serie incluye:

- 1) El volumen concesional otorgado temporalmente por la Confederación Hidrográfica del Ebro para la satisfacción de la demanda de abastecimiento a la mancomunidad del río Oja. Dicho volumen lo ha establecido el organismo anteriormente citado en 2,21 hm<sup>3</sup>/año.
- 2) El bombeo objetivo a largo plazo que estima la Dirección General de Calidad Ambiental y Agua del Gobierno de La Rioja que se precisa para satisfacer la anterior demanda. La cuantía de dicho bombeo según el organismo anteriormente citado se cuantifica en un valor próximo a 4,52 hm<sup>3</sup>/año.
- 3) El máximo valor que pueden adquirir los bombeos para que no se produzca a largo plazo una sobreexplotación irreversible del acuífero. La cuantía más próxima a dicho bombeo, atendiendo a los valores que proporciona la serie aritmética de razón 1,105 hm<sup>3</sup>/año, es de 4,52 hm<sup>3</sup>/año, ya que el siguiente valor de la serie de 5,625 hm<sup>3</sup>/año daría lugar a una sobreexplotación del acuífero, pues se trata de una cuantía que es un siete por ciento superior a la recarga natural al acuífero. No obstante, a efecto de buscar la máxima precisión, se han realizado cálculos con ambos valores.



**Figura 16.5-1. Diferencia de cotas piezométricas entre las simulaciones correspondientes al régimen natural y distintas hipótesis de bombeo.**

En la tabla 16.5-1 se presenta una síntesis de los resultados obtenidos para el cálculo del tiempo de autoajuste y de la fecha a partir de la cual se podrían empezar a considerar válidos los resultados que proporciona la simulación matemática realizada mediante modelación unicelular del acuífero Jurásico. Dicha fecha correspondería al mes de marzo de 1984. Los pasos de tiempo transcurridos hasta que se ha alcanzado el valor de estabilización han sido de 41 y el valor de la estabilización de 4,392 m. Dichos valores corresponden a una hipótesis de bombeo de 3,315 hm<sup>3</sup>/año.

**Tabla 16.5-1 Resultados obtenidos para el cálculo del tiempo de autocorrección y de la fecha a partir de la cual se pueden empezar a considerar válidos los resultados que proporciona la simulación matemática. Criterio de diferencia de cotas piezométricas.**

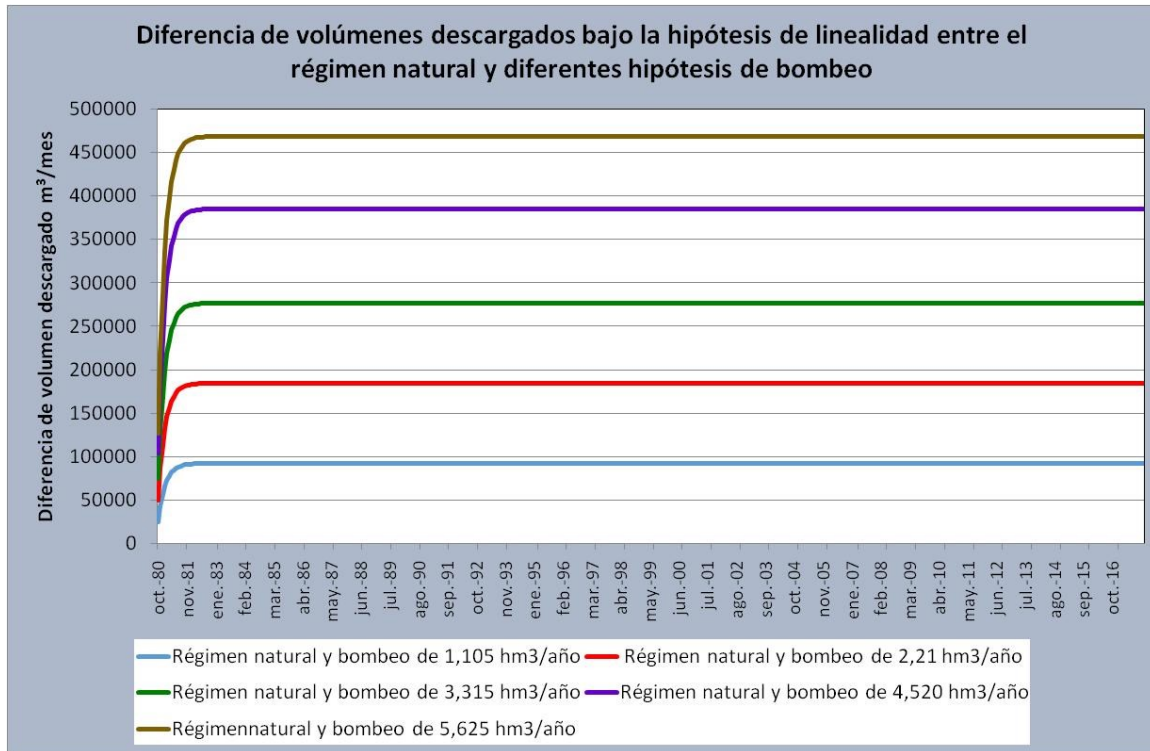
| Hipótesis de bombeo que se compara con el régimen natural (hm <sup>3</sup> /año) | Valor de estabilización (m) | Fecha en que se produce la estabilización | Pasos de tiempo hasta que se produce la estabilización (meses) |
|--|-----------------------------|---|--|
| 1,105  | 1,464                       | Diciembre de 1982                         | 27   |
| 2,210  | 2,928                       | Abril de 1983                             | 30   |
| 3,315  | 4,392                       | Marzo de 1984                             | 41   |
| 4,520  | 6,127                       | Abril de 1983                             | 30   |
| 5,625  | 7,452                       | Agosto de 1983                            | 35   |

Resultados parecidos se obtienen al trabajar con la diferencia de volúmenes que podría descargar el acuífero si la cota de desagüe no se localizara a 800 m s.n.m., sino a una cota inferior que siempre permitiera el drenaje de agua a una hipotética red hidrográfica. Operar de acuerdo a la anterior premisa implica linealizar el modelo para evitar la discontinuidad matemática a la que da lugar el secado de manantiales o de cualquier otra descarga de agua a la red fluvial. Los resultados que se obtienen procediendo de acuerdo a la anterior premisa se muestran en la figura 16.5-2 y en la tabla 16.5-2.

**Tabla 16.5-2. Resultados obtenidos para el cálculo del tiempo de autoajuste y de la fecha a partir de la cual se pueden empezar a considerar válidos los resultados que proporciona la simulación matemática. Criterio de volúmenes descargados bajo la hipótesis de linealización del modelo.**

| Hipótesis de bombeo que se compara con el régimen natural (hm <sup>3</sup> /año) | Valor de estabilización (m <sup>3</sup> ) | Fecha en que se produce la estabilización | Pasos de tiempo hasta que se produce la estabilización (meses) |
|--|---|---|--|
| 1,105  | 92083                                     | Octubre de 1983                           | 36   |
| 2,210  | 184167                                    | Junio de 1984                             | 44   |
| 3,315  | 276250                                    | Marzo de 1984                             | 41   |
| 4,520  | 385417                                    | Noviembre de 1984                         | 49   |
| 5,625  | 468750                                    | Marzo de 1984                             | 43   |

El error máximo que se ha admitido en la determinación del valor de estabilización entre las series correspondientes al régimen natural y a las distintas hipótesis de bombeo, para esta segunda forma de operar, ha sido de  $1 \text{ m}^3$ . Las alternativas de funcionamiento en régimen influenciado que se han comparado con el régimen natural han sido las mismas que las operadas cuando se ha utilizado el criterio de la diferencia de cotas piezométricas.



**Figura 16.5-2. Diferencia de volumen descargado entre las simulaciones en régimen natural con las distintas hipótesis de bombeo.**

Del análisis de las tablas 16.5-1 y 16.5-2 se deduce que el tiempo de autoajuste del modelo se puede estimar en cinco años al objeto de contemplar años hidrológicos completos. Esta es la razón por la que el periodo de validez del modelo se inicia en el mes de octubre de 1985, aunque la fecha más tardía que se obtiene para el periodo de estabilización del modelo sea noviembre de 1984. La serie temporal que se debe utilizar en el análisis de resultados se tendrá que limitar al periodo comprendido entre octubre de 1985 y septiembre de 2017, por lo que habrá que descartar todos los datos y resultados correspondientes al periodo octubre de 1980-septiembre de 1985. La serie final con la que se operará a lo largo de los siguientes capítulos del presente documento se circunscribe a un periodo temporal de 32 años hidrológicos.

### 16.6. Hipótesis de simulación planteadas.

Se han planteado seis hipótesis de simulación que se describen a continuación.

- 1) Funcionamiento del acuífero Jurásico en régimen natural.

Esta hipótesis de simulación reproduce el comportamiento que tendría el acuífero cuando no está sometido a ningún tipo de acción externa. Su objetivo es generar series de datos no influenciados que constituyan una base de referencia sobre la que poder comparar los resultados que proporcionan el resto de las simulaciones que se analizan.

- 2) Funcionamiento del acuífero Jurásico bajo la influencia de los bombeos reales realizados en el pozo San Torcuato durante el periodo octubre de 2016-septiembre 2017.

Esta hipótesis de simulación tiene por objeto reproducir el comportamiento del acuífero bajo la acción del bombeo acaecido durante el periodo octubre de 2016-septiembre 2017 y comparar los resultados que se obtienen con los proporcionados por el régimen natural. Analiza el comportamiento de las siguientes variables: volumen almacenado por encima y por debajo de la cota de desagüe del acuífero; evolución del nivel piezométrico y caudal descargado a la red hidrográfica superficial.

- 3) Funcionamiento del acuífero Jurásico bajo una hipótesis de bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año (70 l/s continuos a lo largo del año).

Esta hipótesis de gestión tiene por objeto reproducir el comportamiento que tendría el acuífero para una explotación continuada de 70 l/s, que es el volumen concesional otorgado temporalmente por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) como apoyo a la demanda de agua con destino al abastecimiento de la mancomunidad del río Oja.

- 4) Funcionamiento del acuífero Jurásico bajo una hipótesis de bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año (145 l/s continuos a lo largo del año).

Esta hipótesis de gestión tiene por objeto reproducir el comportamiento que tendría el acuífero para una explotación continuada de 145 l/s (4,5 hm<sup>3</sup>/año), que es el volumen de agua que se baraja como necesario para satisfacer la demanda de abastecimiento a la mancomunidad del río Oja en los próximos años según la Dirección General de Calidad Ambiental y Agua del Gobierno de La Rioja.

- 5) Funcionamiento del acuífero Jurásico bajo una hipótesis de bombeo de 2,6 hm<sup>3</sup>/año (200 l/s distribuido a lo largo de 5 meses).

El objetivo de esta simulación es plantear una alternativa más racional y coherente de gestión de los recursos hídricos mediante la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas. Así, en los meses de invierno y primavera la demanda se satisfaría a partir de recursos superficiales captados directamente en el río Oja, bien mediante un azud que derive agua desde su cauce o bien mediante la construcción de zanjas subterráneas transversales o perpendiculares al lecho del río. En los meses de verano y principio del otoño la demanda de agua se solventaría mediante bombeo en diferentes sondeos perforados en el acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo. La explotación propuesta



precisaría de un caudal continuo de bombeo de agua de 200 l/s que solo tendría lugar durante 5 meses.

Dado que el bombeo que se propone realizar es relativamente intenso y concentrado en el tiempo, ya que, como se ha comentado, se limita a cinco meses, se precisará hacer uso de la técnica que se denomina utilización esporádica de reservas, que consiste en bombear durante los años secos un volumen de agua superior a la recarga natural y en los húmedos uno inferior. Esta forma de actuar tiene como objetivo compensar el déficit que se produce en los años secos con el superávit que tiene lugar en los húmedos, por lo que el balance hídrico entre la recarga y los bombeos, al final de un ciclo hiperanual suficientemente largo y representativo de todas las tipologías climáticas que pueden tener lugar, siempre sea positivo en mayor o en menor medida. La misma filosofía se puede aplicar dentro de un mismo año hidrológico a los meses lluviosos y secos.

La anterior forma de actuar, dependiendo de la mayor o menor inercia que tenga el acuífero, puede dar lugar, durante un cierto tiempo, al secado de alguna o todas las descargas de agua subterránea, que de forma difusa o puntual alimentan a la red fluvial, por lo que debe preverse alguna forma de paliación o compensación de las posibles consecuencias que se pudieran derivar. Esta se puede llevar a efecto vertiendo una parte del caudal bombeado en los cauces que potencialmente pudieran verse afectados durante el tiempo que dure el evento de afección.

En relación con lo expuesto es importante no confundir sobreexplotación y uso esporádico de reservas, ya que la diferencia entre ambos conceptos es sustancial, puesto que el primero no asegura a largo plazo ni el aprovechamiento ni la sostenibilidad del recurso hídrico, mientras que el segundo sí lo hace.

6) Funcionamiento del acuífero Jurásico bajo una hipótesis de bombeo de 3,2 hm<sup>3</sup>/año (250 l/s distribuido a lo largo de 5 meses).

Esta hipótesis plantea el mismo esquema de gestión que la anterior, pero introduciendo algunas pequeñas modificaciones. Así, la cuantía de agua a bombear sería variable para cada uno de los 5 meses en que se explotaría el acuífero. El bombeo se iniciaría en el mes de julio y se finalizaría a finales de noviembre. Este cambio se debe a que se piensa que este régimen de bombeo se adaptaría mejor a la demanda que es preciso satisfacer con agua subterránea, ya que por el cauce del río Oja suele circular agua hasta bien entrado el mes de julio.

### **16.7. Simulación del funcionamiento del acuífero jurásico en régimen natural.**

En la figura 16.7-1 se muestra el balance hídrico en régimen natural entre entradas (recarga por precipitación) y salidas (descarga a la red hidrográfica) para el periodo analizado (octubre 1985 a septiembre 2017) con indicación de la variación que tiene lugar en el almacenamiento. Dicha variación ha resultado ser para la serie de 32

años analizada de 162 m<sup>3</sup>/mes o 1.943 m<sup>3</sup>/año a favor de la recarga al acuífero. Dichas cuantías representan un error en el cierre del balance hídrico para el periodo analizado de 0,037 por ciento.

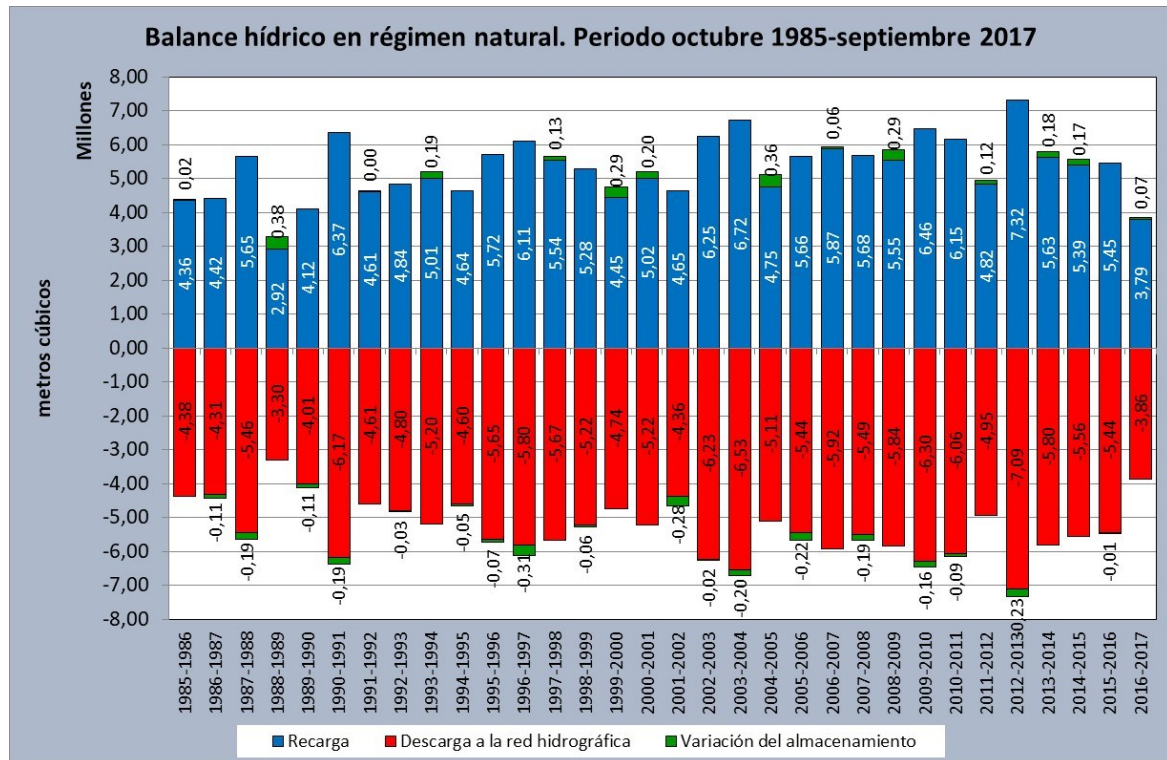


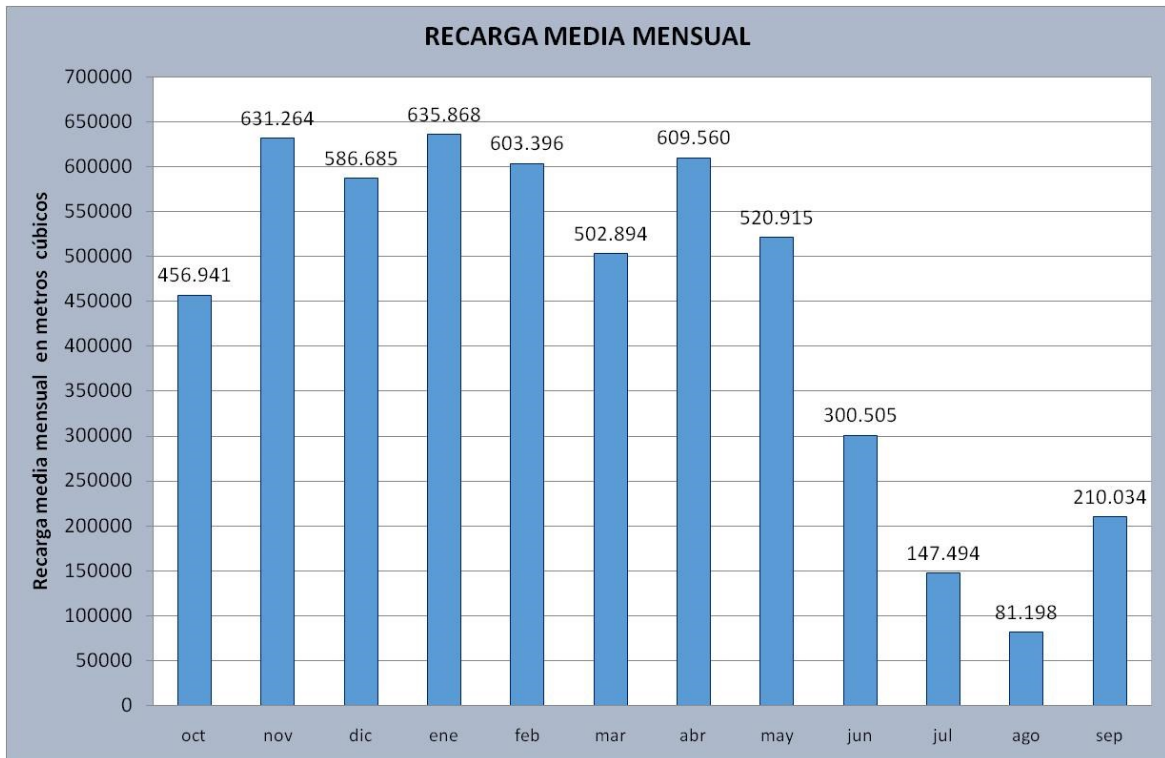
Figura 16.7-1. Balance hídrico en régimen natural para el periodo octubre 1985 a septiembre 2017 con representación de la variación que tiene lugar en el almacenamiento.

Los resultados de la simulación realizada en régimen natural para el periodo de tiempo comprendido entre octubre de 1985-septiembre de 2017 se muestran en los anexos 16.7-1a y 16.7-1b para el valor de la recarga mensual y anual, en los anexos 16.7-2a y 16.7-2b para la descarga mensual y anual, y en los anexos 16.7-3a y 16.7-3b para la distribución mensual y promedio anual del volumen almacenado por encima de la cota de desagüe.

El valor medio de la recarga natural al acuífero para el periodo octubre de 1985 a septiembre de 2017 se ha cuantificado en 5,29 hm<sup>3</sup>/año. Dicha cuantía es superior en cuatro centésimas de hectómetro cúbico al valor que se suministra en el apartado 16.3.1, que es de 5,25 hm<sup>3</sup>/año, por lo que cabe admitir que el nuevo valor medio de la recarga natural, tras establecer el periodo de validez del modelo en 32 años hidrológicos (octubre 1985-septiembre 2017), no implica una modificación sustancial respecto del anterior valor de la recarga. El incremento que se detecta en el nuevo valor medio de la recarga es fruto de que tres de los cinco años, que han sido preciso eliminar para alcanzar el periodo de estabilización del modelo, eran de tipología seca, mientras que los otros dos eran de tipología media y húmeda.

En la figura 16.7-2 se muestra la distribución mensual media de la recarga al acuífero en régimen natural para el periodo de validez del modelo. Si se comparan los valores medios correspondientes a dicho periodo con los mostrados en la figura

16.3.1-3, elaborada a partir del periodo octubre 1980-septiembre de 2017, se observa que las variaciones entre una y otra, a escala mensual, son poco significativas, pues en el caso más desfavorable, que corresponde al mes de septiembre, es tan solo del siete por ciento. En los meses de noviembre, enero, febrero, marzo, abril, junio, julio y septiembre la variación experimentada se decanta a favor de la recarga calculada a partir de la serie que define el periodo de validez del modelo (Figura 16.7-3). En los cuatro meses restantes (octubre, diciembre, mayo y agosto) ocurre lo contrario.

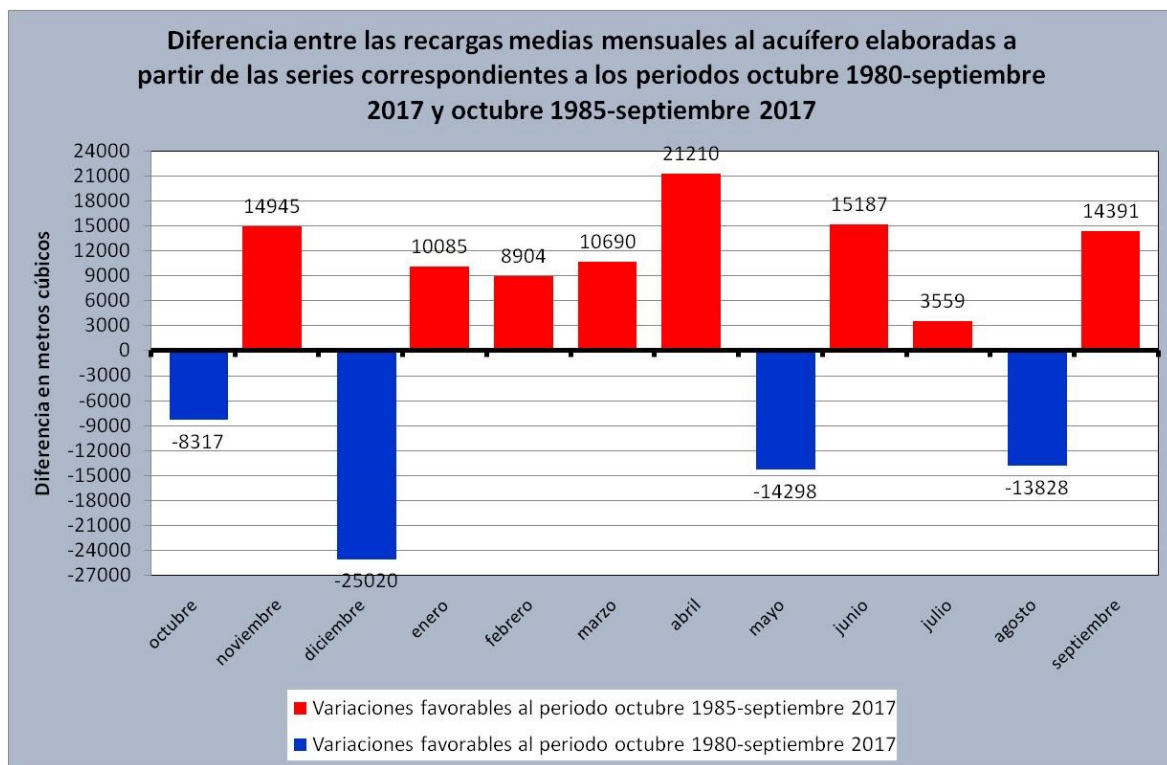


**Figura 16.7-2. Distribución mensual media de la recarga natural. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

La respuesta del acuífero para la evolución piezométrica (piezómetro 2111-3-0068) ante la serie de recarga natural de 32 años correspondiente al periodo octubre de 1985-septiembre de 2017 se muestra gráficamente en la figura 16.7-4.

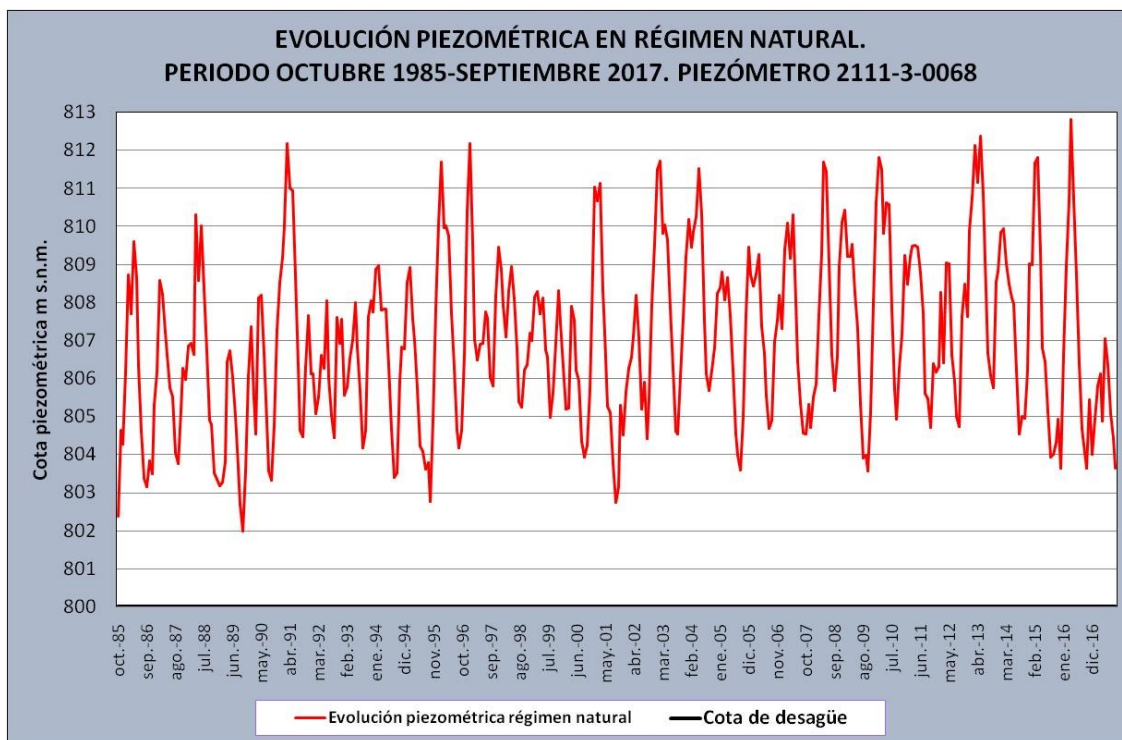
La piezometría media para el periodo de 32 años que se ha analizado es según el modelo realizado de 807 m s.n.m., por lo que el nivel freático medio en el piezómetro 2111-3-0068 se sitúa a 7 m por encima de la cota de desagüe del acuífero.

Para el ciclo seco comprendido entre octubre de 1985 y septiembre de 1995 la piezometría media en el piezómetro 2111-3-0068 es de 806,21 m s.n.m.; para el ciclo húmedo que abarca desde octubre de 2002 a septiembre 2016 de 807,74 m s.n.m y para el ciclo de tipo medio acaecido entre octubre de 1995 y septiembre de 2002 de 806,90 m s.n.m. La diferencia entre las cotas piezométricas medias correspondientes a los ciclos seco y húmedo anteriormente mencionados es de 1,53 m. Dicha altura en volumen de agua almacenado en el acuífero representa tan solo 0,31 hm<sup>3</sup>, por lo que la variación volumétrica media entre los dos ciclos climáticos extremos es relativamente reducida.

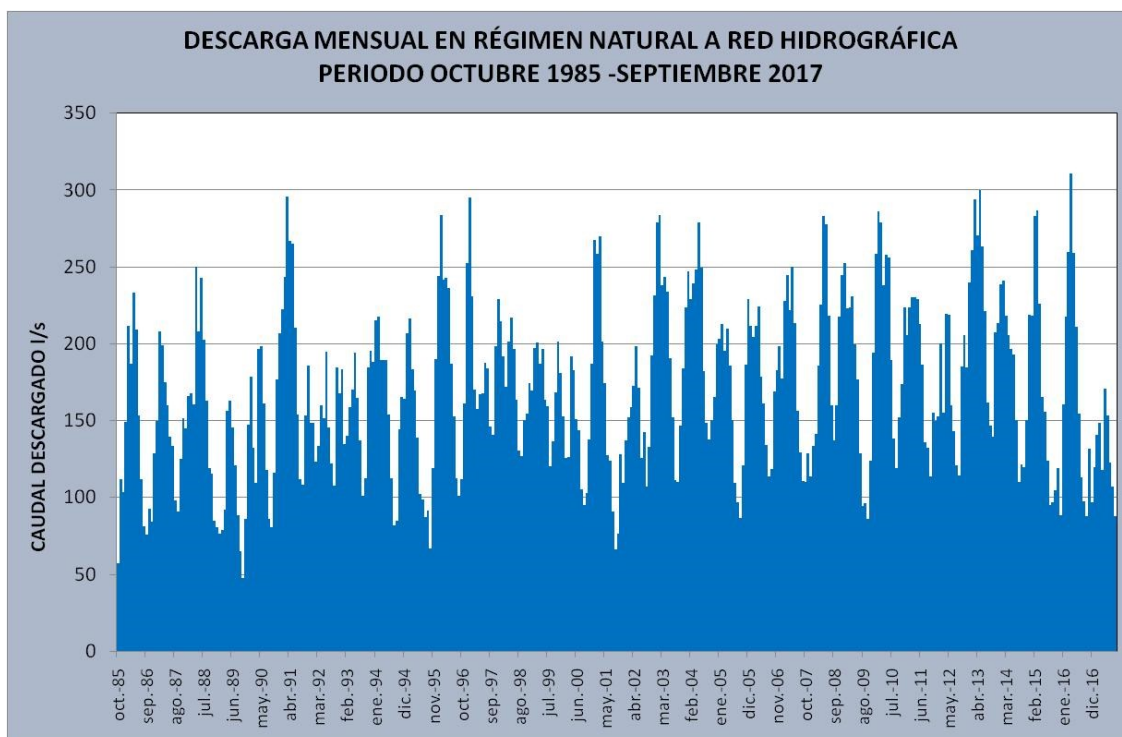


**Figura 16.7-3. Diferencia entre las recargas mensuales medias elaboradas a partir de las series correspondientes a los periodos octubre 1980-septiembre 2017 y octubre 1985-septiembre 2017.**

La cota piezométrica mínima (801,99 m s.n.m.) se registró de acuerdo a la simulación realizada en octubre de 1989. Dicho año fue, con 480 mm de pluviometría, el año más seco de toda la serie histórica analizada. La cota piezométrica más elevada (812,81 m s.n.m) se registró en abril de 2016, que fue un año de tipología climática media, pero al que precedió un ciclo húmedo de 10 años de duración. La diferencia de cota piezométrica entre ambas situaciones es de 10,82 m, lo que traducido en volumen de agua almacenada en el acuífero representa una cantidad de 2,16 hm<sup>3</sup>, que pone de manifiesto que existe una gran variación volumétrica entre las dos situaciones piezométricas extremas.



**Figura 16.7-4. Evolución piezométrica en régimen natural del acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**



**Figura 16.7-5. Descarga mensual a la red hidrográfica superficial en régimen natural. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

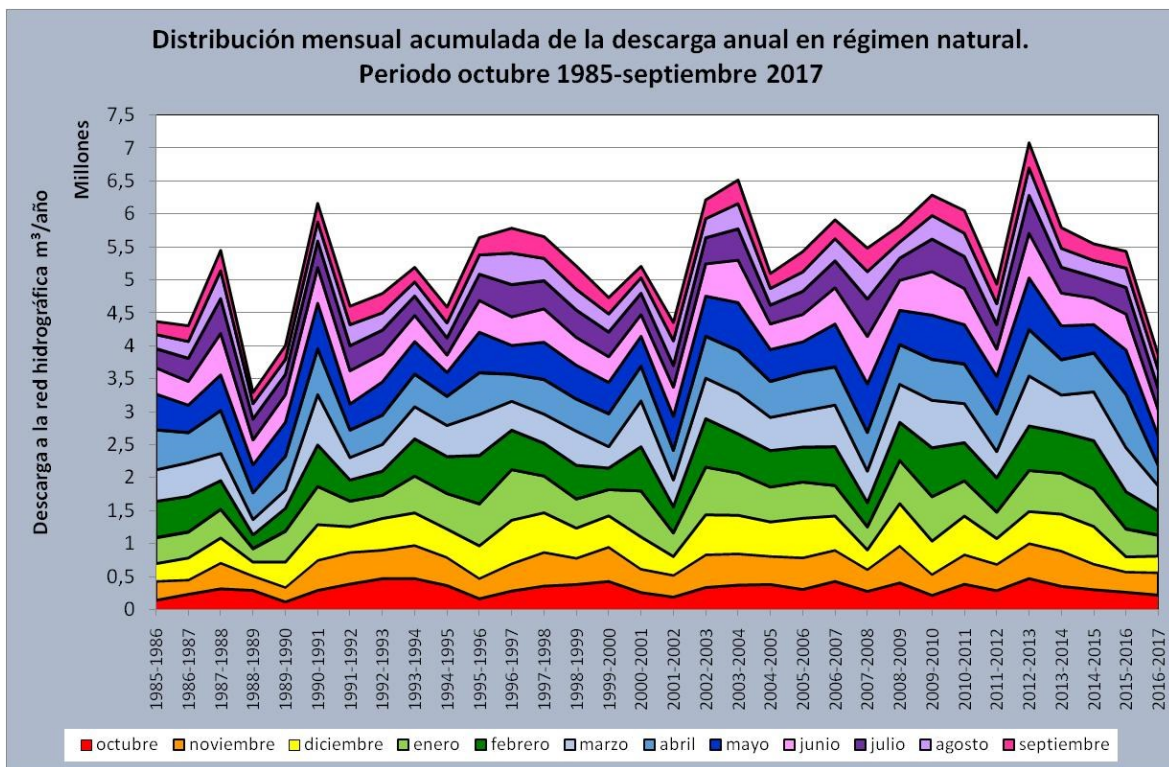
En la figura 16.7-5 se muestra la distribución mensual del caudal de agua cedido por el acuífero a la red hidrográfica según la modelación realizada para el periodo octubre de 1985-septiembre de 2017. El caudal medio mensual descargado para el periodo de 32 años analizado es de 170 l/s. Para el ciclo seco comprendido entre



octubre de 1985 y septiembre de 1995 de 150 l/s; para el ciclo húmedo que abarcó desde octubre de 2002 a septiembre 2016 de 188 l/s y para el ciclo de tipo medio acaecido entre octubre de 1995 y septiembre de 2002 de 168 l/s.

La diferencia entre los caudales medios mensuales descargados a la red hidrográfica en los ciclos seco y húmedo es tan solo 38 l/s, por lo que el sistema no parece ser excesivamente sensible a largo plazo a las variaciones de precipitación que se producen durante los grandes ciclos climáticos, aunque sí parece susceptible a las variaciones interanuales e intermensuales, como se deduce de la observación de la figura 16.7-6 que muestra la distribución mensual acumulada de la descarga anual en régimen natural.

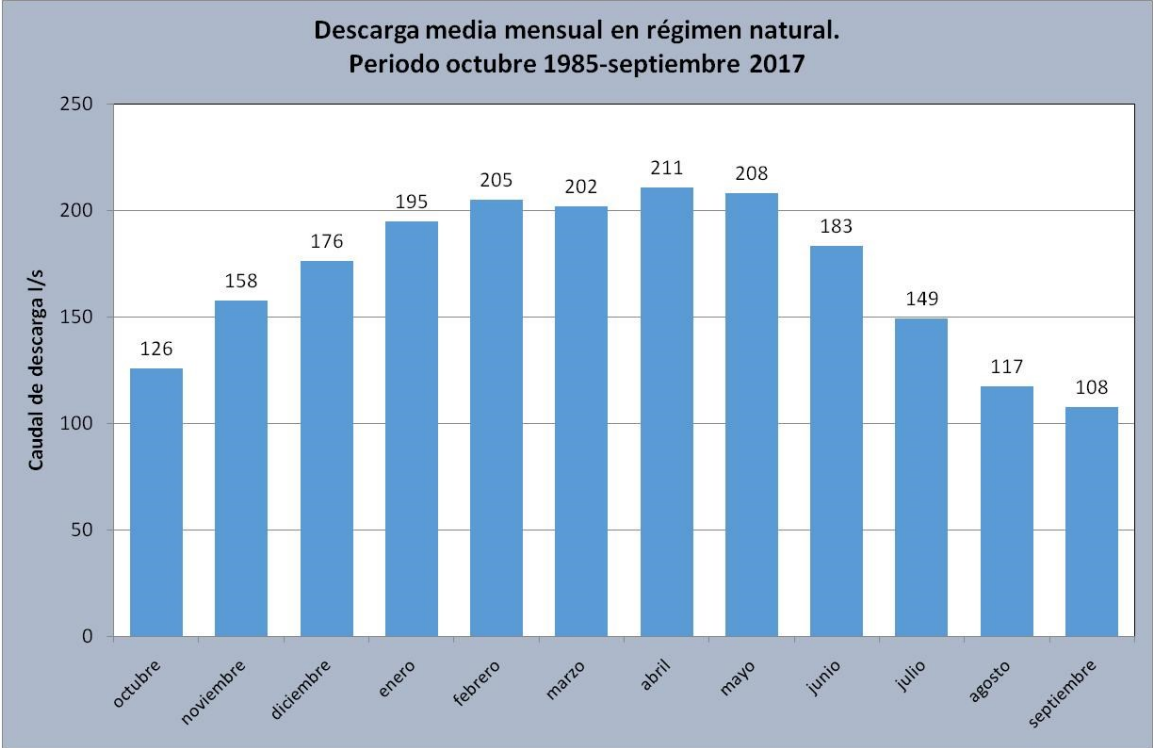
El mínimo caudal que se ha descargado a la red hidrográfica superficial a lo largo de todo el periodo analizado ha sido de 48 l/s y tuvo lugar en octubre de 1989. El mayor acaeció en abril de 2016 y fue de 311 l/s. Ambas fechas coinciden, como era de esperar, con las correspondientes a la mínima y máxima piezometría que se ha registrado a lo largo de la simulación realizada. La diferencia de caudal existente entre ambas fechas es de 263 l/s. Dicha cantidad pone de manifiesto las importantes variaciones interanuales e intermensuales que se presentan en la descarga a la red hidrográfica superficial a lo largo de la simulación que se ha efectuado, como ya se ha precisado anteriormente.



**Figura 16.7-6. Distribución mensual acumulada de la descarga anual en régimen natural. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

La figura 16.7-7 muestra la distribución de la descarga media mensual en régimen natural. Las mayores descargas acontecen entre los meses de diciembre y junio con un caudal medio de 197 l/s, mientras que en los meses de verano (julio, agosto y septiembre) el caudal medio es de 125 l/s. El mes en que se descarga un menor caudal medio es septiembre con 108 l/s. La cuantía de dicha descarga es de

aproximadamente la mitad de la que tiene lugar en el mes de abril (211 l/s). En los meses de otoño (octubre, noviembre y diciembre) el caudal medio que se drena a la red fluvial es de 142 l/s.



**Figura 16.6-7. Descarga mensual media en régimen natural. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

De acuerdo a la clasificación climática establecida en el apartado 6 del presente documento y a los datos que figuran en las tablas 16.7-1 y 16.7-2 se ha determinado que la descarga media anual que tiene lugar en los años de tipología climática muy seca es de 137 l/s con un intervalo de variación comprendido entre 106 l/s y 164 l/s; en los años de tipología climática seca de 143 l/s de media y un intervalo de variación comprendido entre 124 l/s y 167 l/s; en los años de tipología climática media de 173 l/s y un intervalo de variación comprendido entre 148 l/s y 198 l/s; en los años de tipología climática húmeda de 192 l/s y un intervalo de variación comprendido entre 186 l/s y 210 l/s; y por último en los años de tipología climática muy húmeda de 195 l/s con un intervalo de variación comprendido entre 175 l/s y 228 l/s. En la tabla 16.7-3 se sintetizan los caudales anteriormente especificados al objeto de facilitar una mejor comprensión global de los datos expuestos.

**Tabla 16.7-1. Balance hídrico en régimen natural. Datos agrupados según tipologías climáticas. Periodo de estudio octubre de 1985-septiembre de 2017.**

| Tipología climática | Año hidrológico | Recarga natural m <sup>3</sup> /año | Descarga natural m <sup>3</sup> /año | Volumen almacenado por encima de la cota de desagüe m <sup>3</sup> /año |
|---------------------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|
| Muy seco            | 1985-1986       | 4.356.913                           | 4.377.297                            | 1.158.015   |
| Muy seco            | 1986-1987       | 4.418.517                           | 4.312.299                            | 1.140.820   |
| Muy seco            | 1988-1989       | 2.923.434                           | 3.299.753                            | 872.951   |
| Muy seco            | 2004-2005       | 4.749.156                           | 5.106.607                            | 1.350.954   |
| Seco                | 1989-1990       | 4.118.175                           | 4.009.476                            | 1.060.708   |
| Seco                | 1993-1994       | 5.008.678                           | 5.200.777                            | 1.375.867   |
| Seco                | 1994-1995       | 4.641.218                           | 4.595.320                            | 1.215.693   |
| Seco                | 1999-2000       | 4.451.210                           | 4.740.265                            | 1.254.038   |
| Seco                | 2001-2002       | 4.646.662                           | 4.362.852                            | 1.154.194   |
| Seco                | 2016-2017       | 3.791.986                           | 3.861.002                            | 1.021.429   |
| Medio               | 1987-1988       | 5.651.279                           | 5.457.633                            | 1.443.818   |
| Medio               | 1990-1991       | 6.365.145                           | 6.172.825                            | 1.633.022   |
| Medio               | 1991-1992       | 4.607.116                           | 4.609.658                            | 1.219.486   |
| Medio               | 1992-1993       | 4.835.257                           | 4.802.458                            | 1.270.491   |
| Medio               | 1995-1996       | 5.719.847                           | 5.652.319                            | 1.495.322   |
| Medio               | 1997-1998       | 5.535.385                           | 5.667.109                            | 1.499.235   |
| Medio               | 1998-1999       | 5.283.790                           | 5.219.639                            | 1.380.857   |
| Medio               | 2000-2001       | 5.016.903                           | 5.216.586                            | 1.380.049   |
| Medio               | 2008-2009       | 5.548.801                           | 5.837.130                            | 1.544.214   |
| Medio               | 2011-2012       | 4.823.363                           | 4.945.993                            | 1.308.464   |
| Medio               | 2015-2016       | 5.449.379                           | 5.443.445                            | 1.440.065   |
| Húmedo              | 1996-1997       | 6.109.150                           | 5.795.801                            | 1.647.098   |
| Húmedo              | 2002-2003       | 6.245.870                           | 6.226.032                            | 1.727.018   |
| Húmedo              | 2003-2004       | 6.724.540                           | 6.528.128                            | 1.533.281   |
| Húmedo              | 2013-2014       | 5.625.062                           | 5.804.454                            | 1.535.570   |
| Húmedo              | 2014-2015       | 5.386.240                           | 5.557.427                            | 1.470.219   |
| Muy Húmedo          | 2005-2006       | 5.663.140                           | 5.439.724                            | 1.439.080   |
| Muy Húmedo          | 2006-2007       | 5.865.841                           | 5.923.203                            | 1.566.985   |
| Muy Húmedo          | 2007-2008       | 5.680.869                           | 5.492.903                            | 1.453.149   |
| Muy Húmedo          | 2009-2010       | 6.460.587                           | 6.298.718                            | 1.666.328   |
| Muy Húmedo          | 2010-2011       | 6.151.933                           | 6.062.900                            | 1.603.942   |
| Muy Húmedo          | 2012-2013       | 7.320.636                           | 7.094.185                            | 1.876.769   |
| Promedio            |                 | 5.286.753                           | 5.284.810                            | 1.398.098   |

En cuanto a los volúmenes almacenados por encima de la cota de desagüe cabe indicar que la diferencia que existe entre los valores correspondientes a los ciclos de tipo muy seco y muy húmedo, que es ligeramente inferior a 500.000 m<sup>3</sup>, resulta poco significativa dentro del contexto global que representan los valores medio anuales de la recarga y la descarga natural que tienen lugar en el acuífero. No ocurre lo mismo a escala de los valores medio de dichas variables, pues el volumen

medio almacenado por encima de la cota de desagüe representa el 26 por ciento de la recarga o descarga media que tiene lugar en el acuífero en régimen natural. El valor absoluto de dicho volumen es de 1.398.098 m<sup>3</sup>.

**Tabla 16.7-2. Balance hídrico en régimen natural según tipologías climáticas. Periodo de estudio octubre de 1985-septiembre de 2017.**

| Tipología climática | Recarga natural<br>m <sup>3</sup> /año | Descarga natural<br>m <sup>3</sup> /año | Volumen almacenado<br>por encima<br>de la cota de desagüe<br>m <sup>3</sup> /año |
|---------------------|--|---|--|
| Muy seco            | 4.112.005                              | 4.273.989                               | 1.130.685  |
| Seco                | 4.442.988                              | 4.461.615                               | 1.180.322  |
| Medio               | 5.348.751                              | 5.365.890                               | 1.419.548  |
| Húmedo              | 6.018.172                              | 5.982.368                               | 1.582.637  |
| Muy Húmedo          | 6.190.501                              | 6.051.939                               | 1.601.042  |

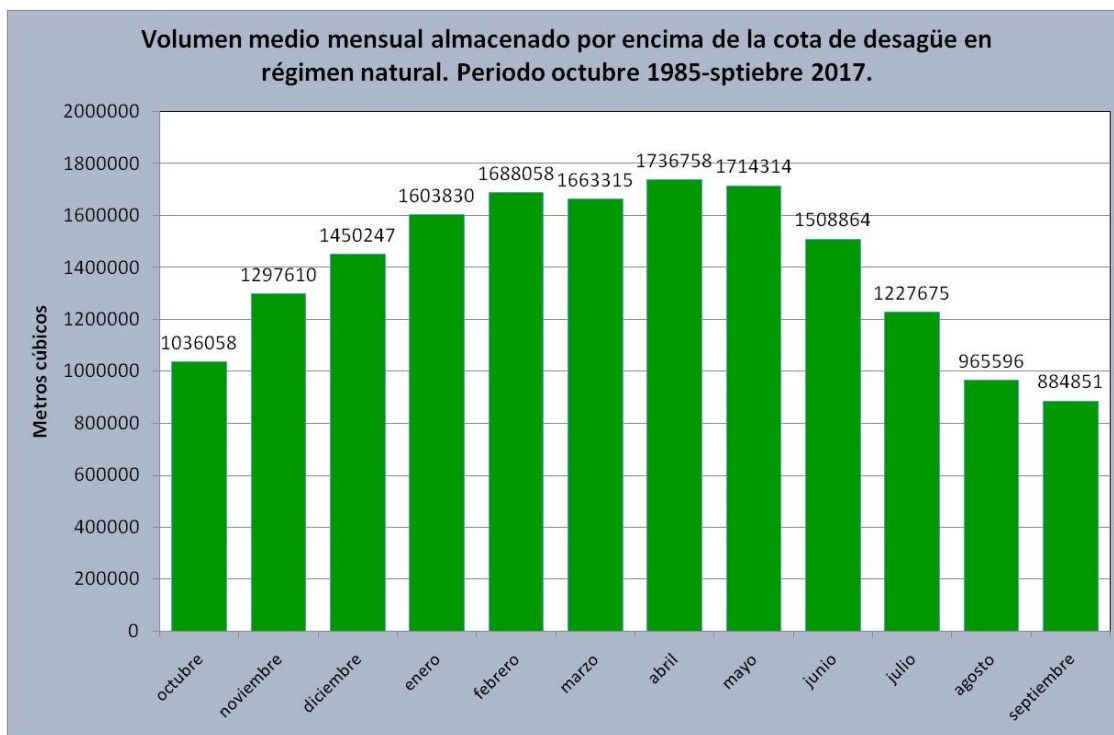
**Tabla 16.6-2. Descarga media anual en régimen natural según tipología climática. Periodo de estudio octubre de 1985-septiembre de 2017.**

| Tipología climática | Descarga media anual en<br>régimen natural<br>l/s | Intervalo de la descarga l/s |
|---------------------|---|------------------------------|
| Muy seco            | 137   | 106-164                      |
| Seco                | 143   | 124-167                      |
| Medio               | 173   | 148-198                      |
| Húmedo              | 192   | 186-210                      |
| Muy Húmedo          | 195   | 175-228                      |

En la figura 16.7-8 se muestra la distribución del volumen mensual medio almacenado por encima de la cota de desagüe del acuífero. En la misma se puede observar que el mes con un mayor volumen medio almacenado es abril con 1,74 hm<sup>3</sup>, mientras que la menor cuantía corresponde al mes de septiembre con 0,89 hm<sup>3</sup>. El volumen medio que se almacena en el acuífero por encima de la cota de desagüe entre los meses de enero y junio es de 1,65 hm<sup>3</sup>. En agosto, septiembre y octubre dicho volumen solo alcanza 0,96 hm<sup>3</sup>.

Por lo que respecta a valores puntuales, el máximo con 2.558.823 m<sup>3</sup> se registró en abril de 2016 y el mínimo con 396.815 m<sup>3</sup> en octubre de 1989. La diferencia en la cuantía de dichas cantidades pone de manifiesto las importantes variaciones interanuales e intermensuales que se presentan a lo largo de la simulación en lo que respecta al volumen almacenado por encima de la cota de desagüe.

El adecuado manejo de estos volúmenes, unido en determinados momentos al que existe por debajo de la cota de desagüe, constituye la clave para lograr una adecuada gestión sostenible de los recursos hídricos del acuífero. Es importante significar que se trata de un acuífero con importantes variaciones interanuales e intermensuales, tanto en el volumen de agua que se descarga como en el que se almacena. Dicha irregularidad temporal, que se encuentra ligada a las especiales características hidrodinámicas que presenta el acuífero, dificulta enormemente la gestión del mismo dentro de un marco de sostenibilidad, aunque esto no imposibilita adecuar la recarga natural que tiene lugar en el acuífero a un determinado valor de la demanda con un índice de garantía total.



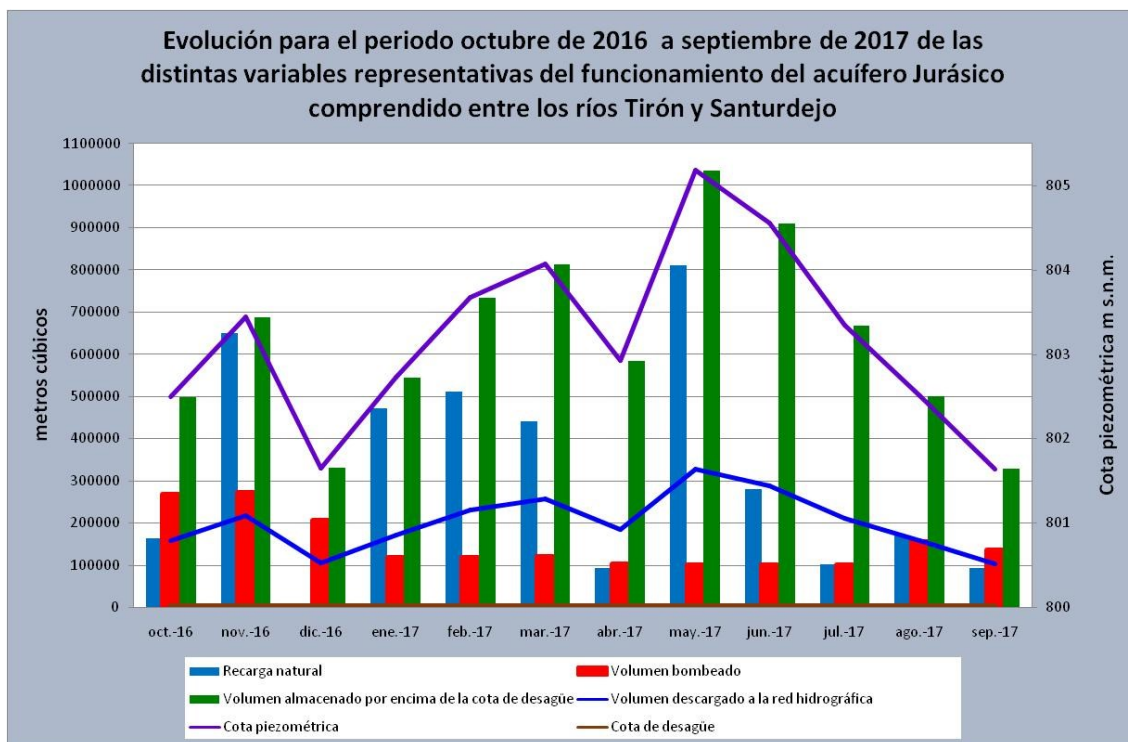
**Figura 16.7-8. Volumen mensual medio almacenado por encima de la cota de desagüe en régimen natural. Periodo octubre de 1985-octubre de 2017.**

### **16.8. Simulación del funcionamiento del acuífero jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo bajo el efecto de los bombeos acaecidos en el pozo San Torcuato durante el periodo octubre de 2016 a septiembre de 2017.**

A partir de los datos proporcionados por la serie de recarga natural correspondiente al periodo octubre 2016-septiembre 2017 (anexos 16.3.1-1 y 16.3.1-2) y de los bombeos registrados en el pozo San Torcuato durante dicho periodo (apartado 15.2) se ha simulado el funcionamiento del acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo. Los resultados obtenidos se sintetizan en la figura 16.8-1 y en la tabla 16.8-1.

La recarga natural en el periodo analizado fue de 3,79 millones de metros cúbicos, los bombeos de 1,80 millones de metros cúbicos, la descarga a la red hidrográfica superficial de 2,40 millones de metros cúbicos, el volumen medio almacenado en el acuífero por encima de la cota de desagüe de 0,64 millones de metros cúbicos y el volumen medio almacenado en el acuífero por encima de la cota de desagüe al final del periodo de simulación (septiembre de 2017) de 0,33 millones de metros cúbicos. La diferencia de 0,41 millones de metros cúbicos existentes entre las entradas y las salidas de agua al acuífero fue compensada enteramente, como se puede apreciar en la figura 16.8-1, por el agua que se almacena por encima de la cota de desagüe del acuífero.





**Figura 16.8-1 Evolución para el periodo octubre de 2016-septiembre de 2017 de las distintas variables representativas del funcionamiento del acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo bajo el efecto de un bombeo medio de 58 l/s.**

Para el mismo periodo de tiempo, pero bajo la influencia de un régimen de funcionamiento de tipo natural (Tabla 16.8-2), la descarga a la red hidrográfica superficial fue de 3,86 millones de metros cúbicos, el volumen medio almacenado en el acuífero por encima de la cota de desagüe de 1,02 millones de metros cúbicos y el volumen medio almacenado en el acuífero por encima de la cota de desagüe al final del periodo de simulación (septiembre de 2017) de 0,73 millones de metros cúbicos.

El nivel piezométrico medio, bajo la influencia de una explotación media de 58 l/s continuos durante todo el periodo simulado, se situó a 803,19 m s.n.m. por lo que la lámina de agua se localizó a 3,19 m por encima de la cota de desagüe, mientras que en régimen natural la cota fue de 805,25 m s.n.m. y la altura de la lámina de agua de 5.25 m.

El volumen medio de agua descargado a la red hidrográfica bajo la influencia de los bombeos se cuantificó en 77 l/s y en régimen natural en 124 l/s, por lo que la afección que se produjo fue de tan solo 47 l/s.

Por lo que respecta al volumen medio almacenado por encima de la cota de desagüe este se estimó 1.021.429 m<sup>3</sup> en régimen natural y en 636.109 m<sup>3</sup> bajo la influencia de los bombeos. La diferencia de agua embalsada en el acuífero entre una y otra situación fue por tanto de 385.320 m<sup>3</sup>.

Al final del periodo de simulación el volumen residual embalsado en el acuífero se cuantificaba en 725.506 m<sup>3</sup> bajo la hipótesis de un funcionamiento en régimen natural y en 327.489 m<sup>3</sup> cuando se realizaba un bombeo continuado de caudal

medio de 58 l/s. En la tabla 16.8-3 se realiza una síntesis comparativa de los resultados anteriormente expuestos.

**Tabla 16.8-1. Funcionamiento del acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo. Periodo octubre 2016-septiembre de 2017. Bombeo medio 58 l/s.**

| Periodo Simulado            | Entradas al acuífero                  | Salidas del acuífero         |                                |     | Volumen almacenado por encima de la cota de desagüe (m <sup>3</sup> ) | Cota piezométrica ms.n.m. |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----|---|---------------------------|
|                             | Recarga Natural (m <sup>3</sup> /mes) | Bombeo (m <sup>3</sup> /mes) | Descarga a la red hidrográfica |     |   |                           |
|                             |                                       |                              | (m <sup>3</sup> /mes)          | l/s |   |                           |
| octubre 2016                | 162.340                               | 267.591                      | 156.991                        | 61  | 498.384   | 802,50                    |
| noviembre 2016              | 649.670                               | 271.785                      | 216.679                        | 84  | 687.870   | 803,44                    |
| diciembre 2016              | 5.342                                 | 206.038                      | 103.900                        | 40  | 329.840   | 801,65                    |
| enero 2017                  | 472.570                               | 117.683                      | 171.719                        | 66  | 545.140   | 802,73                    |
| febrero 2017                | 511.140                               | 118.972                      | 231.287                        | 89  | 734.244   | 803,68                    |
| marzo 2017                  | 441.600                               | 119.490                      | 255.828                        | 99  | 812.153   | 804,07                    |
| abril 2017                  | 92.662                                | 102.084                      | 184.155                        | 71  | 584.618   | 802,93                    |
| mayo 2017                   | 810.470                               | 100.290                      | 326.293                        | 126 | 1.035.850   | 805,19                    |
| junio 2017                  | 280.260                               | 99.769                       | 286.895                        | 111 | 910.779   | 804,56                    |
| julio 2017                  | 102.581                               | 99.380                       | 210.238                        | 81  | 667.422   | 803,34                    |
| agosto 2017                 | 170.270                               | 155.763                      | 157.349                        | 61  | 499.522   | 802,50                    |
| septiembre 2017             | 93.081                                | 136.280                      | 103.159                        | 40  | 327.489   | 801,64                    |
| Valor medio                 | 315.999                               | 149.594                      | 200.374                        | 77  | 636.109   | 803,19                    |
| TOTAL (m <sup>3</sup> /año) | 3.791.986                             | 1.795.125                    | 2.404.493                      |     |   |                           |

**Tabla 16.8-2. Funcionamiento en régimen natural del acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo. Periodo octubre 2016-septiembre de 2017.**

| Periodo Simulado            | Entradas al acuífero                  | Salidas del acuífero         |                                |     | Volumen almacenado por encima de la cota de desagüe (m <sup>3</sup> ) | Cota piezométrica ms.n.m. |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----|---|---------------------------|
|                             | Recarga Natural (m <sup>3</sup> /mes) | Bombeo (m <sup>3</sup> /mes) | Descarga a la red hidrográfica |     |   |                           |
|                             |                                       |                              | (m <sup>3</sup> /mes)          | l/s |   |                           |
| octubre 2016                | 162.340                               |                              | 229.297                        | 88  | 727.927   | 803,65                    |
| noviembre 2016              | 649.670                               |                              | 342.886                        | 132 | 1.088.529   | 805,45                    |
| diciembre 2016              | 5.342                                 |                              | 251.678                        | 97  | 798.978   | 804,00                    |
| enero 2017                  | 472.570                               |                              | 311.366                        | 120 | 988.462   | 804,95                    |
| febrero 2017                | 511.140                               |                              | 365.347                        | 141 | 1.159.831   | 805,81                    |
| marzo 2017                  | 441.600                               |                              | 385.951                        | 149 | 1.225.242   | 806,14                    |
| abril 2017                  | 92.662                                |                              | 306.701                        | 118 | 973.655   | 804,88                    |
| mayo 2017                   | 810.470                               |                              | 442.825                        | 171 | 1.405.794   | 807,04                    |
| junio 2017                  | 280.260                               |                              | 398.898                        | 154 | 1.266.344   | 806,34                    |
| julio 2017                  | 102.581                               |                              | 318.830                        | 123 | 1.012.159   | 805,07                    |
| agosto 2017                 | 170.270                               |                              | 278.687                        | 108 | 884.722   | 804,43                    |
| septiembre 2017             | 93.081                                |                              | 228.535                        | 88  | 725.506   | 803,63                    |
| Valor medio                 | 315.999                               |                              | 321.750                        | 124 | 1.021.429   | 805,25                    |
| TOTAL (m <sup>3</sup> /año) | 3.791.986                             |                              | 3.861.002                      |     |   |                           |

**Tabla 16.8-3. Síntesis comparativa entre la simulación realizada para el régimen natural y la correspondiente a un bombeo medio de 58 l/s para periodo comprendido entre octubre de 2016 y septiembre de 2017.**

| Régimen de funcionamiento | Recarga hm <sup>3</sup> /año | Bombeo hm <sup>3</sup> /año | Descarga a la red hidrográfica hm <sup>3</sup> /año | Volumen medio almacenado por encima de la cota de desagüe hm <sup>3</sup> | Volumen almacenado por encima de la cota de desagüe al final del periodo de simulación hm <sup>3</sup> |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|---|--|
| Natural                   | 3,79                         | 0,00                        | 3,86  | 1,02  | 0,73   |
| Bombeo 58 l/s             | 3,79                         | 1,80                        | 2,40  | 0,64  | 0,33   |

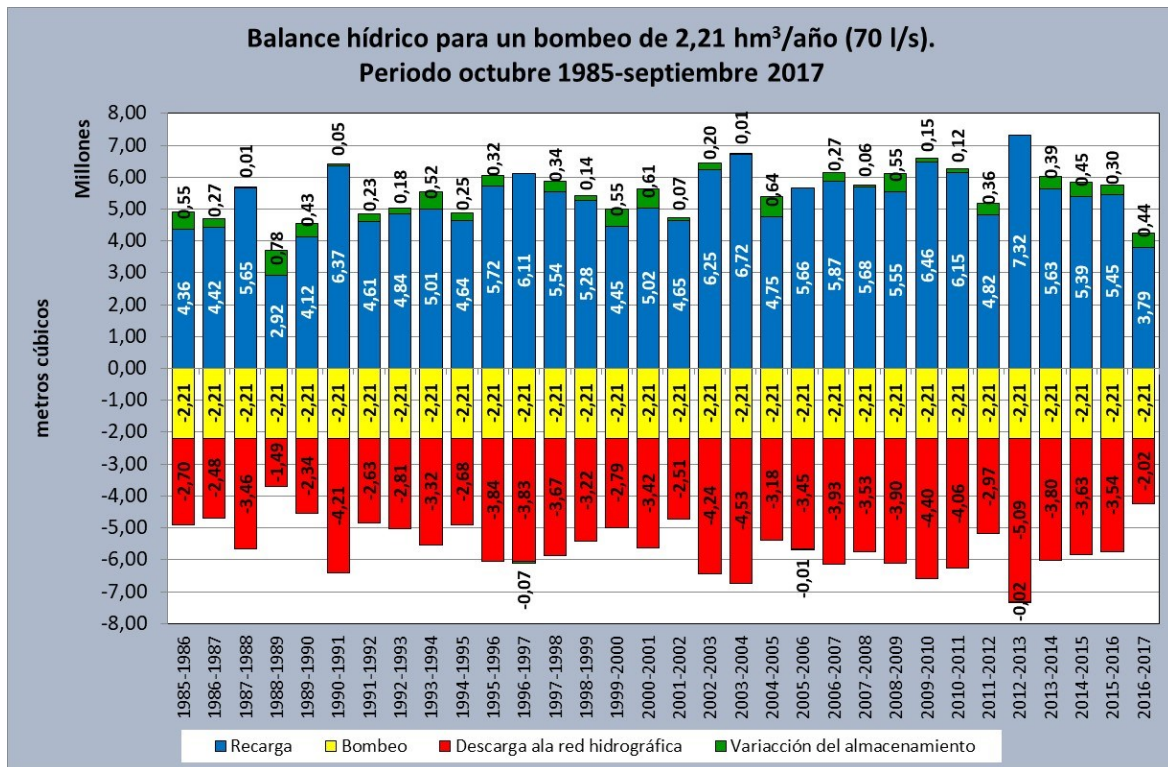
El aprovechamiento de los recursos del acuífero fue del 48 por ciento si el cálculo se realiza sobre la recarga natural que tuvo lugar en el periodo octubre de 2016 a septiembre de 2017, y del 34 por ciento, si dicho cálculo se efectúa respecto a la recarga media estimada para el periodo comprendido entre octubre de 1985 y septiembre de 2017 (apartado 16.7).

De los datos expuestos en la tabla 16.8-3 se desprende, que hasta la fecha, el grado de explotación al que se han sometido los recursos hídricos del acuífero, independientemente del valor de la recarga natural que se utilice, es reducido, ya que se encuentra por debajo de 0,5, por lo que cabe la posibilidad de plantear un aprovechamiento del acuífero que garantice y se adapte mejor a la demanda existente o prevista en la mancomunidad de abastecimiento del río Oja, por supuesto, siempre dentro de una gestión sostenible, como se planteará en posteriores apartados.

### **16.9. Simulación del funcionamiento del acuífero jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo bajo la hipótesis de un bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año (70 l/s continuos durante todo el año).**

Esta hipótesis de gestión reproduce el comportamiento que tendría el acuífero para una explotación continuada de 70 l/s y una recarga natural idéntica a la acaecida durante el periodo comprendido entre octubre de 1985 y septiembre de 2017 (anexos 16.7.1a y 16.7.1b). La simulación realizada responde al volumen concesional otorgado temporalmente por la Confederación Hidrográfica del Ebro como apoyo a la demanda de abastecimiento de la mancomunidad del río Oja.

En la figura 16.9-1 se muestra el balance hídrico para la simulación realizada entre entradas (recarga por precipitación) y salidas (bombeos y descarga a la red hidrográfica) para el periodo analizado (octubre 1985 a septiembre 2017) con indicación de la variación que tiene lugar en el almacenamiento, que ha resultado ser para la serie de 32 años analizada de 170 m<sup>3</sup>/mes o 2.041 m<sup>3</sup>/año a favor de las salidas (bombeos y descarga a la red fluvial), por lo que el error de cierre del balance hídrico para el periodo analizado es del 0,039 por ciento.



**Figura 16.9-1. Balance hídrico para el periodo octubre 1985 a septiembre 2017 con representación de la variación que tiene lugar en el almacenamiento considerando un bombeo continuo a lo largo del año de 70 l/s (2,21 hm<sup>3</sup>/año).**

La respuesta de las distintas variables representativas del funcionamiento del acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo bajo el efecto de un bombeo continuado de 70 l/s se muestra en las figuras 16.9-2, 16.9-3, y 16.9-4. En las mismas se puede apreciar que la descarga a la red hidrográfica solo ha sido nula en cinco ocasiones: octubre de 1985, 1989 y 1995, y en septiembre 1995 y 2001. Todos ellos fueron años secos o muy secos, salvo 1995 que fue de tipo medio, aunque estuvo precedido de un año seco. La piezometría a lo largo de la simulación realizada se situó generalmente por encima de la cota de desagüe, salvo en las fechas anteriormente referenciadas. La profundidad de la lámina de agua en dichos meses y años nunca llegó a sobrepasar el metro por debajo de la cota de desagüe del acuífero.

El Anexo 16.9-1 muestra los resultados obtenidos para la simulación realizada. Los valores medios para el periodo simulado son los siguientes: el nivel piezométrico medio se situó a 4,09 m por encima de la cota de desagüe. La cota piezométrica media se situó a 804,09 m s.n.m. La recarga mensual media fue de 440.562 m<sup>3</sup>/mes. El volumen mensual medio de agua descargado a la red hidrográfica de 256.773 m<sup>3</sup>/mes, lo que representa un caudal continuo de 99 l/s. El volumen mensual medio almacenado por encima de la cota de desagüe de 814.098 m<sup>3</sup>/mes y la recarga efectiva mensual y anual (recarga natural menos bombeo) de 256.603 m<sup>3</sup>/mes y 3.079.232 m<sup>3</sup>/año, por lo que el aprovechamiento de los recursos hídricos del acuífero se cifra en un 42 por ciento. Es menester hacer notar que el volumen mensual medio almacenado por encima de la cota de desagüe es aproximadamente el doble que la recarga mensual media, el triple que la descarga mensual media a la red hidrográfica y el cuádruple que el volumen mensual medio



bombeario, por lo que en base a dichas cifras es factible proponer un esquema de gesti3n que aproveche mejor las posibilidades h3dricas que presenta el acuífero.

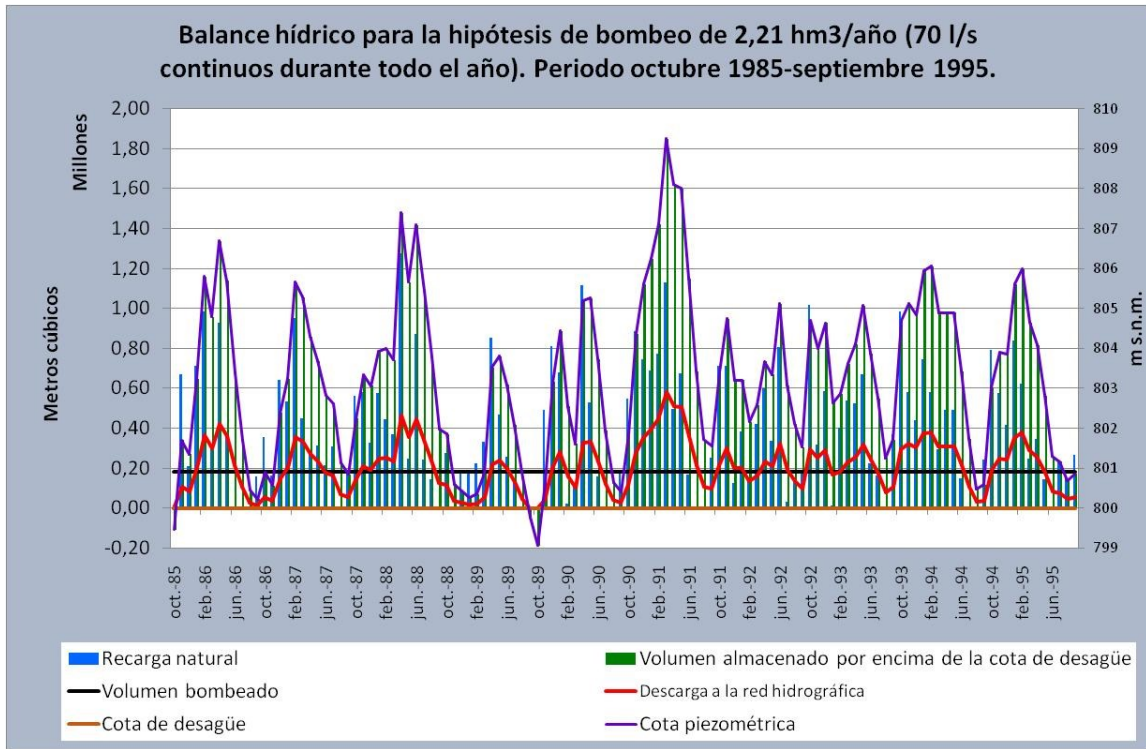


Figura 16.9-2. Evoluci3n de las variables representativas del funcionamiento del acuífero. Bombeo continuo de 70 l/s. Periodo octubre de 1985-septiembre de 1995.

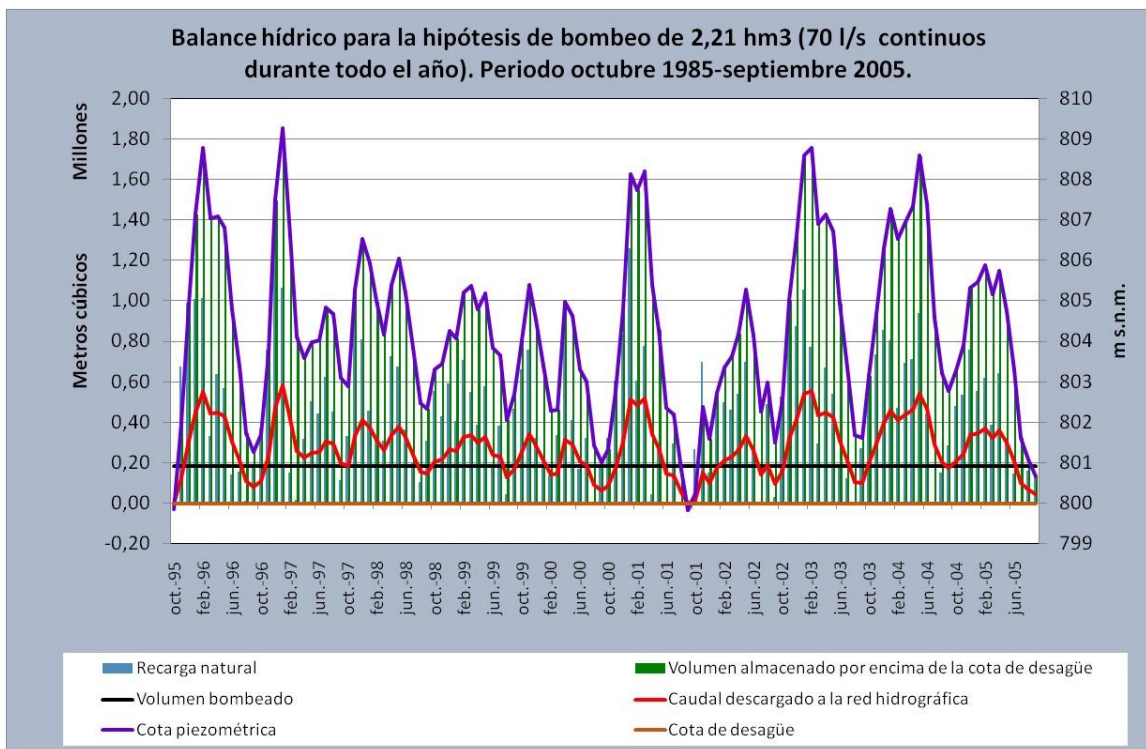
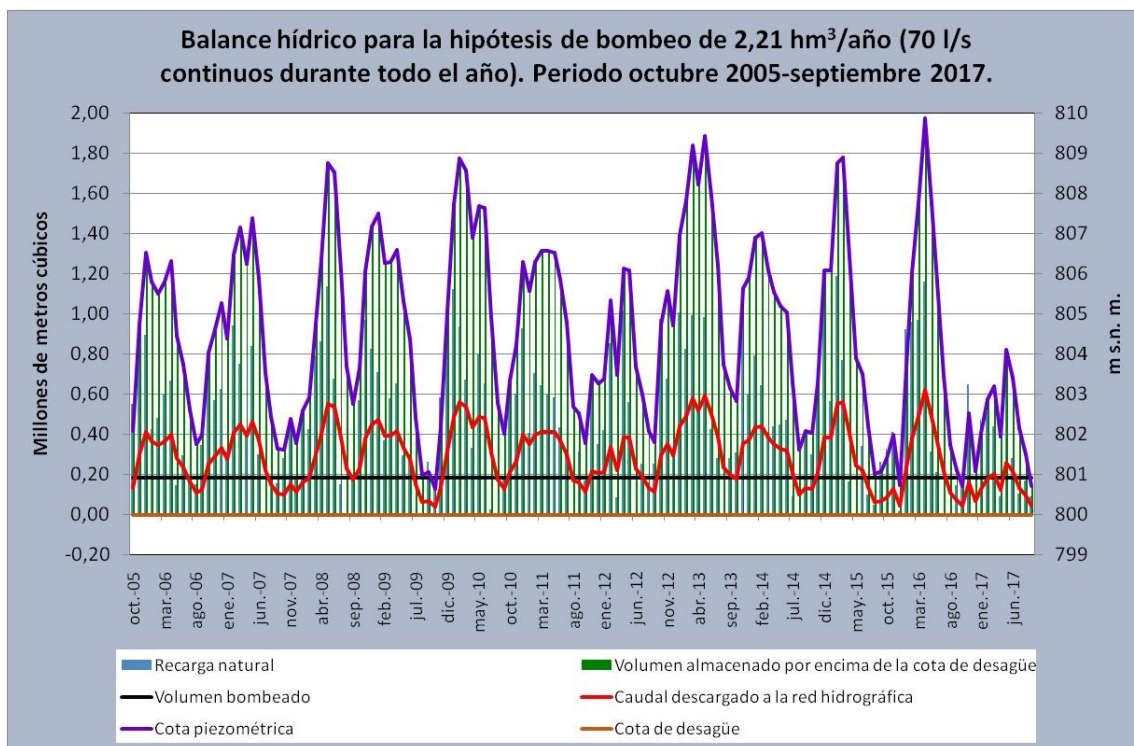


Figura 16.9-3. Evoluci3n de las variables representativas del funcionamiento del acuífero. Bombeo continuo de 70 l/s. Periodo octubre de 1995-septiembre de 2005.





**Figura 16.9-4. Evolución de las variables representativas del funcionamiento del acuífero. Bombeo continuo de 70 l/s. Periodo octubre de 2005-septiembre de 2017**

En la figura 16.9-5 se muestra gráficamente los valores mensuales medios de la descarga del acuífero a la red hidrográfica superficial bajo el efecto de un bombeo de 70 l/s (2,21 hm<sup>3</sup>/año). El caudal medio drenado por el acuífero en los meses de agosto, septiembre y octubre se reduce en un 61 por ciento respecto al descargado en régimen natural para los mismos meses del año, mientras que el decremento experimentado en los restantes meses del año es solo del 38 por ciento.

En la figura 16.9-6 se muestra el valor y la evolución del grado de afección que presenta la descarga mensual media para el periodo de estudio (octubre 1985-septiembre 2017), bajo la hipótesis de un bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año, respecto de la descarga mensual media en régimen natural. Su valor se ha calculado a partir de la siguiente expresión:

$$A_j = 1 - D_{Rij} / D_{RNj}$$

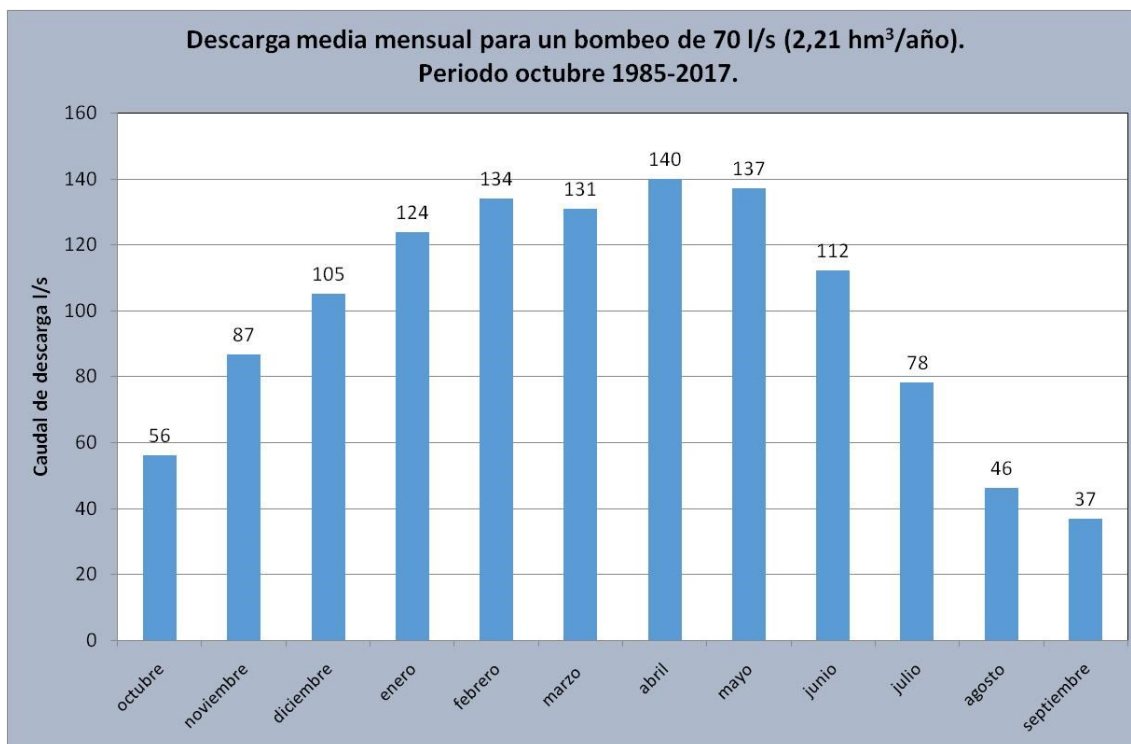
Donde:

$A_j$  es el grado de afección que presenta la descarga mensual media para el periodo de estudio en el mes  $j$  bajo una determinada hipótesis de bombeo.

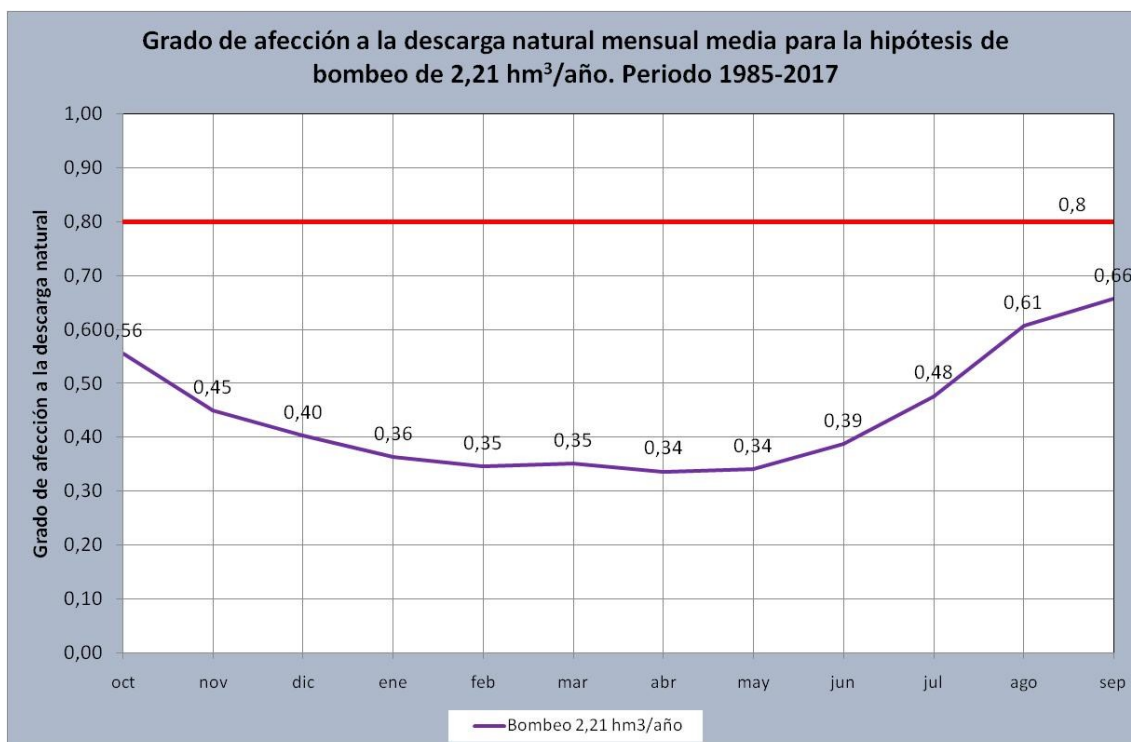
$D_{Rij}$  es el valor medio mensual de la descarga acaecida en régimen influenciado durante el periodo de estudio en el mes  $j$ .

y

$D_{RNj}$  el valor medio mensual de la descarga acaecida en régimen natural durante el periodo de estudio en el mes  $j$ .



**Figura 16.9-5. Descarga mensual media a la red hidrográfica para un bombeo de 70 l/s (2,21 hm<sup>3</sup>/año).**



**Figura 16.9-6. Grado de afección a la descarga natural mensual media para la hipótesis de bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

El grado de afección que se ha determinado para los distintos meses del año presenta valores inferiores o próximos a 0,5. Únicamente en agosto y septiembre

adquieren cuantías superiores a 0,6, aunque inferiores a 0,7. Su valor medio para el conjunto de los distintos meses del año es de 0,42.

Las afecciones a la que dan lugar los bombeos que se realizan en un acuífero se pueden solventar de forma análoga a como se procede en el caso de las aguas superficiales. En el caso de estas últimas el problema se solventa mediante la suelta de un cierto volumen de agua desde los embalses, mientras que en las primeras el caudal que se debe aportar a la red fluvial tiene que proceder de parte del volumen de agua que se bombea desde los acuíferos.

A falta de estudios y normas específicas, que concreten un valor límite del grado de afección a partir del cual se considera preciso incorporar un caudal adicional a la red fluvial, se proponer, para el presente estudio, sugerir que el mismo sea de 0,8. Dicho valor responde a un criterio algo más riguroso que el adoptado durante mucho tiempo por los planes hidrológicos de cuenca para las aguas superficiales, que fijaron el caudal ecológico en el 10% del caudal histórico medio.

En el caso concreto de la hipótesis de bombeo que se plantea, no sería preciso contemplar medidas correctoras, salvo para algunos eventos más o menos esporádicos, que complementen a los caudales que el acuífero descarga de forma natural a la red hidrográfica superficial bajo influencia de bombeo propuesto, puesto que los caudales mensuales medios drenados por el acuífero, según la simulación realizada, son siempre superiores al 20 por ciento del caudal medio que se descarga a la red hidrográfica en régimen natural (Tabla 16.9-1).

**Tabla 16.9-1. Comparativa entre el 20% del caudal descargado en régimen natural y el caudal descargado a la red fluvial para la hipótesis de bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año.**

| Concepto   | oct | nov | dic | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sep | Media |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 20 % del caudal descargado a la red fluvial en régimen natural (l/s)                           | 25  | 32  | 35  | 39  | 41  | 40  | 42  | 42  | 37  | 30  | 23  | 22  | 34    |
| Caudal descargado (l/s) a la red fluvial para la hipótesis de bombeo 2,21 hm <sup>3</sup> /año | 56  | 87  | 105 | 124 | 134 | 131 | 140 | 137 | 112 | 78  | 46  | 37  | 99    |

En la figura 16.9-7 se muestra el valor y la evolución de la ratio entre un bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año y la recarga anual acaecida a lo largo del periodo octubre de 1985-septiembre de 2017. En la misma se observa que el índice de aprovechamiento del acuífero es notablemente inferior a 0,8, que es la tasa de explotación que se recomienda no sobrepasar para asegurar una gestión sostenible de un acuífero. Dicho índice se sitúa durante la mayor parte de los 32 años que se han analizado en valores inferiores o próximos a 0,5. Únicamente en el año hidrológico extremadamente seco de 1988-1989 tomó un valor superior a 0,7, aunque inferior a 0,8.

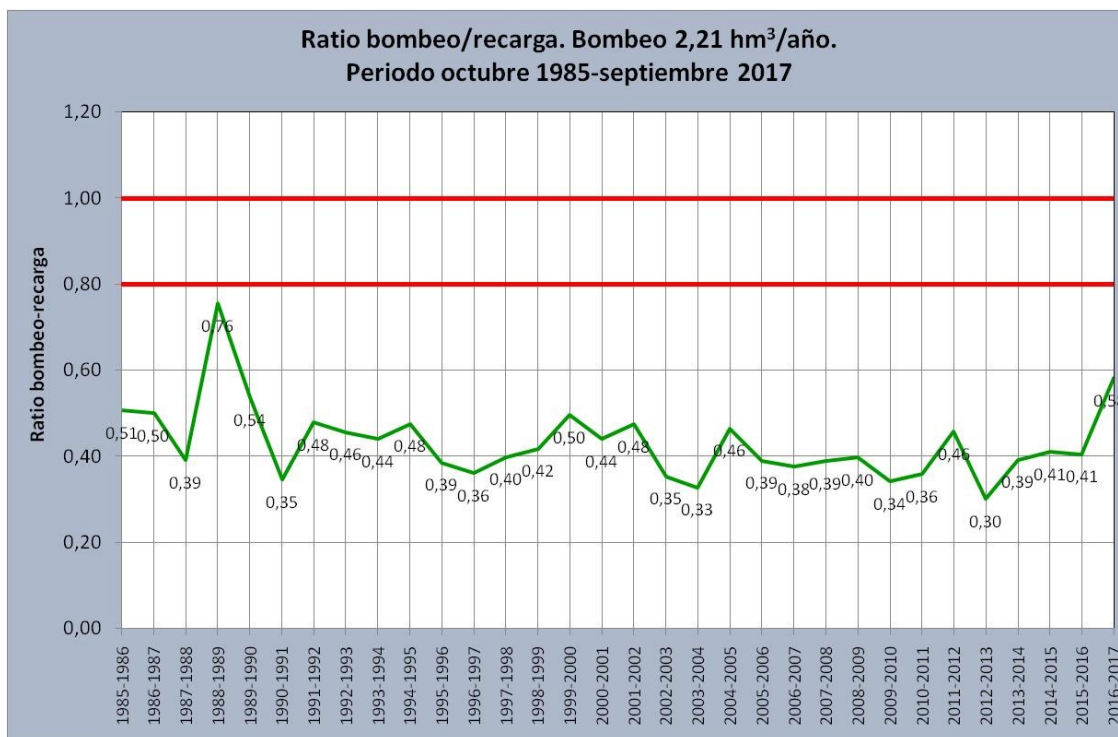


Figura 16.9-7. Ratio entre un bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año y la recarga anual acaecida a lo largo del periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.

En la figura 16.9.8 se muestran los eventos que presentan afección superior a 0,8 para el periodo octubre de 1985-septiembre de 2017. Su número asciende a 23, lo que representa el seis por ciento sobre el total de meses analizados.

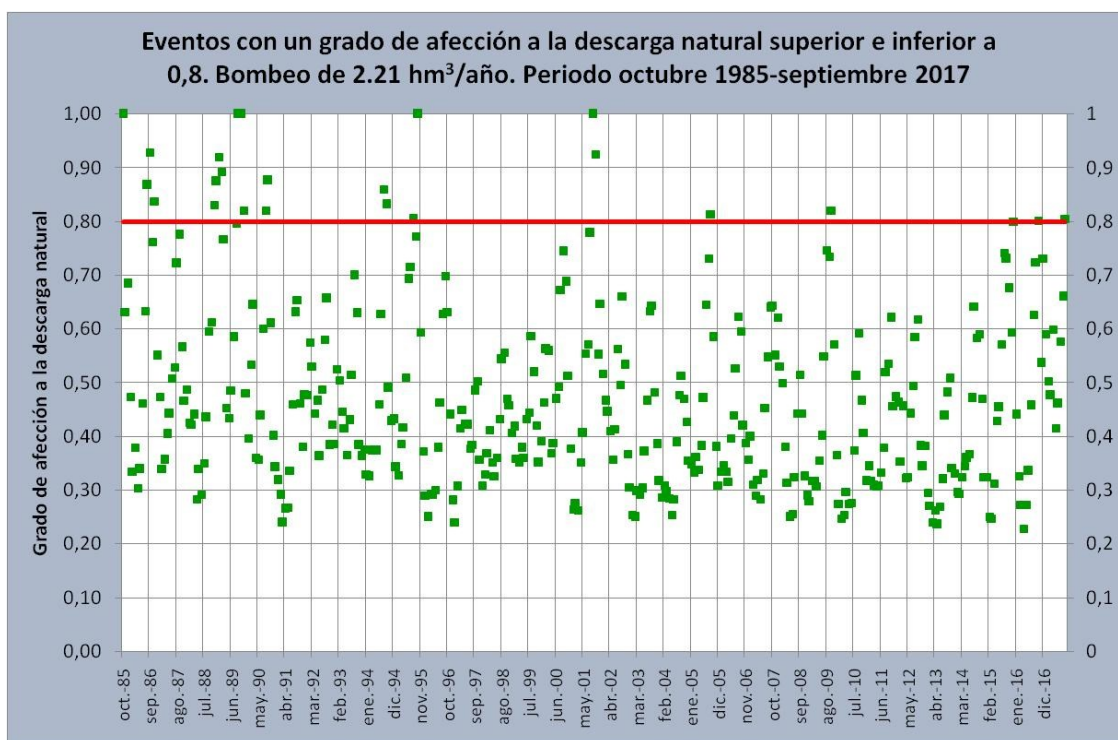


Figura 16.9-8. Eventos con un grado de afección a la descarga natural superior e inferior a 0,8. Bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.

La secuencia temporal con la que se producen estos eventos, junto con la cuantía del caudal en litros por segundo que habría que aportar para alcanzar el 20% del caudal descargado en régimen natural, se muestra en el anexo 16-9-2. En el mismo también se suministra el grado de afección a la descarga natural que se produce en cada evento. Como media habría que aportar a cada evento con un grado de afección superior a 0,8 un caudal de 5,93 l/s.

En la tabla 16.9-2 se indica, para los diferentes años hidrológicos que se han simulado, la cuantía del bombeo neto disponible para abastecimiento urbano una vez descontada la aportación complementaria que es preciso suministrar desde el bombeo bruto a la red hidrográfica superficial. En dicha tabla se observa que el bombeo bruto medio se reduce en tan solo una décima de hectómetro cúbico.

La figura 16.9-9 se ha realizado al objeto de mostrar de manera visual la relación que existe entre la disponibilidad neta para abastecimiento urbano, la aportación complementaria que es preciso suministrar a la red hidrográfica superficial y el bombeo bruto que se ejerce sobre el acuífero.

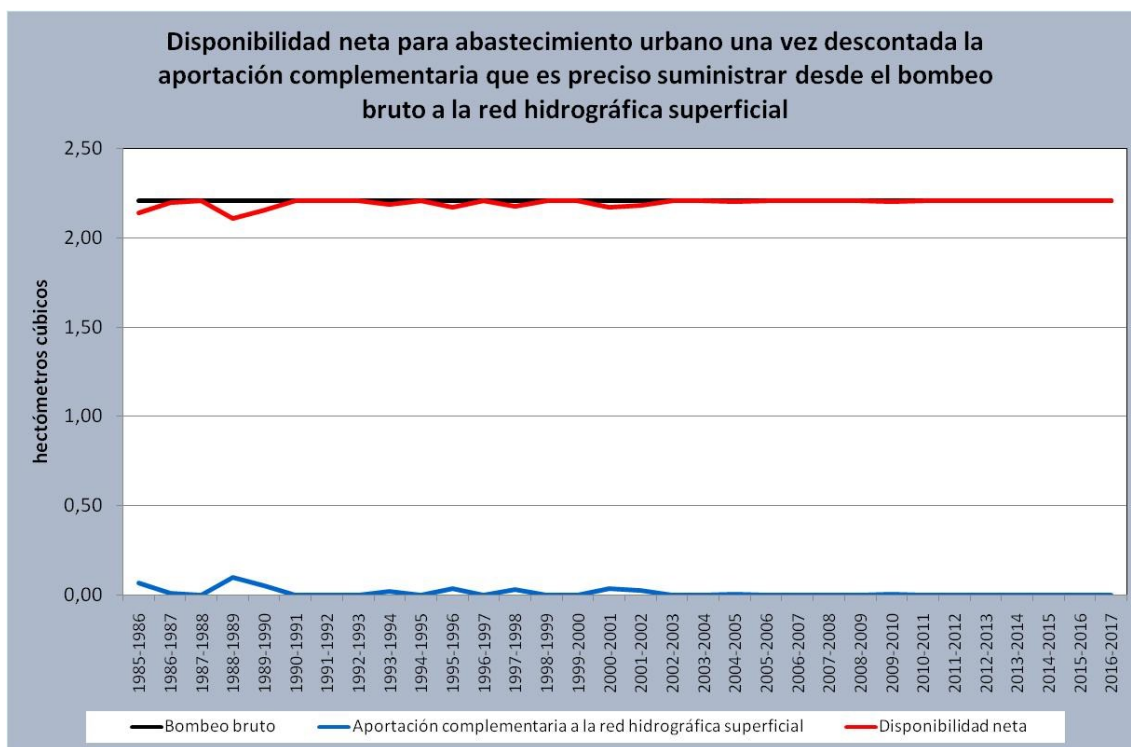
En la tabla 16.9-3 se realiza una síntesis comparativa entre las simulaciones realizadas para el régimen natural y la correspondiente a un bombeo de 70 l/s. De los resultados contemplados en la misma, así como del análisis de las figuras 16.9-6 y 16.9-7, se desprende que se puede plantear un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos del acuífero. Por supuesto, siempre dentro de una gestión sostenible que optimice y proporcione una mayor garantía de satisfacción de las posibles demandas que se puedan producir.

**Tabla 16.9-2. Disponibilidad neta para abastecimiento urbano una vez descontada la aportación complementaria que es preciso suministrar desde el bombeo bruto a la red hidrográfica superficial.**

| Año hidrológico | Bombeo bruto hm <sup>3</sup> /año | Aportación complementaria a la red hidrográfica superficial hm <sup>3</sup> /año | Disponibilidad neta hm <sup>3</sup> /año |
|-----------------|-----------------------------------|--|--|
| 1985-1986       | 2,21                              | 0,07   | 2,14                                     |
| 1986-1987       | 2,21                              | 0,01   | 2,20                                     |
| 1987-1988       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 1988-1989       | 2,21                              | 0,10   | 2,11                                     |
| 1989-1990       | 2,21                              | 0,05   | 2,16                                     |
| 1990-1991       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 1991-1992       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 1992-1993       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 1993-1994       | 2,21                              | 0,02   | 2,19                                     |
| 1994-1995       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 1995-1996       | 2,21                              | 0,03   | 2,18                                     |
| 1996-1997       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 1997-1998       | 2,21                              | 0,03   | 2,18                                     |
| 1998-1999       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 1999-2000       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2000-2001       | 2,21                              | 0,03   | 2,18                                     |
| 2001-2002       | 2,21                              | 0,02   | 2,19                                     |



| Año hidrológico | Bombeo bruto hm <sup>3</sup> /año | Aportación complementaria a la red hidrográfica superficial hm <sup>3</sup> /año | Disponibilidad neta hm <sup>3</sup> /año |
|-----------------|-----------------------------------|--|--|
| 2002-2003       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2003-2004       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2004-2005       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2005-2006       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2006-2007       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2007-2008       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2008-2009       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2009-2010       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2010-2011       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2011-2012       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2012-2013       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2013-2014       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2014-2015       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2015-2016       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| 2016-2017       | 2,21                              | 0,00   | 2,21                                     |
| Promedio        | 2,21                              | 0,01   | 2,20                                     |



**Figura 16.9-9. Disponibilidad neta para abastecimiento urbano una vez descontada la aportación complementaria que es preciso suministrar desde el bombeo bruto a la red hidrográfica superficial.**

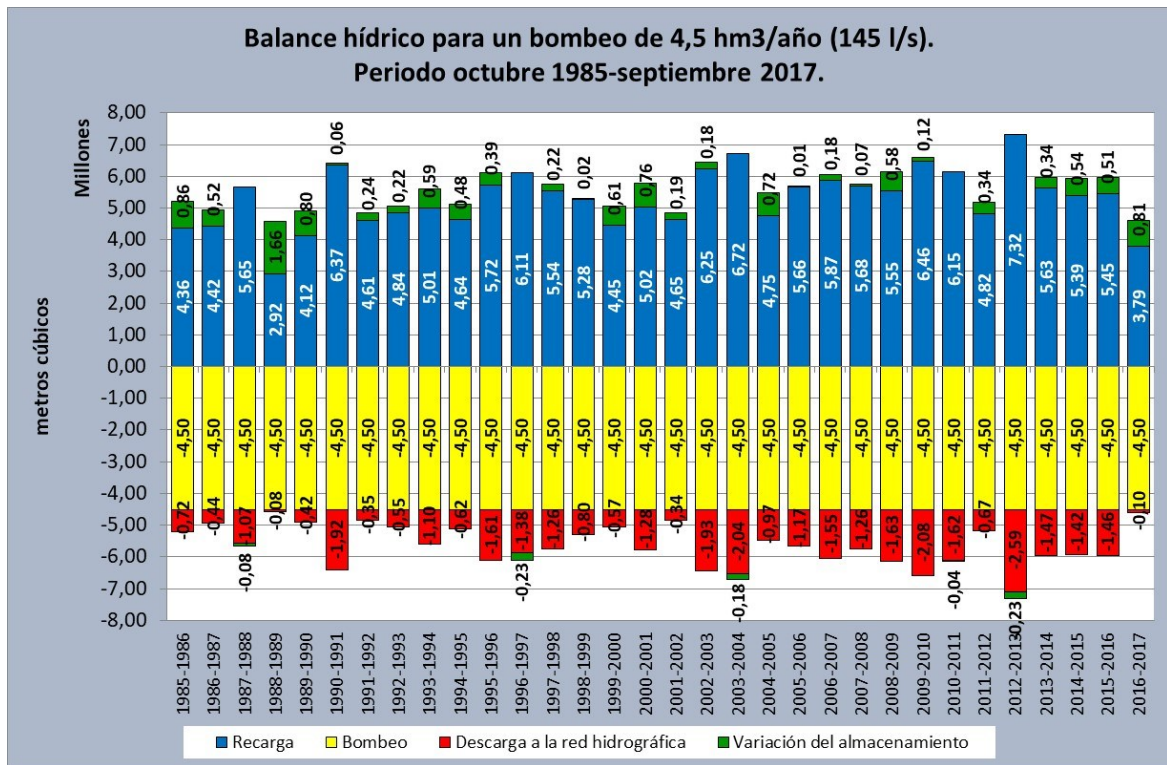
**Tabla 16.9-3. Síntesis comparativa entre la simulación realizada para el régimen natural y la correspondiente a un bombeo continuo de 70 l/s durante todo el periodo de simulación (octubre 1985-septiembre 2017).**

| Régimen de funcionamiento | Recarga hm <sup>3</sup> /año | Bombeo hm <sup>3</sup> /año | Descarga a la red hidrográfica hm <sup>3</sup> /año | Volumen medio almacenado por encima de la cota de desagüe hm <sup>3</sup> | Volumen almacenado por encima de la cota de desagüe al final del periodo de simulación hm <sup>3</sup> |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|---|--|
| Natural                   | 5,29                         | 0,00                        | 5,26  | 1,40  | 0,73   |
| Bombeo 70 l/s             | 5,29                         | 2,21                        | 3,08  | 0,81  | 0,14   |

### **16.10. Simulación del funcionamiento del acuífero jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo bajo la hipótesis de un bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año (145 l/s).**

Esta hipótesis de bombeo reproduce el comportamiento que tendría el acuífero para una explotación continuada de 145 l/s y una recarga natural idéntica a la acaecida durante el periodo comprendido entre octubre de 1985 y septiembre de 2017 (anexos 16.7.1a y 16.7.1b). La simulación realizada corresponde a un índice de aprovechamiento del acuífero del 86 por ciento, que se encuentra ligeramente situado por encima del límite superior que generalmente determina lo que se suele entender por un uso adecuado y sostenible de las disponibilidades hídricas de un acuífero. El valor de dicho índice máximo de aprovechamiento se suele tasar en una explotación máxima del 80 por ciento de la recarga total (natural, antrópica y artificial) que tiene lugar en un acuífero.

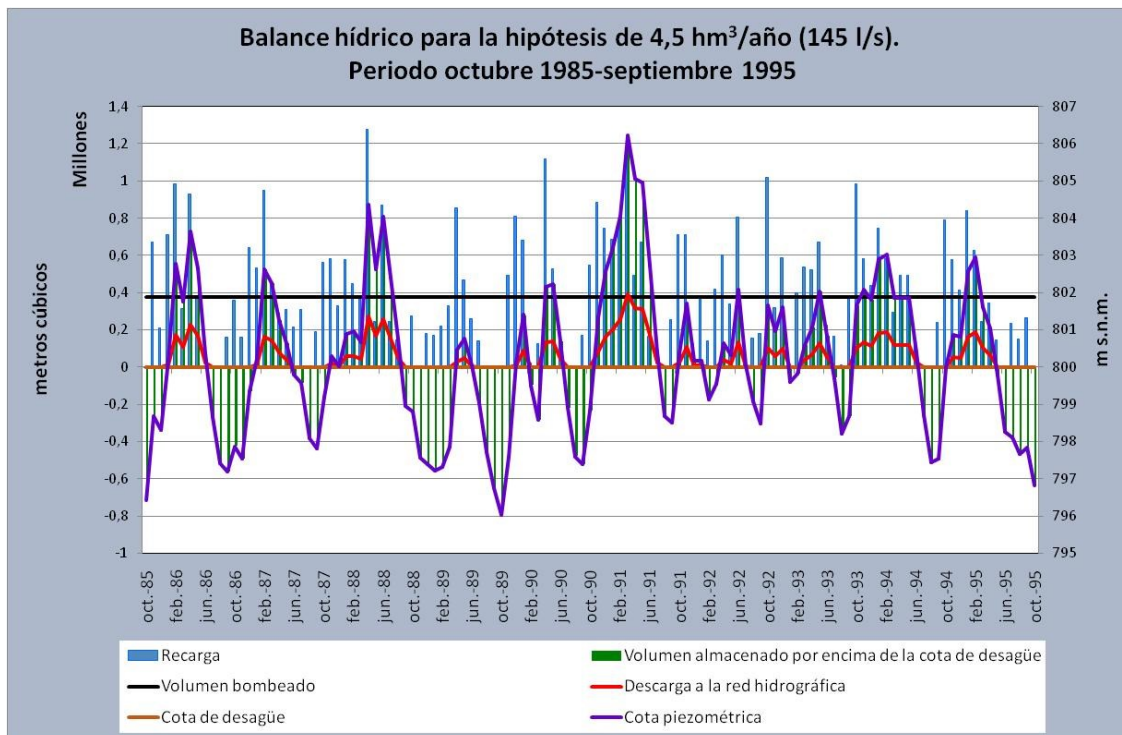
En la figura 16.10-1 se muestra el balance hídrico para la simulación realizada entre entradas (recarga por precipitación) y salidas (bombeos y descarga a la red hidrográfica) para el periodo analizado (octubre 1985 a septiembre 2017) con indicación de la variación que tiene lugar en el almacenamiento, que ha resultado ser para la serie de 32 años analizada de 29.398 m<sup>3</sup>/mes o 352.775 m<sup>3</sup>/año a favor de las salidas (bombeos y descarga a la red fluvial), por lo que el error de cierre del balance hídrico para el periodo analizado es del 6,67 por ciento.



**Figura 16.10-1. Balance hídrico para el periodo analizado (octubre 1985 a septiembre 2017) con representación de la variación que tiene lugar en el almacenamiento considerando un bombeo continuado de 145 l/s.**

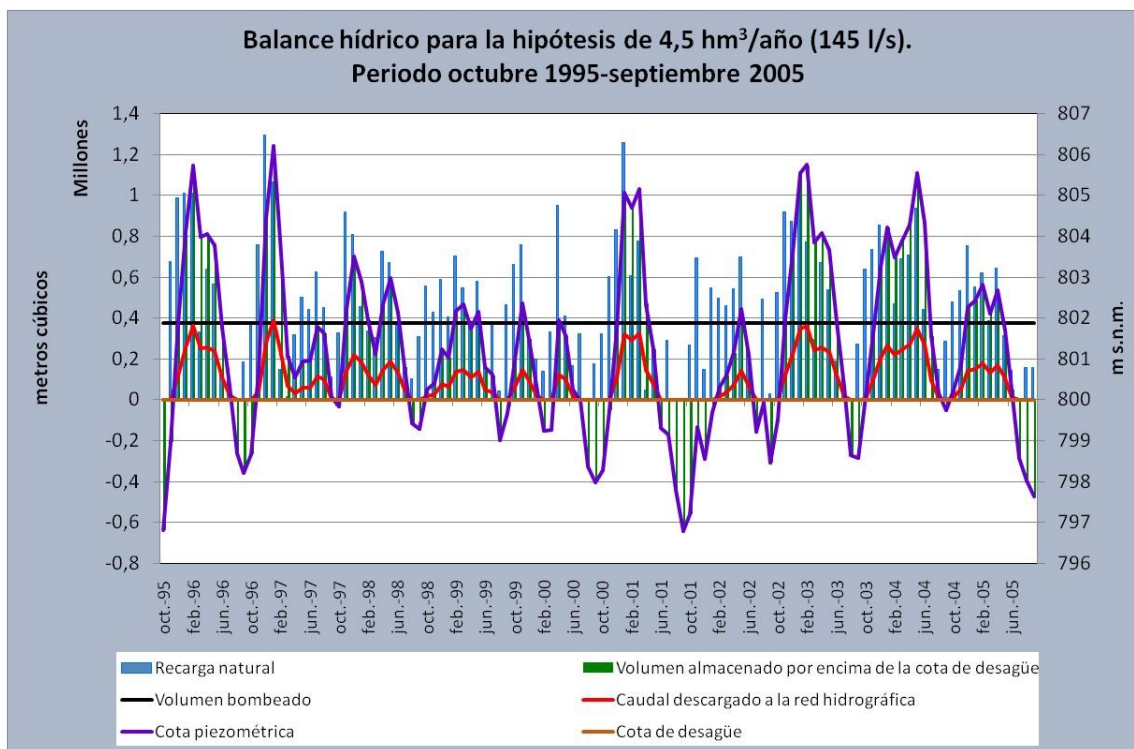
El Anexo 16.10-1 muestra los resultados obtenidos para la simulación realizada. Los valores medios para el periodo simulado son los siguientes: el nivel piezométrico medio se situó a 1,04 m por encima de la cota de desagüe; la cota piezométrica media se localizó a 801,04 m s.n.m; el volumen medio de agua descargado a la red hidrográfica fue de 94.961 m<sup>3</sup>/mes (37 l/s); el volumen medio almacenado por encima de la cota de desagüe de 207.622 m<sup>3</sup>/mes y la recarga efectiva (recarga natural menos bombeo) de 65.563 m<sup>3</sup>/mes.

La respuesta de las distintas variables representativas del funcionamiento del acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo bajo el efecto de un bombeo continuado de 145 l/s se muestra en las figuras 16.10-2, 16.10-3 y 16.10-4. De la observación de dichas figuras y de la tabla 16.10-1 se deduce que la descarga a la red hidrográfica ha sido nula en 133 meses. Dicha cuantía supone un 35 por ciento sobre el total de los 384 meses simulados. No obstante, si el cálculo de dicho porcentaje se realiza sobre los 5 meses de máximo estiaje (julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre) su cuantía es del 66 por ciento.



**Figura 16.10-2. Evolución de las variables representativas del funcionamiento del acuífero. Bombeo continuado de 145 l/s (4,5 hm<sup>3</sup>/año). Periodo octubre 1985-septiembre 1995.**

El único año hidrológico en el que no se detecta la existencia de ningún mes con descarga nula es 2012-2013, que fue un año de tipología climática muy húmeda, que se caracterizó por presentar el mayor registro pluviométrico de toda la serie analizada. Para el resto de años hidrológicos el número de meses en los que no hay descarga está comprendido entre nueve (años hidrológicos 1988-1999 y 2016-2017) y uno (años hidrológicos 1996-1997 y 2003-2004) con un promedio que es ligeramente superior a cuatro meses. Septiembre con 30 episodios (94 por ciento de los meses analizados) es el mes del año que presenta una mayor ocurrencia sin que el acuífero drene agua a la red hidrográfica. Otros meses del año con un importante número de episodios sin descarga de agua son agosto con 27 (84 por ciento de los meses simulados) y octubre con 21 (63 por ciento de los meses simulados).

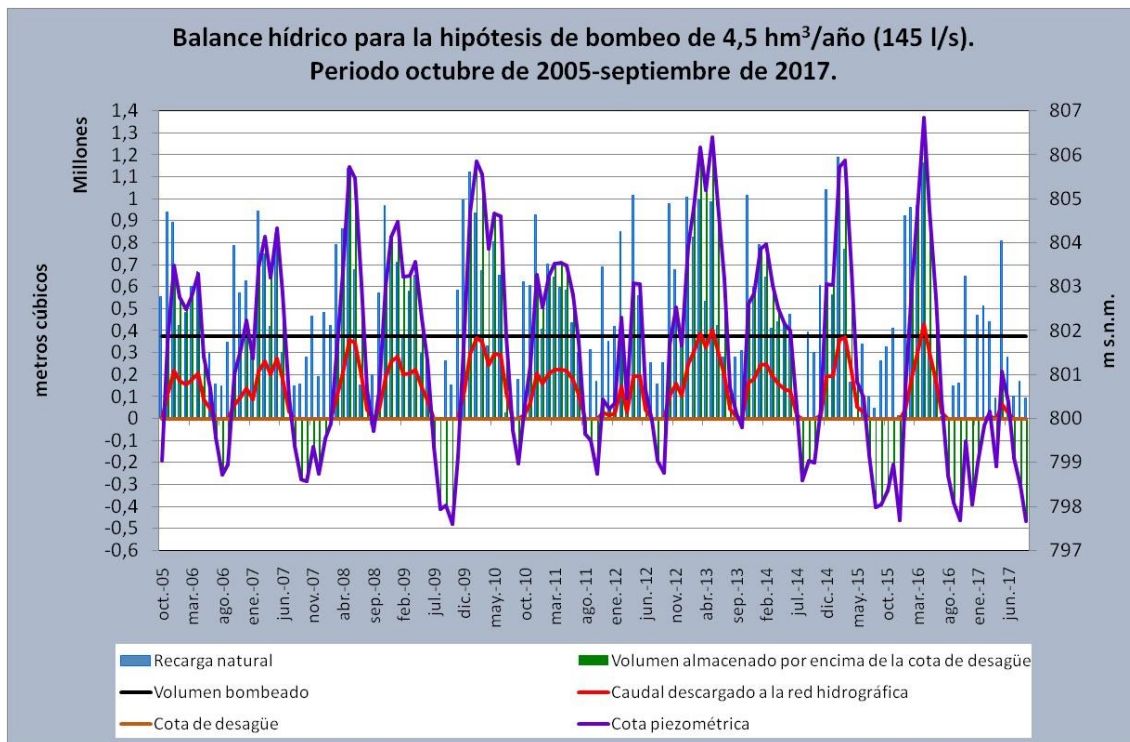


**Figura 16.10-3. Evolución de las variables representativas del funcionamiento del acuífero. Bombeo continuado de 145 l/s (4,5 hm<sup>3</sup>/año). Periodo octubre de 1995-septiembre de 2005.**

En la tabla 16.10-1 también se puede apreciar la presencia de meses del año como diciembre (7), enero (5), febrero (7) y marzo (4) con descarga nula a la red hidrográfica. Este hecho indica que el acuífero es muy sensible a la falta de recarga en los meses inmediatamente anteriores a los que se analiza la descarga y que el drenaje del agua recargada es muy rápido (periodo de semiagotamiento o de semivaciado de 66 días).

Resulta interesante resaltar a partir de la observación de la figura 16.10-2 y de la tabla 16.10-1 la existencia de un periodo de 26 meses comprendido entre septiembre de 1988 y noviembre de 1990 en el que se contabilizan 18 meses con descarga nula a la red hidrográfica. El caudal medio que se descarga en los 8 meses de ese periodo en los que existe drenaje a la red hidrográfica es de 24 l/s. En régimen natural en esos mismos 8 meses se descarga un caudal medio de 170 l/s. Si los cálculos se realizan sobre el periodo completo de 26 meses, los caudales medios mensuales son respectivamente de 7 l/s y 118 l/s.





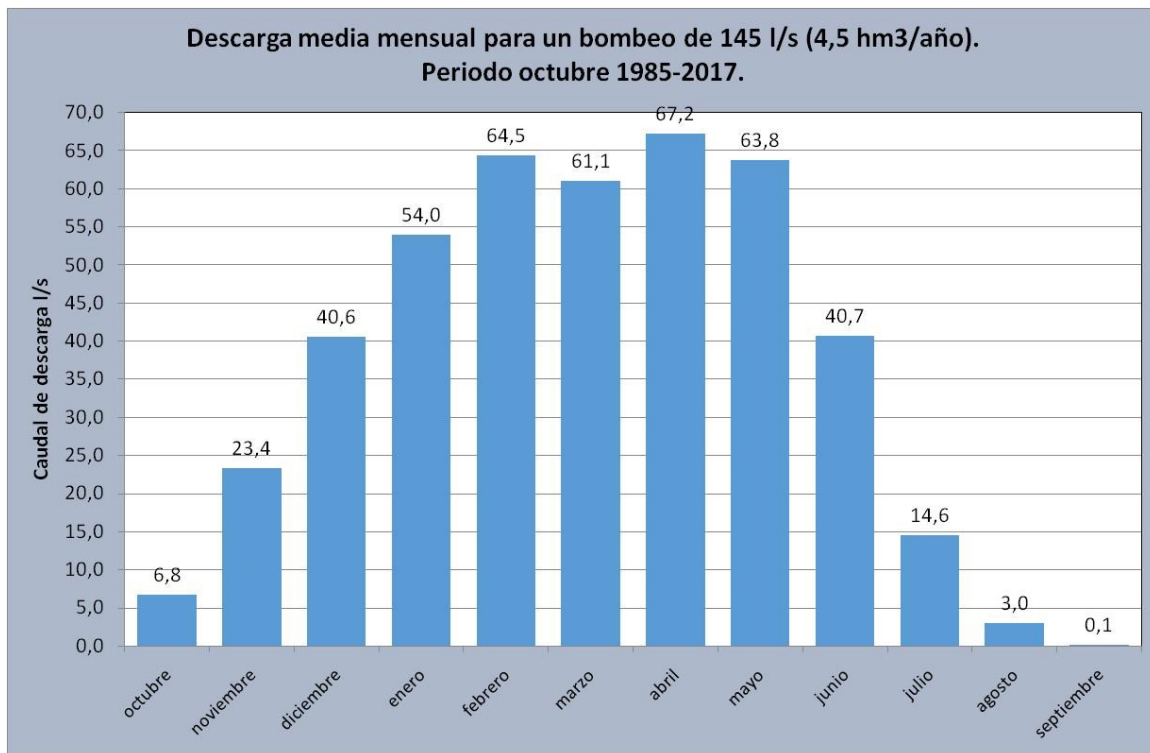
**Figura 16.10-4. Evolución de las variables representativas del funcionamiento del acuífero. Bombeo continuado de 145 l/s (4,5 hm<sup>3</sup>/año). Periodo octubre de 1995-septiembre de 2005.**

El comportamiento de la piezometría es parejo al que presenta el drenaje del acuífero, ya que cuando la primera se sitúa por debajo de la cota de desagüe del acuífero, el segundo se anula, no volviendo a tener lugar descarga de agua a la red fluvial hasta que la cota piezométrica se localiza nuevamente por encima de la cota de desagüe del acuífero. Esto implica que todo el análisis expuesto en los párrafos precedentes, para la distribución mensual y anual de la descarga a la red hidrográfica, es también válido para la piezometría, que estará por debajo de la cota de drenaje (800 m s.n.m.) los mismos meses en que es nula la descarga de agua en el acuífero. La tabla 16.10-1 es susceptible de una doble lectura que afecta en su distribución temporal por igual a la cota piezométrica y al agua que descarga el acuífero. La máxima profundidad a la que se ha situado la lámina de agua por debajo de la cota de drenaje del acuífero es de 3,97 m y su valor medio de 1,37 m.

En la figura 16.10-5 se muestran gráficamente los valores mensuales medios de la descarga del acuífero a la red hidrográfica superficial para un bombeo continuo de 145 l/s (4,5 hm<sup>3</sup>/año). Si se compara dicho gráfico con los correspondientes al régimen natural e influenciado para un bombeo de 70 l/s se observa una reducción significativa del caudal descargado a la red hidrográfica. Esta se ha cuantificado en una disminución media de 133 l/s para el primer supuesto y de 62 l/s para el segundo. Este decremento en el caudal descargado es especialmente importante y significativo para los meses de agosto y septiembre. Para el primero el caudal medio para la hipótesis de bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año es de tan solo de 3 l/s, mientras que el segundo es prácticamente nulo (0,1 l/s). En el mes de octubre el caudal descargado es también muy reducido (6,8 l/s).

**Tabla 16.10-1 Meses con descarga nula a la red hidrográfica y con piezometría por debajo de la cota 800 m s.n.m (color ocre). Bombeo 4,5 hm<sup>3</sup>/año. (nmdn=número de meses con descarga nula y piezometría por debajo de la cota 800 m s.n.m.).**

| Año hidrológico | Meses con descarga nula a la red hidrográfica y con piezometría por debajo de la cota 800 m s.n.m. (color ocre). Bombeo 4,5 hm <sup>3</sup> /año. (nmdn= número de meses con descarga nula y piezometría por debajo de la cota 800 m s.n.m.) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | nmdn |
|-----------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|                 | oct  | nov | dic | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sep |      |
| 1985-1986       | ■  | ■   | ■   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | ■   | 6    |
| 1986-1987       | ■  | ■   | ■   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | □   | □   | 7    |
| 1987-1988       | ■  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | 2    |
| 1988-1989       | ■  | ■   | ■   | ■   | ■   | ■   | □   | □   | □   | ■   | ■   | ■   | 9    |
| 1989-1990       | ■  | ■   | □   | □   | ■   | ■   | □   | □   | □   | ■   | ■   | ■   | 7    |
| 1990-1991       | ■  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | 3    |
| 1991-1992       | □  | □   | □   | □   | ■   | ■   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | 4    |
| 1992-1993       | □  | □   | □   | ■   | ■   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | ■   | 5    |
| 1993-1994       | □  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | □   | 3    |
| 1994-1995       | ■  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | ■   | ■   | ■   | 6    |
| 1995-1996       | ■  | ■   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | 4    |
| 1996-1997       | ■  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | 1    |
| 1997-1998       | ■  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | 3    |
| 1998-1999       | □  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | 2    |
| 1999-2000       | □  | □   | □   | □   | ■   | ■   | □   | □   | □   | ■   | ■   | ■   | 5    |
| 2000-2001       | ■  | ■   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | ■   | ■   | 6    |
| 2001-2002       | ■  | ■   | ■   | ■   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | ■   | 7    |
| 2002-2003       | ■  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | 3    |
| 2003-2004       | □  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | 1    |
| 2004-2005       | □  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | 3    |
| 2005-2006       | ■  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | 4    |
| 2006-2007       | □  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | 2    |
| 2007-2008       | ■  | ■   | ■   | ■   | ■   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | 6    |
| 2008-2009       | □  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | 3    |
| 2009-2010       | ■  | ■   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | 4    |
| 2010-2011       | □  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | 2    |
| 2011-2012       | ■  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | 4    |
| 2012-2013       | □  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | 0    |
| 2013-2014       | ■  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | 3    |
| 2014-2015       | ■  | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | 4    |
| 2015-2016       | ■  | ■   | ■   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | □   | ■   | ■   | 5    |
| 2016-2017       | ■  | ■   | ■   | ■   | ■   | □   | ■   | □   | □   | ■   | ■   | ■   | 9    |
| nmdn            | 21   | 11  | 7   | 5   | 7   | 4   | 1   | 1   | 3   | 16  | 27  | 30  | 133  |



**Figura 16.10-5. Descarga mensual media para un bombeo de 145 l/s (4,5 hm<sup>3</sup>/año). Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

En la figura 16.10-6 se muestra el valor y la evolución del grado de afección que presenta la descarga mensual media para el periodo de estudio (octubre 1985-septiembre 2017), bajo la hipótesis de un bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año, respecto de la descarga mensual media en régimen natural. Su valor se ha calculado a partir de la siguiente expresión:

$$A_j = 1 - D_{RIj} / D_{RNj}$$

donde:

$A_j$  es el grado de afección que presenta la descarga mensual media para el periodo de estudio en el mes  $j$  bajo una determinada hipótesis de bombeo.

$D_{RIj}$  el valor medio mensual de la descarga acaecida en régimen influenciado durante el periodo de estudio en el mes  $j$ .

y

$D_{RNj}$  el valor medio mensual de la descarga acaecida en régimen natural durante el periodo de estudio en el mes  $j$ .



**Figura 16.10-6. Grado de afección a la descarga natural mensual media para la hipótesis de bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

El grado de afección que se ha determinado para los distintos meses del año presenta cinco valores superiores a 0,8 y el resto por encima o muy próximos a 0,7. En los meses de septiembre la afección es prácticamente total durante todo el periodo analizado. El valor medio del grado de afección para el conjunto de los distintos meses del año es de 0,78, por lo que se trata de una cuantía muy próxima al valor límite de 0,8.

La adopción de una hipótesis como la planteada implica un importante detrimento del caudal que el acuífero descarga a la red hidrográfica superficial, especialmente durante los meses de estío (Tabla 16.10-1), cuyo potencial efecto negativo seguramente no es fácil de solventar mediante la adopción de medidas correctoras que incorporen una parte del agua que se bombee en el acuífero a la red fluvial, como se ha expuesto en el apartado 16.9. No obstante, no es descartable, sino incluso recomendable, la realización de un estudio de detalle que contemple dicho planteamiento.

En la tabla 16.10-2 se realiza una comparativa entre el caudal descargado bajo la hipótesis de bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año y la cuantía correspondiente al 20 por ciento del caudal que se descarga en régimen natural. En la misma también se muestra el caudal medio que se precisaría aportar para alcanzar una cuantía igual al 20 por ciento del caudal descargado en régimen natural.

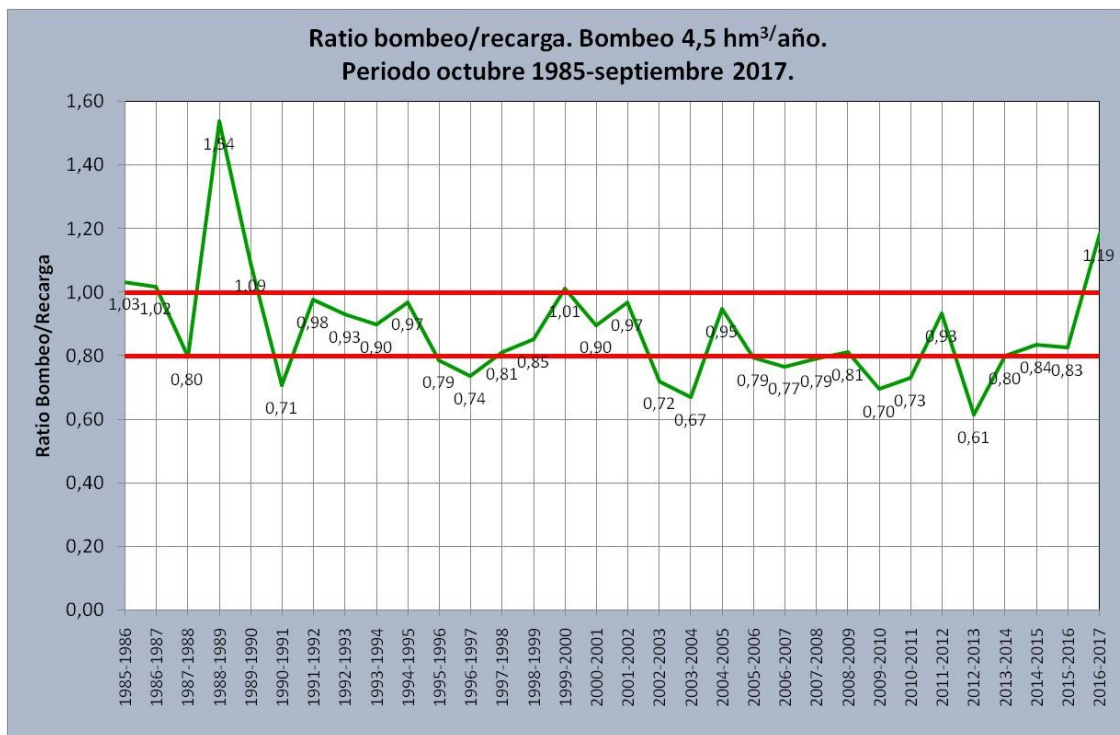
Aparentemente las cantidades mostradas en dicha tabla no parecen ser excesivamente elevadas e incluso en principio económicamente asumibles. No obstante, no se debe olvidar que en determinados años hidrológicos no solo se presentan caudales de descarga nulos en los meses de estío, sino también en cualquier otro mes del año, como se pone de manifiesto en la tabla 16.10-1. De

acuerdo a los datos expuestos en la misma los eventos que presentan caudal nulo representan el 35 por ciento del total de los analizados.

**Tabla 16.10-2. Comparativa entre el 20% del caudal descargado en régimen natural y el caudal descargado para la hipótesis de bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año. Caudal medio que es necesario aportar para alcanzar el 20 % del caudal descargado en régimen natural.**

| Concepto   | oct | nov | dic | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sep | Media |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 20 % del caudal descargado en régimen natural (l/s)  | 25  | 32  | 35  | 39  | 41  | 40  | 42  | 42  | 37  | 30  | 23  | 22  | 34    |
| Caudal descargado (l/s) para la hipótesis de bombeo de 2,21 hm <sup>3</sup> /año                           | 7   | 23  | 41  | 54  | 65  | 61  | 67  | 64  | 41  | 15  | 3   | 0   | 37    |
| Caudal medio que es necesario aportar para alcanzar el 20 % del caudal descargado en régimen natural (l/s) | 18  | 9   |     |     |     |     |     |     |     | 15  | 20  | 22  |       |

En la figura 16.10-7 se muestra el valor y evolución de la ratio entre un bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año y la recarga anual acaecida a lo largo del periodo octubre de 1985-septiembre de 2017. En la misma se observa que el índice de aprovechamiento del acuífero es normalmente superior a 0,8, que es la tasa de explotación que se recomienda no sobrepasar para asegurar una gestión sostenible de un acuífero, e incluso en cinco episodios superior a uno. Dicho índice se sitúa a lo largo de la mayor parte de los 32 años que se han analizado en valores comprendidos entre 0,8 y 1.

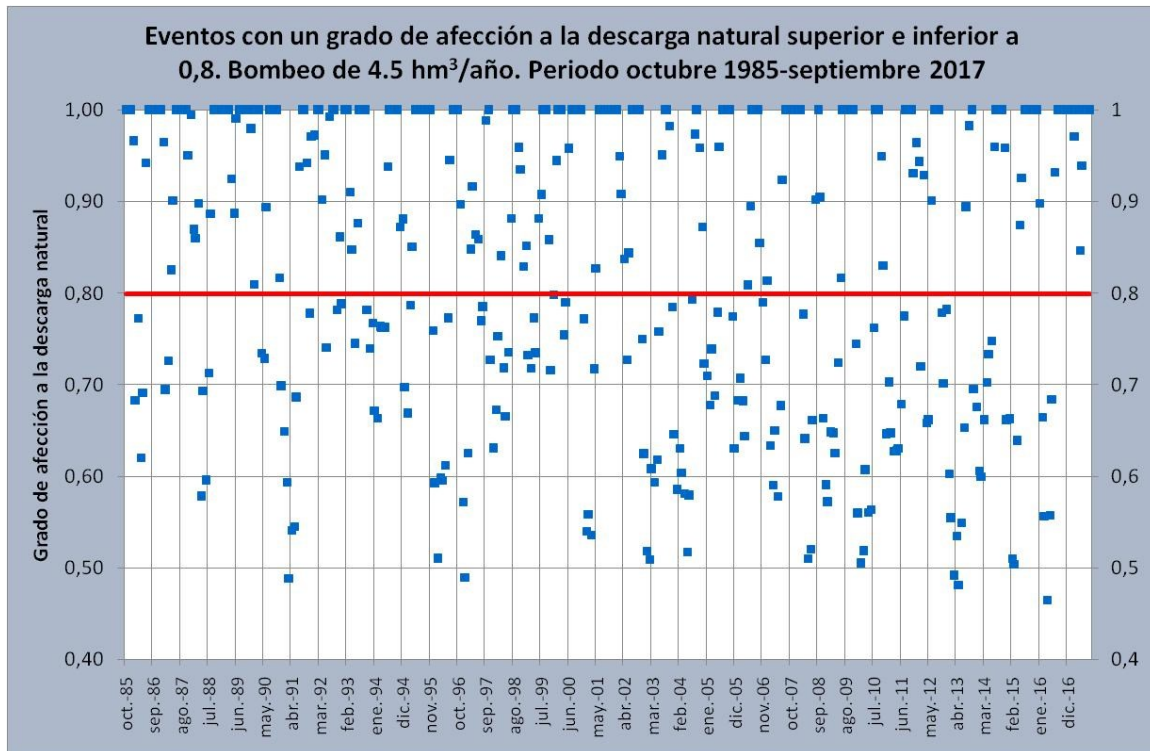


**Figura 16.10-7. Ratio entre un bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año y la recarga anual acaecida a lo largo del periodo octubre de 2005-septiembre de 2017.**

En la figura 16.10.8 se muestran los eventos que presentan una afección superior a 0,8 para el periodo octubre 1985-septiembre 2017. El número de los mismos ascienden a 219, que sobre el total de meses analizados para todo el periodo



simulado representan un porcentaje del 57 por ciento, por lo que durante algo más de la mitad del tiempo que se ha simulado habría que aportar un cierto caudal de apoyo a la descarga de agua subterránea que alimenta a la red hidrográfica superficial.



**Figura 16.10-8. Eventos con un grado de afectación a la descarga natural superior a 0,8. Bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

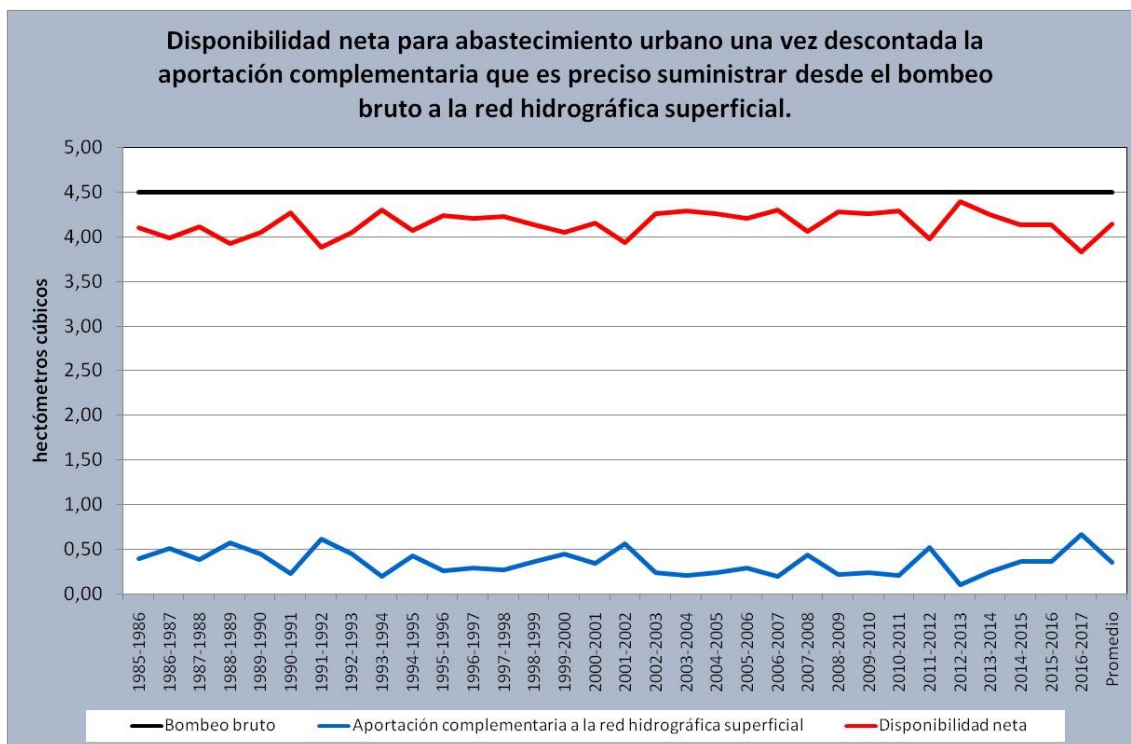
La secuencia temporal con la que se producen estos eventos, junto con la cuantía del caudal que habría que aportar para alcanzar el 20% del caudal descargado en régimen natural, se muestra en el anexo 16-10-2. En el mismo también se suministra el grado de afectación a la descarga natural que se produce en cada evento. Como media habría que aportar a cada evento con un grado de afectación superior a 0,8 un caudal de 20,12 l/s.

En la tabla 16.10-3 se indica, para los diferentes años hidrológicos que se han simulado, la cuantía del bombeo neto disponible para abastecimiento urbano una vez descontada la aportación complementaria que es preciso suministrar desde el bombeo bruto a la red hidrográfica superficial. En dicha tabla se observa que el bombeo bruto medio se reduce en tan solo 36 centésimas de hectómetro cúbico por lo que la cuantía media neta disponible para abastecimiento urbano es de 4,14 hm<sup>3</sup>/año.

La figura 16.10-9 se ha realizado al objeto de mostrar de manera visual la relación que existe entre la disponibilidad neta para abastecimiento urbano, la aportación complementaria que es preciso suministrar a la red hidrográfica superficial y el bombeo bruto que se ejerce sobre el acuífero.

**Tabla 16.10-3. Disponibilidad neta para abastecimiento urbano una vez descontada la aportación complementaria que es preciso suministrar desde el bombeo bruto a la red hidrográfica superficial.**

| Año hidrológico | Bombeo bruto hm <sup>3</sup> /año | Aportación complementaria a la red hidrográfica superficial hm <sup>3</sup> /año | Disponibilidad neta hm <sup>3</sup> /año |
|-----------------|-----------------------------------|--|--|
| 1985-1986       | 4,50                              | 0,40   | 4,10                                     |
| 1986-1987       | 4,50                              | 0,52   | 3,98                                     |
| 1987-1988       | 4,50                              | 0,39   | 4,11                                     |
| 1988-1989       | 4,50                              | 0,58   | 3,92                                     |
| 1989-1990       | 4,50                              | 0,46   | 4,04                                     |
| 1990-1991       | 4,50                              | 0,24   | 4,26                                     |
| 1991-1992       | 4,50                              | 0,62   | 3,88                                     |
| 1992-1993       | 4,50                              | 0,45   | 4,05                                     |
| 1993-1994       | 4,50                              | 0,20   | 4,30                                     |
| 1994-1995       | 4,50                              | 0,43   | 4,07                                     |
| 1995-1996       | 4,50                              | 0,27   | 4,23                                     |
| 1996-1997       | 4,50                              | 0,29   | 4,21                                     |
| 1997-1998       | 4,50                              | 0,27   | 4,23                                     |
| 1998-1999       | 4,50                              | 0,37   | 4,13                                     |
| 1999-2000       | 4,50                              | 0,45   | 4,05                                     |
| 2000-2001       | 4,50                              | 0,35   | 4,15                                     |
| 2001-2002       | 4,50                              | 0,57   | 3,93                                     |
| 2002-2003       | 4,50                              | 0,24   | 4,26                                     |
| 2003-2004       | 4,50                              | 0,21   | 4,29                                     |
| 2004-2005       | 4,50                              | 0,25   | 4,25                                     |
| 2005-2006       | 4,50                              | 0,30   | 4,20                                     |
| 2006-2007       | 4,50                              | 0,20   | 4,30                                     |
| 2007-2008       | 4,50                              | 0,44   | 4,06                                     |
| 2008-2009       | 4,50                              | 0,22   | 4,28                                     |
| 2009-2010       | 4,50                              | 0,24   | 4,26                                     |
| 2010-2011       | 4,50                              | 0,21   | 4,29                                     |
| 2011-2012       | 4,50                              | 0,52   | 3,98                                     |
| 2012-2013       | 4,50                              | 0,11   | 4,39                                     |
| 2013-2014       | 4,50                              | 0,26   | 4,24                                     |
| 2014-2015       | 4,50                              | 0,37   | 4,13                                     |
| 2015-2016       | 4,50                              | 0,37   | 4,13                                     |
| 2016-2017       | 4,50                              | 0,67   | 3,83                                     |
| Promedio        | 4,50                              | 0,36   | 4,14                                     |



**Figura 16.10-9. Disponibilidad neta para abastecimiento urbano una vez descontada la aportación complementaria que es preciso suministrar desde el bombeo bruto a la red hidrográfica superficial. Bombeo bruto de 4,5 hm<sup>3</sup>/año.**

En la tabla 16.10-4 se realiza una síntesis comparativa entre las simulaciones realizadas para el régimen natural y la correspondiente a un bombeo de 145 l/s (4,5 hm<sup>3</sup>/año). De los resultados que se contemplan, tanto en la misma como en la figura 16.10-6 y 16.10-7, se desprende que se trata de una hipótesis que en principio no se recomienda llevar a efecto, salvo que estudios específicos y de mayor detalle pongan de manifiesto lo contrario, dado no solo su alto índice de aprovechamiento, próximo al límite inferior que marca el posible comienzo de una explotación intensiva del acuífero, sino también al importante número de episodios que se detectan con un caudal de descarga nulo a la red fluvial.

**Tabla 16.10-4. Síntesis comparativa entre la simulación realizada para el régimen natural y la correspondiente a un bombeo continuado de 145 l/s durante todo el periodo de simulación (octubre 1985-septiembre 2017).**

| Régimen de funcionamiento | Recarga hm <sup>3</sup> /año | Bombeo hm <sup>3</sup> /año | Descarga a la red hidrográfica hm <sup>3</sup> /año | Volumen medio almacenado por encima de la cota de desagüe hm <sup>3</sup> | Volumen almacenado por encima de la cota de desagüe al final del periodo de simulación hm <sup>3</sup> |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|---|--|
| Natural                   | 5,29                         | 0,00                        | 5,29  | 1,40  | 0,73   |
| Bombeo 145 l/s            | 5,29                         | 4,50                        | 0,95  | 0,21  | -0,47  |

### 16.11. Simulación del funcionamiento del acuífero jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo bajo la hipótesis de un bombeo de 2,6 hm<sup>3</sup>/año distribuido a lo largo de 5 meses.

Esta hipótesis de gestión reproduce el comportamiento que tendría el acuífero para una recarga natural idéntica a la acaecida durante el periodo comprendido entre octubre de 1985 y septiembre de 2017 (anexos 16.7.1a y 16.7.1b), y para un aprovechamiento del acuífero 2,6 hm<sup>3</sup>/año. La explotación propuesta precisaría de un caudal continuo de bombeo de 200 l/s que solo tendría lugar durante 5 meses al año. El ciclo de bombeo que se ha simulado responde a una cuantía de 200 l/s (51.800 m<sup>3</sup>/mes) que solo tendría lugar durante los meses que van de julio a noviembre. La simulación realizada corresponde a un índice de aprovechamiento del acuífero del 49 por ciento.

En la figura 16.11-1 se muestra el balance hídrico para la simulación realizada entre entradas (recarga por precipitación) y salidas (bombeos y descarga a la red hidrográfica) para el periodo analizado (octubre 1985 a septiembre 2017) con indicación de la variación que tiene lugar en el almacenamiento, que ha resultado ser para la serie de 32 años analizada de 8.920 m<sup>3</sup>/mes o 107.045 m<sup>3</sup>/año a favor de las salidas (bombeos y descarga a la red fluvial), por lo que el error de cierre del balance hídrico para el periodo analizado es del 2 por ciento.

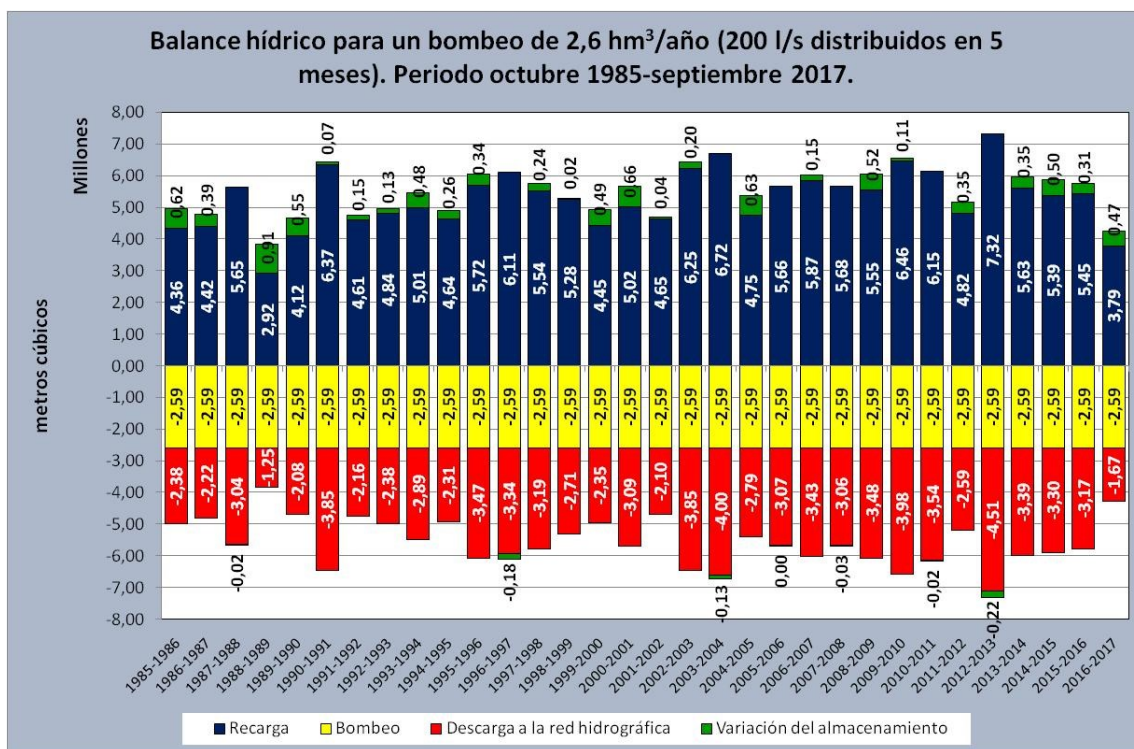
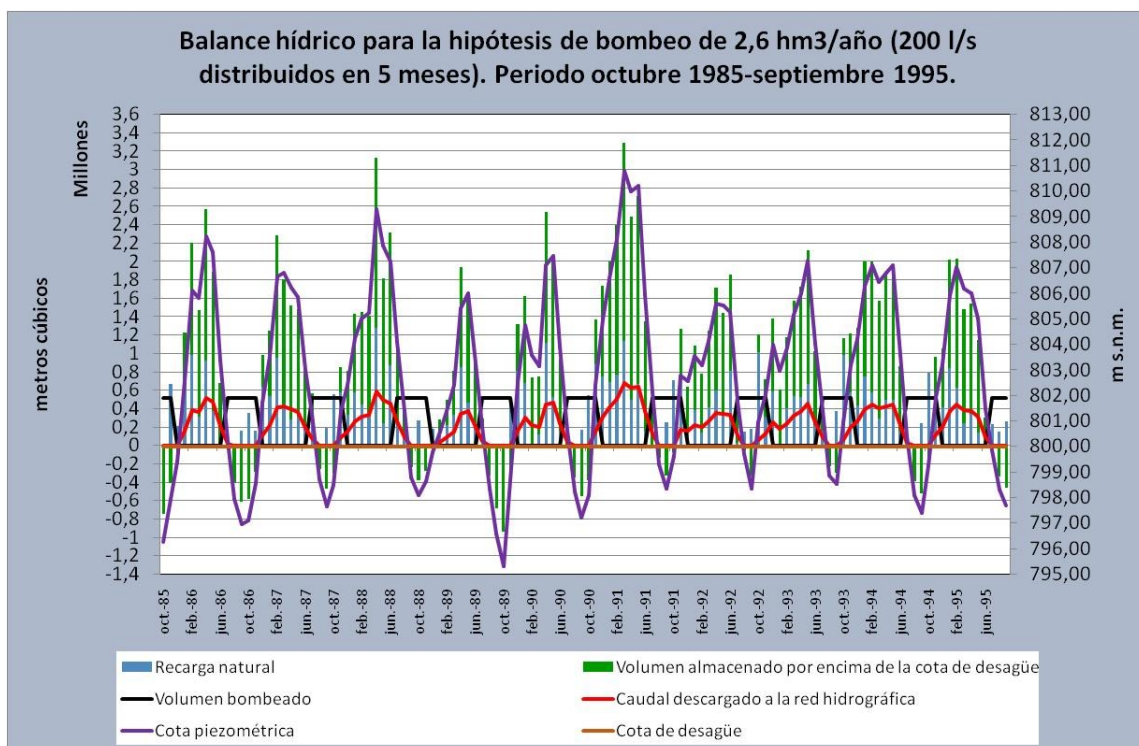


Figura 16.11-1. Balance hídrico para el periodo analizado (octubre 1985 a septiembre 2017) con representación de la variación que tiene lugar en el almacenamiento para un bombeo de 200 l/s distribuido a lo largo de 5 meses.

El Anexo 16.11-1 muestra los resultados obtenidos para la simulación realizada. Los valores medios para el periodo simulado son los siguientes: el nivel piezométrico medio se situó a 3,56 m por encima de la cota de desagüe; la cota piezométrica media se localizó a 803,56 m s.n.m; el volumen medio de agua

descargado a la red hidrográfrica fue de 245.790 m<sup>3</sup>/mes (95 l/s); el volumen medio almacenado por encima de la cota de desagüe de 710.894 m<sup>3</sup>/mes y la recarga efectiva (recarga natural menos bombeo) de 224.729 m<sup>3</sup>/mes.

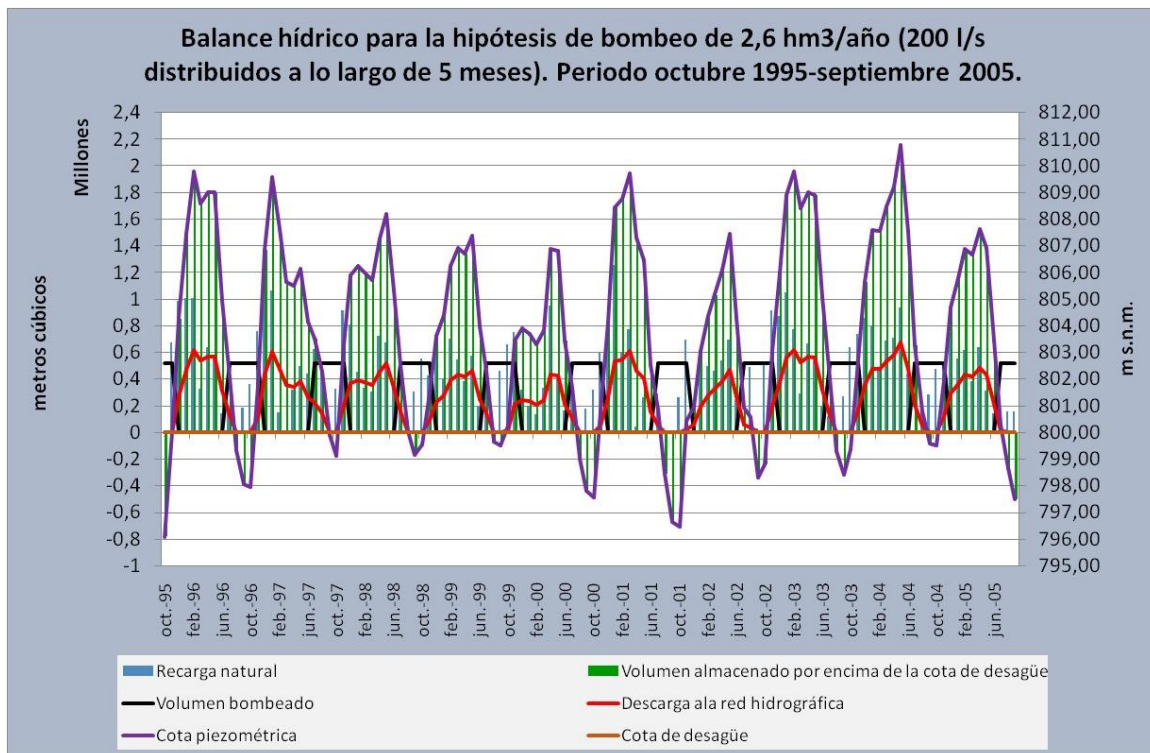
La respuesta de las distintas variables representativas del funcionamiento del acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo bajo el efecto de un bombeo 200 l/s efectuado durante los meses que van de julio a noviembre se muestra en las figuras 16.11-2, 16.11-3 y 16.11-4. De la observación de dichas figuras y de la tabla 16.11-1 se deduce que la descarga a la red hidrográfrica ha sido nula en 88 meses. Dicha cuantía supone un 23 por ciento sobre el total de los 384 meses simulados. No obstante, si el cálculo de dicho porcentaje se realiza sobre los 3 meses de máximo estío (agosto, septiembre y octubre) su cuantía asciende al 90 por ciento. En los meses de septiembre la descarga a la red hidrográfrica ha sido siempre nula.



**Figura 16.11-2. Evolución de las variables representativas del funcionamiento del acuífero. Bombeo de 2,6 hm<sup>3</sup>/año (200 l/s a lo largo de 5 meses). Periodo octubre de 1985-septiembre de 1995.**

En la figura 16.11-5 se muestran gráficamente los valores mensuales medios de la descarga del acuífero a la red hidrográfrica superficial para un bombeo de 200 l/s (2,6 hm<sup>3</sup>/año distribuidos a lo largo de 5 meses). Si se compara dicho gráfico con los correspondientes al régimen natural e influenciado para un bombeo de 70 l/s se observa una reducción significativa del caudal descargado a la red hidrográfrica. Este hecho es especialmente significativo para los meses de agosto, septiembre y octubre. Para el primero el caudal medio es tan solo de 6 l/s, para el segundo nulo y para el tercero de 3 l/s. En los tres meses de máximo estío la situación de las descargas es muy parecida a la que acontece cuando se bombea 145 l/s a lo largo de todo el año, sin embargo, para los restantes meses es notablemente mejor.





**Figura 16.11-3. Evolución de las variables representativas del funcionamiento del acuífero. Bombeo de 2,6 hm<sup>3</sup>/año (200 l/s a lo largo de 5 meses). Periodo octubre de 1995-septiembre de 2005.**

El comportamiento temporal de la piezometría es parejo al que presenta el drenaje del acuífero, ya que cuando la primera se sitúa por debajo de la cota de desagüe del acuífero, el segundo se anula, no volviendo a tener lugar descarga de agua a la red fluvial hasta que la cota piezométrica se localiza nuevamente por encima de la cota de desagüe del acuífero. Esto implica que todo el análisis expuesto en los párrafos precedentes, para la distribución mensual y anual de la descarga a la red hidrográfica, es también válido para la piezometría, que estará por debajo de la cota de drenaje (800 m s.n.m.) los mismos meses en que es nula la descarga de agua en el acuífero. La tabla 16.11-1 es susceptible de una doble lectura que afecta en su distribución temporal por igual a la cota piezométrica y al agua que descarga el acuífero. La máxima profundidad a la que se ha situado la lámina de agua por debajo de la cota de drenaje del acuífero es de 4,70 m y su valor medio de 1,52 m.

En la figura 16.11-6 se muestra el valor y la evolución del grado de afección que presenta la descarga mensual media para el periodo de estudio (octubre 1985-septiembre 2017) respecto de la descarga mensual media en régimen natural bajo la hipótesis de un bombeo de 2,6 hm<sup>3</sup>/año. Su valor se ha calculado a partir de la siguiente expresión:

$$A_j = 1 - D_{Rij} / D_{RNj}$$

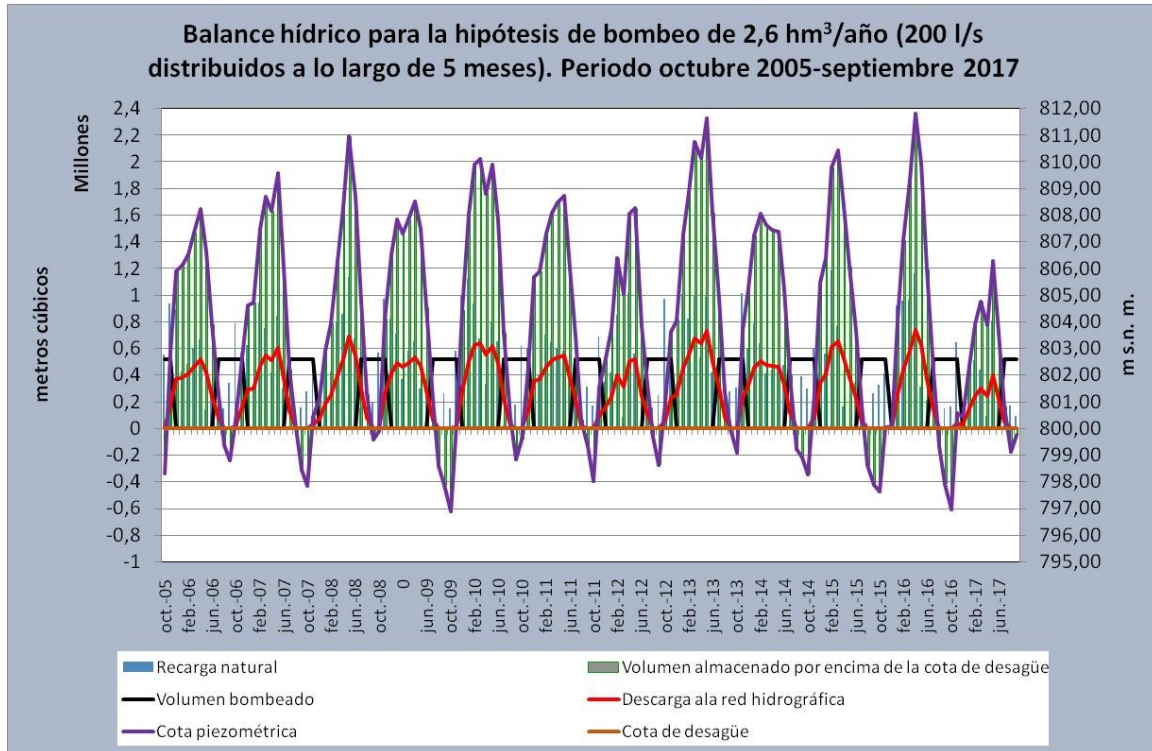
Donde:

$A_j$  es el grado de afección que presenta la descarga mensual media para el periodo de estudio en el mes  $j$  bajo una determinada hipótesis de bombeo.

$D_{Rj}$  el valor medio mensual de la descarga acaecida en régimen influenciado durante el periodo de estudio en el mes j.

y

$D_{RNj}$  el valor medio mensual de la descarga acaecida en régimen natural durante el periodo de estudio en el mes j.



**Figura 16.11-4. Evolución de las variables representativas del funcionamiento del acuífero. Bombeo de 2,6 hm³/año (200 l/s a lo largo de 5 meses). Periodo octubre de 2005-septiembre de 2017.**

El grado de afección que se ha determinado para los distintos meses del año presenta tres valores superiores a 0,8 (agosto, septiembre y octubre) y dos en torno a 0,7 (julio y noviembre). Se trata de los 5 meses en que se bombea agua desde el acuífero. En el resto de los meses, que se caracterizan porque no se realiza ninguna explotación en el acuífero, el grado de afección es reducido e incluso muy bajo para los meses de febrero, marzo, abril y mayo. Este comportamiento es indicativo de la rápida respuesta que presenta el acuífero ante las acciones externas y de lo difícil que resulta regular el mismo sin hacer uso del volumen almacenado por debajo de la cota de desagüe. El valor medio del grado de afección que se ha calculado para el conjunto de los distintos meses del año es de 0,44.

**Tabla 16.11-1 Meses con descarga nula a la red hidrográfica y con piezometría por debajo de la cota 800 ms.n.m (color ocre). Bombeo 2,6 hm<sup>3</sup>/año. (nmdn=número de meses con descarga nula y piezometría por debajo de la cota 800 m s.n.m.).**

| Año hidrológico | Meses con descarga nula a la red hidrográfica y con piezometría por debajo de la cota 800 m s.n.m (color ocre). Bombeo 2,6 hm <sup>3</sup> /año |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | nmdn |    |
|-----------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|----|
|                 | oct   | nov | dic | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sep |      |    |
| 1985-1986       | ■   | ■   | ■   |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 5    |    |
| 1986-1987       | ■   | ■   | ■   |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 4    |    |
| 1987-1988       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 2    |    |
| 1988-1989       | ■   | ■   | ■   |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 5    |    |
| 1989-1990       | ■   | ■   | ■   |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 4    |    |
| 1990-1991       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 3    |    |
| 1991-1992       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 3    |    |
| 1992-1993       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 2    |    |
| 1993-1994       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 2    |    |
| 1994-1995       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     |     | 4    |    |
| 1995-1996       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 3    |    |
| 1996-1997       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 2    |    |
| 1997-1998       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 2    |    |
| 1998-1999       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 3    |    |
| 1999-2000       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 2    |    |
| 2000-2001       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 3    |    |
| 2001-2002       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 2    |    |
| 2002-2003       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 3    |    |
| 2003-2004       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 2    |    |
| 2004-2005       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 3    |    |
| 2005-2006       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 3    |    |
| 2006-2007       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 1    |    |
| 2007-2008       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 2    |    |
| 2008-2009       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 3    |    |
| 2009-2010       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 2    |    |
| 2010-2011       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 2    |    |
| 2011-2012       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 3    |    |
| 2012-2013       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 1    |    |
| 2013-2014       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 3    |    |
| 2014-2015       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 3    |    |
| 2015-2016       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 3    |    |
| 2016-2017       | ■   |     |     |     |     |     |     |     |     |     | ■   |     | 3    |    |
| nmdn            | 27  | 4   | 2   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 22  | 32   | 88 |

En el caso concreto de la hipótesis de bombeo que se plantea sería preciso contemplar la adopción de medidas correctoras que complementen parte de los caudales que el acuífero deja de drenar de forma natural a la red hidrográfica superficial por efecto del bombeo propuesto. En la tabla 16.11-2 se realiza una comparativa entre el caudal descargado bajo la hipótesis de bombeo de 2,6 hm<sup>3</sup>/año y la cuantía correspondiente al 20 por ciento del caudal que se descarga en régimen natural. En la misma también se muestra el caudal medio que se precisaría aportar para alcanzar una cuantía igual al 20 por ciento del caudal descargado en régimen natural.

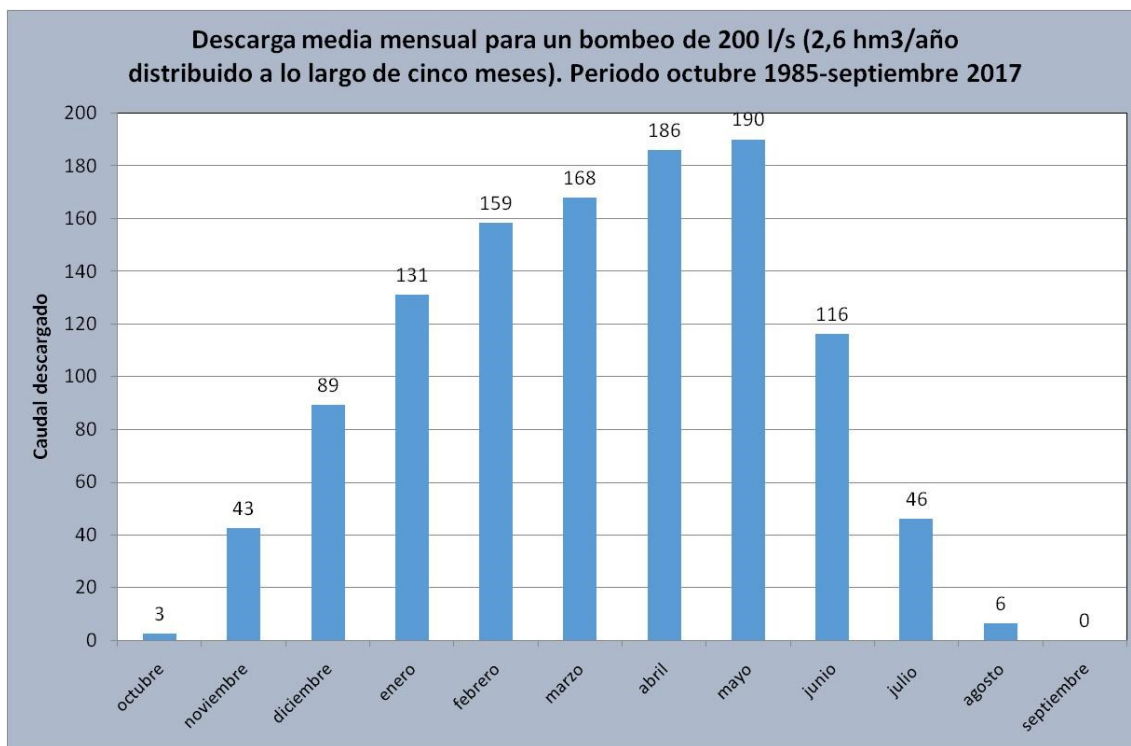


Figura 16.10-5. Descarga mensual media para un bombeo de 200 l/s (2,6 hm<sup>3</sup>/año distribuido a lo largo de 5 meses). Periodo octubre 1985-septiembre 2017.

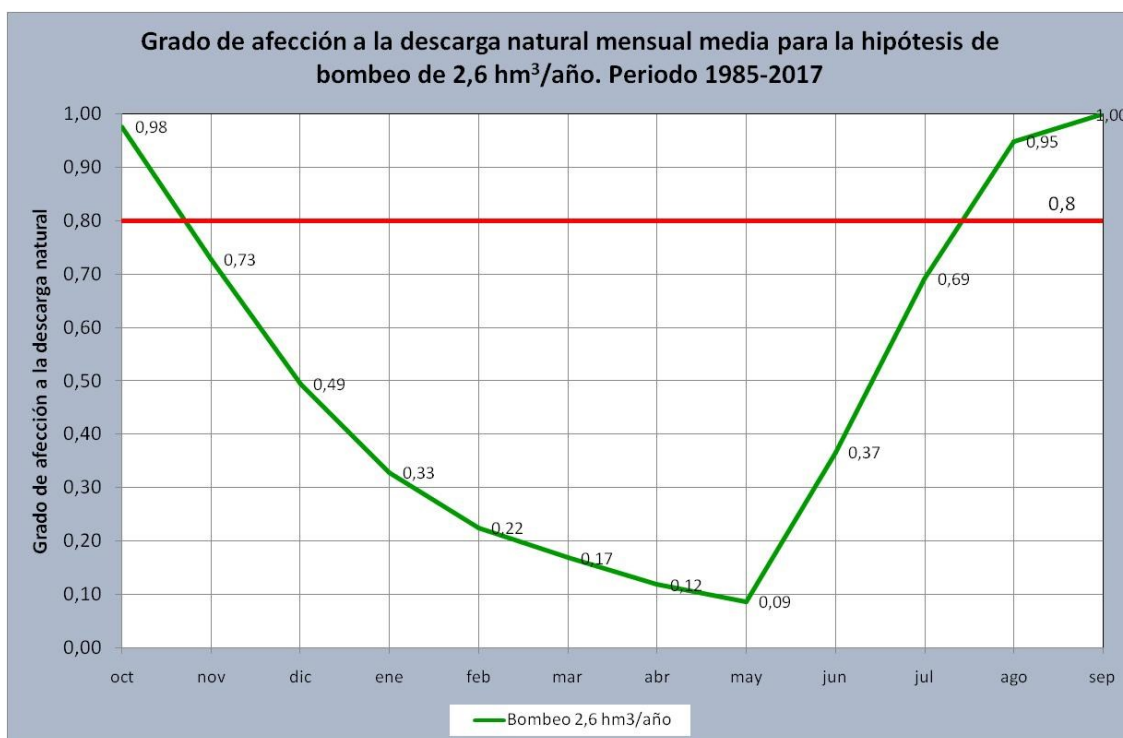


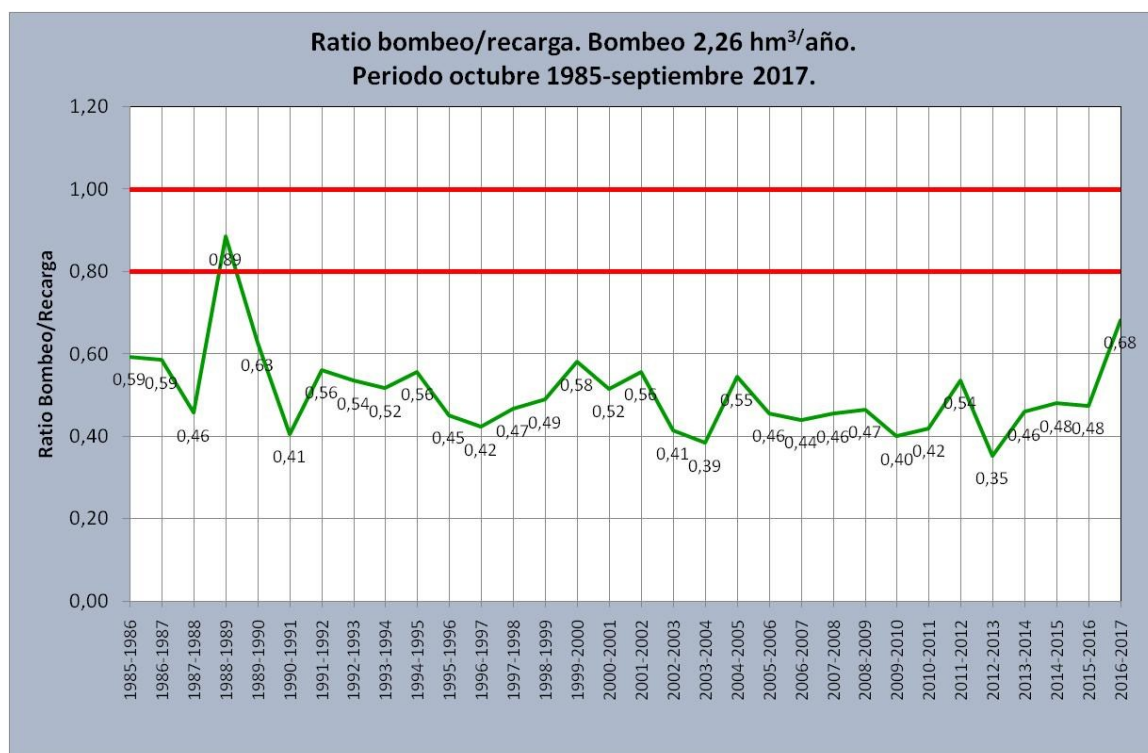
Figura 16.11-6. Grado de afección a la descarga natural mensual media para la hipótesis de bombeo de 2,6 hm<sup>3</sup>/año. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.

**Tabla 16.11-2. Comparativa entre el 20% del caudal descargado en régimen natural y el caudal descargado para la hipótesis de bombeo de 2,6 hm<sup>3</sup>/año. Caudal medio que es necesario aportar para alcanzar el 20 % caudal descargado en régimen natural.**

| Concepto   | oct | nov | dic | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sep | Media |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 20 % caudal descargado en régimen natural (l/s)                              | 25  | 32  | 35  | 39  | 41  | 40  | 42  | 42  | 37  | 30  | 23  | 22  | 34    |
| Caudal descargado (l/s) para la hipótesis de bombeo 2,6 hm <sup>3</sup> /año | 3   | 43  | 89  | 131 | 159 | 168 | 186 | 190 | 116 | 46  | 6   | 0   | 95    |
| Caudal medio que es necesario aportar para alcanzar el 20 % caudal           | 22  |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 17  | 22  |       |

En la figura 16.11-7 se muestra el valor y evolución de la ratio entre un bombeo de 2,6 hm<sup>3</sup>/año y la recarga anual acaecida a lo largo del periodo octubre de 1985-septiembre de 2017. En la misma se observa que el índice de aprovechamiento del acuífero es inferior a 0,8, que es la tasa de explotación que se recomienda no sobrepasar para asegurar una gestión sostenible de un acuífero, salvo para el año hidrológico extremadamente seco de 1988-1989 que toma el valor de 0,89. Dicho índice se sitúa a lo largo de la mayor parte de los 32 años que se han analizado en valores inferiores o próximos a 0,6.

La existencia de un único año hidrológico que presenta un índice de aprovechamiento superior a 0,8, pero inferior a 1, no constituye un inconveniente que ponga en peligro la realización de un aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos del acuífero bajo la hipótesis de un bombeo de 200 l/s, que solo tendría lugar durante 5 meses al año.

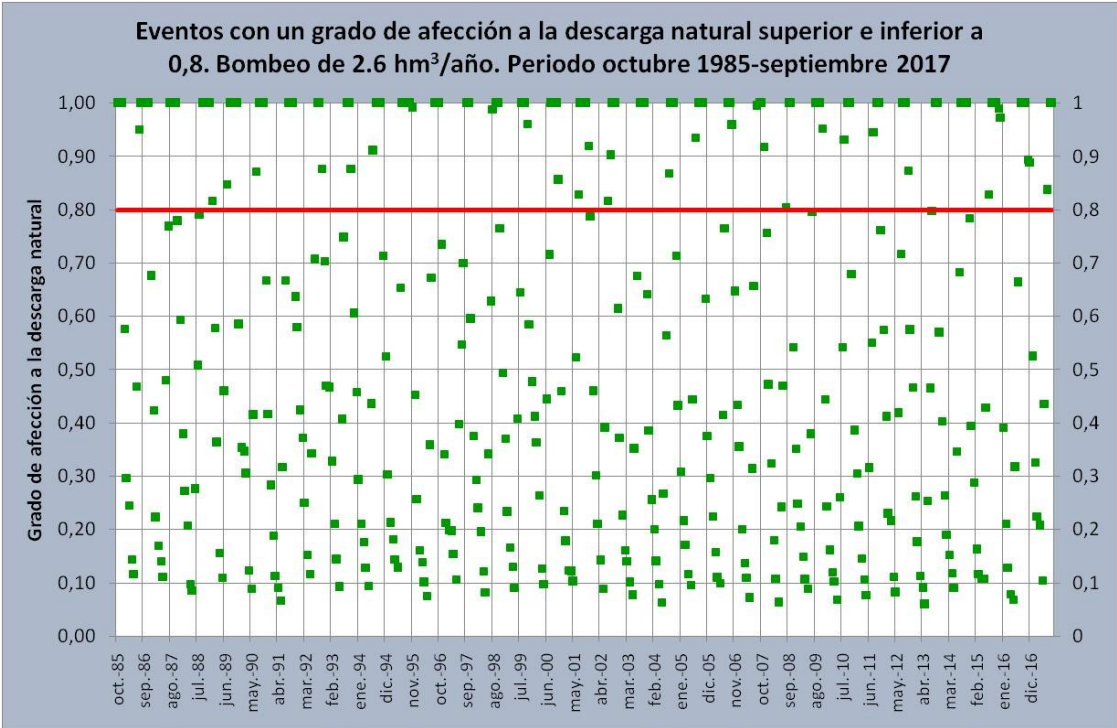


**Figura 16.11-7. Ratio entre un bombeo de 2,6 hm<sup>3</sup>/año y la recarga anual acaecida a lo largo del periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**



En la figura 16.11.8 se muestran los eventos que presentan una afección superior a 0,8 para el periodo octubre 1985-septiembre 2017. El número de los mismos ascienden a 119, que sobre el total de meses analizados para todo el periodo simulado representan un porcentaje del 31 por ciento, por lo que aproximadamente durante un tercio del tiempo que se ha simulado habría que aportar un cierto caudal de apoyo a la descarga de agua subterránea que alimenta a la red hidrográfica superficial. Dicho porcentaje se concentra mayoritariamente durante los meses de agosto, septiembre y octubre.

La secuencia temporal con la que se producen estos eventos, junto con la cuantía del caudal que habría que aportar para alcanzar el 20% del caudal descargado en régimen natural, se muestra en el anexo 16-11-2. En el mismo también se suministra el grado de afección a la descarga natural que se produce en cada evento. Como media habría que aportar a cada evento con un grado de afección superior a 0,8 un caudal de 19,51 l/s.



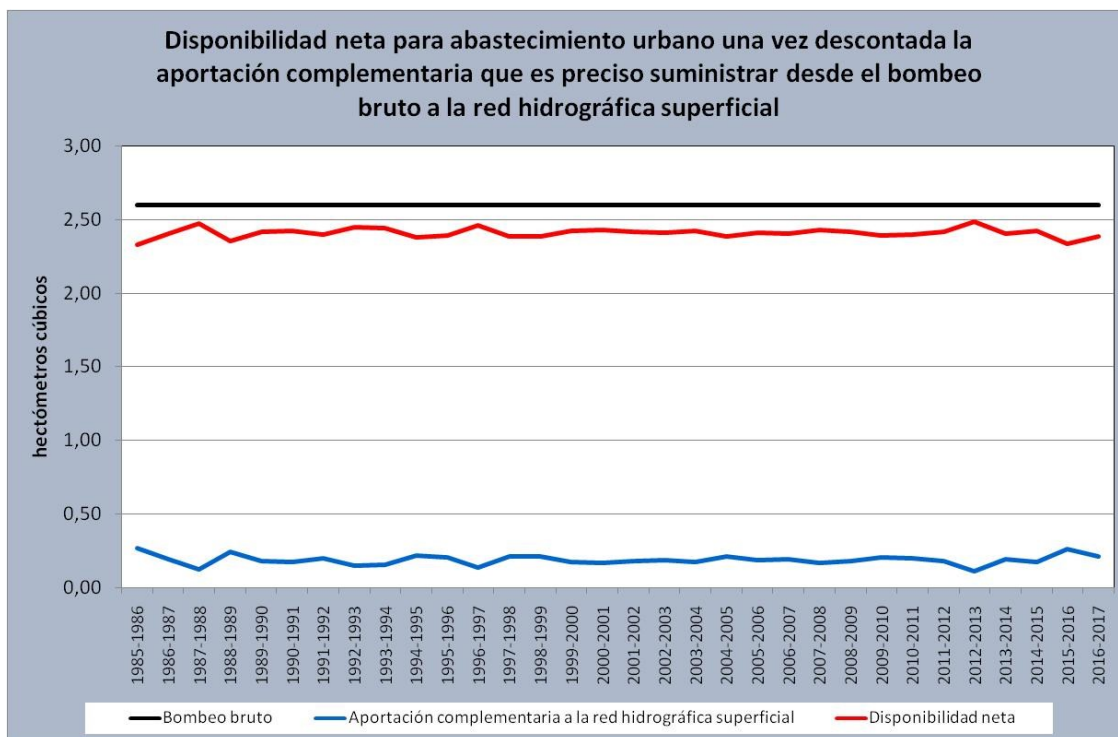
**Figura 16.11.8. Eventos con un grado de afección a la descarga natural superior e inferior a 0,8. Bombeo 2,6 hm<sup>3</sup>/año. Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

En la tabla 16.11-3 se indica, para los diferentes años hidrológicos que se han simulado, la cuantía del bombeo neto disponible para abastecimiento urbano una vez descontada la aportación complementaria que es preciso suministrar desde el bombeo bruto a la red hidrográfica superficial. En dicha tabla se observa que el bombeo bruto medio se reduce en tan solo 19 centésimas de hectómetro cúbico por lo que la cuantía media neta disponible para abastecimiento urbano es de 2,41 hm<sup>3</sup>/año.

La figura 16.11-9 se ha realizado al objeto de mostrar de manera visual la relación que existe entre la disponibilidad neta para abastecimiento urbano, la aportación complementaria que es preciso suministrar a la red hidrográfica superficial y el bombeo bruto que se ejerce sobre el acuífero.

**Tabla 16.11-3. Disponibilidad neta para abastecimiento urbano una vez descontada la aportación complementaria que es preciso suministrar desde el bombeo bruto a la red hidrográfica superficial.**

| Año hidrológico | Bombeo bruto hm <sup>3</sup> /año | Aportación complementaria a la red hidrográfica superficial hm <sup>3</sup> /año | Disponibilidad neta hm <sup>3</sup> /año |
|-----------------|-----------------------------------|--|--|
| 1985-1986       | 2,60                              | 0,27   | 2,33                                     |
| 1986-1987       | 2,60                              | 0,19   | 2,41                                     |
| 1987-1988       | 2,60                              | 0,13   | 2,47                                     |
| 1988-1989       | 2,60                              | 0,25   | 2,35                                     |
| 1989-1990       | 2,60                              | 0,18   | 2,42                                     |
| 1990-1991       | 2,60                              | 0,17   | 2,43                                     |
| 1991-1992       | 2,60                              | 0,20   | 2,40                                     |
| 1992-1993       | 2,60                              | 0,15   | 2,45                                     |
| 1993-1994       | 2,60                              | 0,16   | 2,44                                     |
| 1994-1995       | 2,60                              | 0,22   | 2,38                                     |
| 1995-1996       | 2,60                              | 0,21   | 2,39                                     |
| 1996-1997       | 2,60                              | 0,13   | 2,47                                     |
| 1997-1998       | 2,60                              | 0,21   | 2,39                                     |
| 1998-1999       | 2,60                              | 0,21   | 2,39                                     |
| 1999-2000       | 2,60                              | 0,17   | 2,43                                     |
| 2000-2001       | 2,60                              | 0,16   | 2,44                                     |
| 2001-2002       | 2,60                              | 0,18   | 2,42                                     |
| 2002-2003       | 2,60                              | 0,18   | 2,42                                     |
| 2003-2004       | 2,60                              | 0,17   | 2,43                                     |
| 2004-2005       | 2,60                              | 0,21   | 2,39                                     |
| 2005-2006       | 2,60                              | 0,18   | 2,42                                     |
| 2006-2007       | 2,60                              | 0,19   | 2,41                                     |
| 2007-2008       | 2,60                              | 0,17   | 2,43                                     |
| 2008-2009       | 2,60                              | 0,18   | 2,42                                     |
| 2009-2010       | 2,60                              | 0,20   | 2,40                                     |
| 2010-2011       | 2,60                              | 0,20   | 2,40                                     |
| 2011-2012       | 2,60                              | 0,18   | 2,42                                     |
| 2012-2013       | 2,60                              | 0,11   | 2,49                                     |
| 2013-2014       | 2,60                              | 0,19   | 2,41                                     |
| 2014-2015       | 2,60                              | 0,17   | 2,43                                     |
| 2015-2016       | 2,60                              | 0,26   | 2,34                                     |
| 2016-2017       | 2,60                              | 0,21   | 2,39                                     |
| Promedio        | 2,60                              | 0,19   | 2,41                                     |



**Figura 16.11-9. Disponibilidad neta para abastecimiento urbano una vez descontada la aportación complementaria que es preciso suministrar desde el bombeo bruto a la red hidrográfica superficial. Bombeo bruto de 2,6 hm³/año.**

En la tabla 16.11-4 se realiza una síntesis comparativa entre las simulaciones realizadas para el régimen natural y la correspondiente a un bombeo de 200 l/s. De los resultados contemplados en la misma, así como del análisis de las figuras 16.11-6 y 16.11-7, se desprende que se puede plantear un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos del acuífero. Por supuesto, siempre dentro de una gestión razonable y racional que optimice y proporcione una mayor garantía de satisfacción de las posibles demandas que se puedan producir.

**Tabla 16.11-4. Síntesis comparativa entre la simulación realizada para el régimen natural y la correspondiente a un bombeo de 200 l/s (2,6 hm³/año distribuido a lo largo de 5 meses). Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

| Régimen de funcionamiento | Recarga hm³/año | Bombeo hm³/año | Descarga a la red hidrográfica hm³/año | Volumen medio almacenado por encima de la cota de desagüe hm³ | Volumen almacenado por encima de la cota de desagüe al final del periodo de simulación hm³ |
|---------------------------|-----------------|----------------|--|---|--|
| Natural                   | 5,29            | 0,00           | 5,29                                   | 1,39  | 0,73   |
| Bombeo 200 l/s            | 5,29            | 2,60           | 2,95                                   | 0,71  | -0,05  |

### **16.12. Simulación del funcionamiento del acuífero jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo bajo la hipótesis de un bombeo de 3,2 hm<sup>3</sup>/año distribuidos a lo largo de 5 meses con una cuantía mensual variable.**

Esta hipótesis de gestión reproduce el comportamiento que tendría el acuífero para una recarga natural idéntica a la acaecida durante el periodo comprendido entre octubre de 1985 y septiembre de 2017 (anexos 16.7.1a y 16.7.1b) y un aprovechamiento del acuífero de 3,2 hm<sup>3</sup>/año. La explotación propuesta solo tendría lugar durante 5 meses al año con una cuantía mensual de bombeo variable en el tiempo, que incluiría el volumen de agua que es preciso aportar a la red hidrográfica superficial para paliar posibles impactos negativos.

El ciclo de bombeo que se ha simulado en el presente apartado responde a la siguiente secuencia: 200 l/s (51.800 m<sup>3</sup>/mes) para los meses de octubre y noviembre; 250 l/s (64.700 m<sup>3</sup>/mes) para el mes de septiembre, y 300 l/s (77.000 m<sup>3</sup>/mes) para los meses de julio y agosto. La simulación realizada corresponde a un índice de aprovechamiento del acuífero del 61 por ciento.

En la figura 16.12-1 se muestra el balance hídrico para la simulación realizada entre entradas (recarga por precipitación) y salidas (bombeos y descarga a la red hidrográfica) para el periodo analizado (octubre 1985 a septiembre 2017) con indicación de la variación que tiene lugar en el almacenamiento, que ha resultado ser para la serie de 32 años analizada de 43.609 m<sup>3</sup>/mes o 523.313 m<sup>3</sup>/año a favor de las salidas (bombeos y descarga a la red fluvial), por lo que el error de cierre del balance hídrico para el periodo analizado es del 9 por ciento.

El Anexo 16.12-1 muestra los resultados obtenidos para la simulación realizada. Los valores medios para el periodo simulado son los siguientes: el nivel piezométrico medio se situó a 2,73 m por encima de la cota de desagüe; la cota piezométrica media se localizó a 802,73 m s.n.m; el volumen medio de agua descargado a la red hidrográfica fue de 215.589 m<sup>3</sup>/mes (83 l/s); el volumen medio almacenado por encima de la cota de desagüe de 545.452 m<sup>3</sup>/mes y la recarga efectiva (recarga natural menos bombeo) de 171.979 m<sup>3</sup>/mes.

La respuesta de las distintas variables representativas del funcionamiento del acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo bajo el efecto de un bombeo 250 l/s efectuado durante los meses que van de julio a noviembre se muestra en las figuras 16.12-2, 16.12-3 y 16.12-4. De la observación de dichas figuras y de la tabla 16.12-1 se deduce que la descarga a la red hidrográfica ha sido nula en 121 meses. Dicha cuantía supone un 32 por ciento sobre el total de los 384 meses simulados. No obstante, si el cálculo de dicho porcentaje se realiza sobre los 4 meses de máximo estío (agosto, septiembre, octubre y noviembre) su cuantía asciende al 94 por ciento. En los meses de septiembre la descarga a la red hidrográfica siempre ha sido nula.

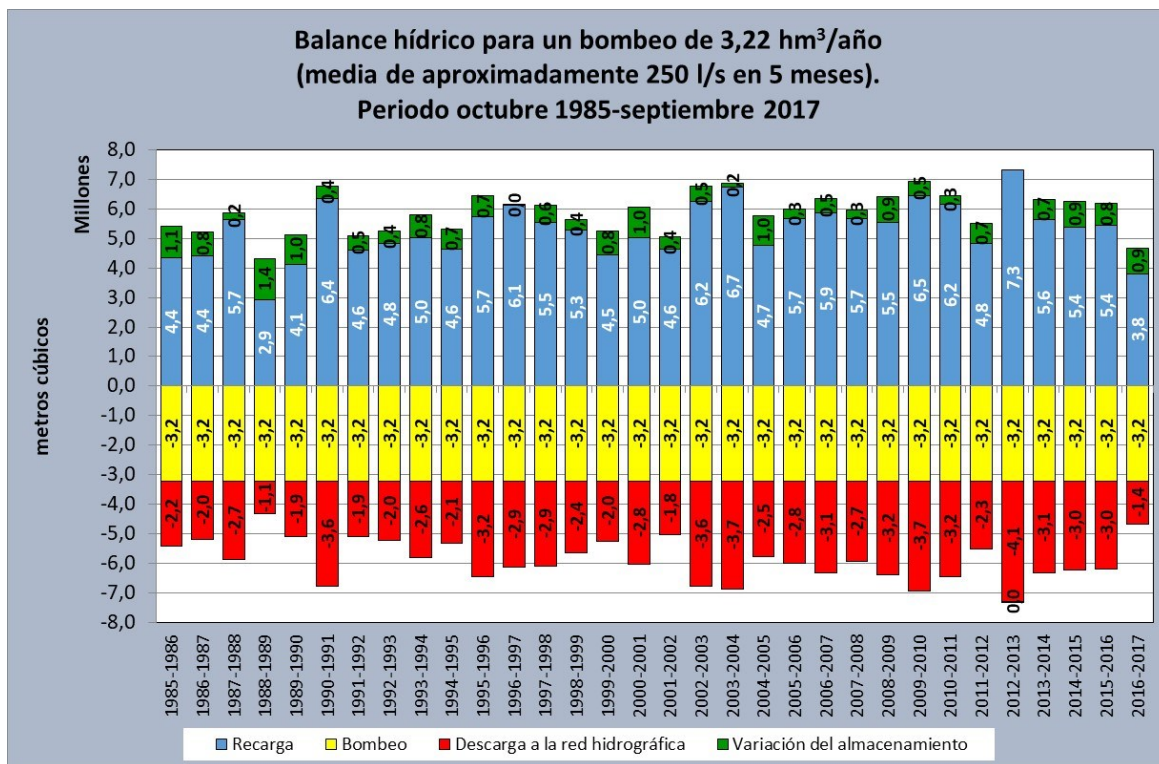


Figura 16.12-1. Balance hídrico para el periodo analizado (octubre 1985 a septiembre 2017) con representación de la variación que tiene lugar en el almacenamiento para un bombeo variable de 250 l/s de media distribuido a lo largo de 5 meses.

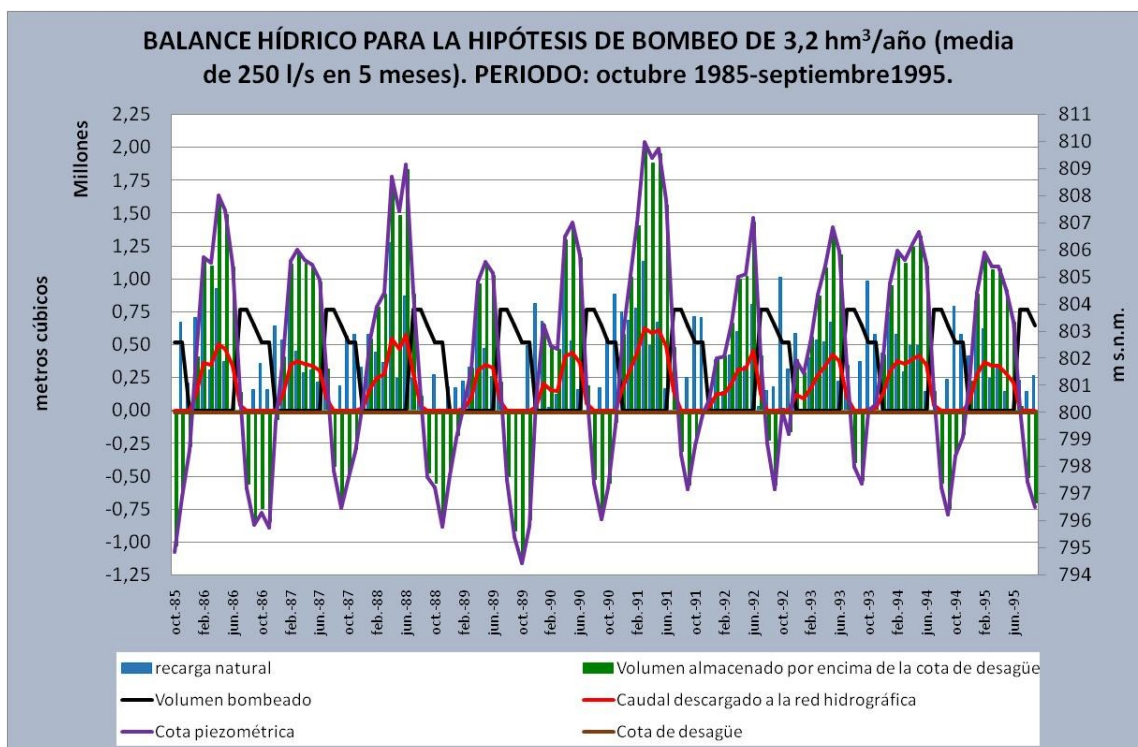
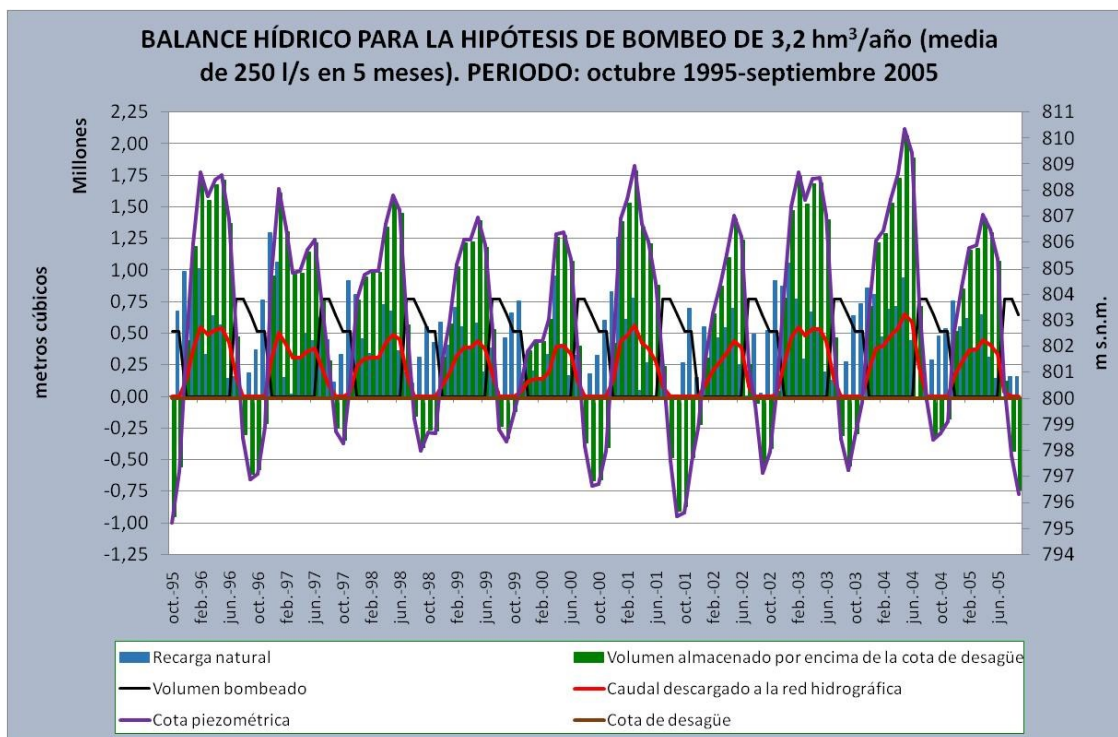
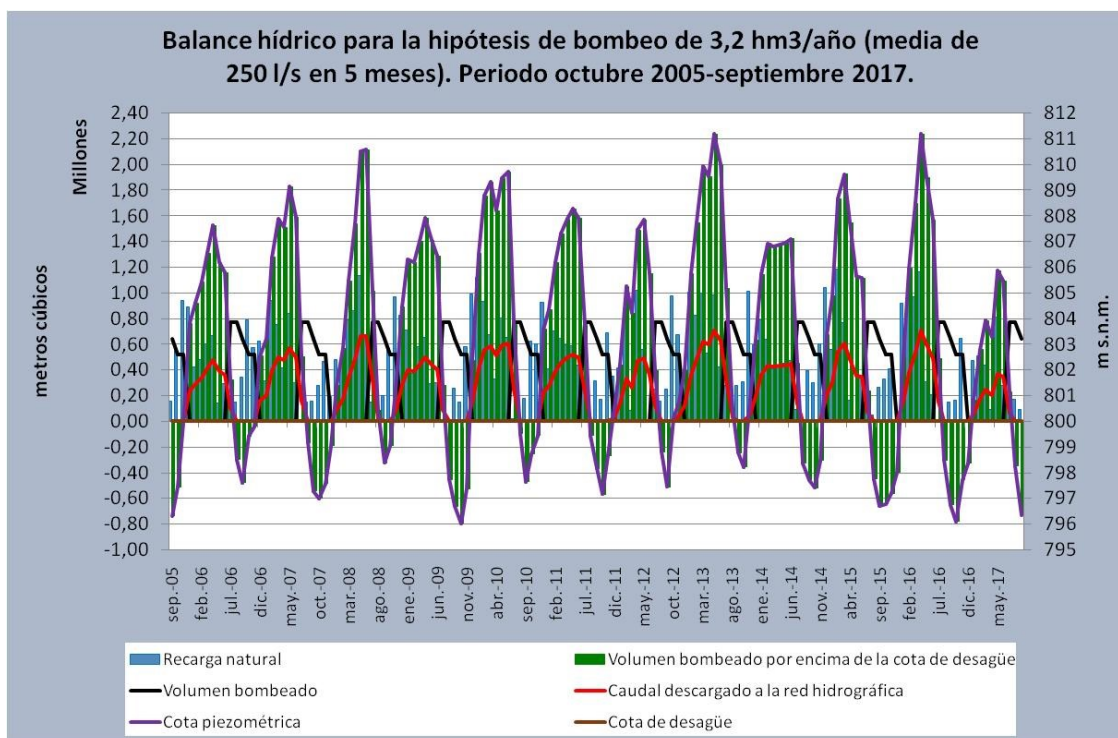


Figura 16.12-2. Evolución de las variables representativas del funcionamiento del acuífero. Bombeo de 3,2 hm<sup>3</sup>/año (250 l/s de media a lo largo de 5 meses). Periodo octubre de 1985-septiembre de 1995.





**Figura 16.12-3. Evolución de las variables representativas del funcionamiento del acuífero. Bombeo de 3,2 hm<sup>3</sup>/año (250 l/s de media a lo largo de 5 meses). Periodo octubre de 1995-septiembre de 2005.**



**Figura 16.12-4. Evolución de las variables representativas del funcionamiento del acuífero. Bombeo de 3,2 hm<sup>3</sup>/año (250 l/s de media a lo largo de 5 meses). Periodo octubre de 2005-septiembre de 2017.**

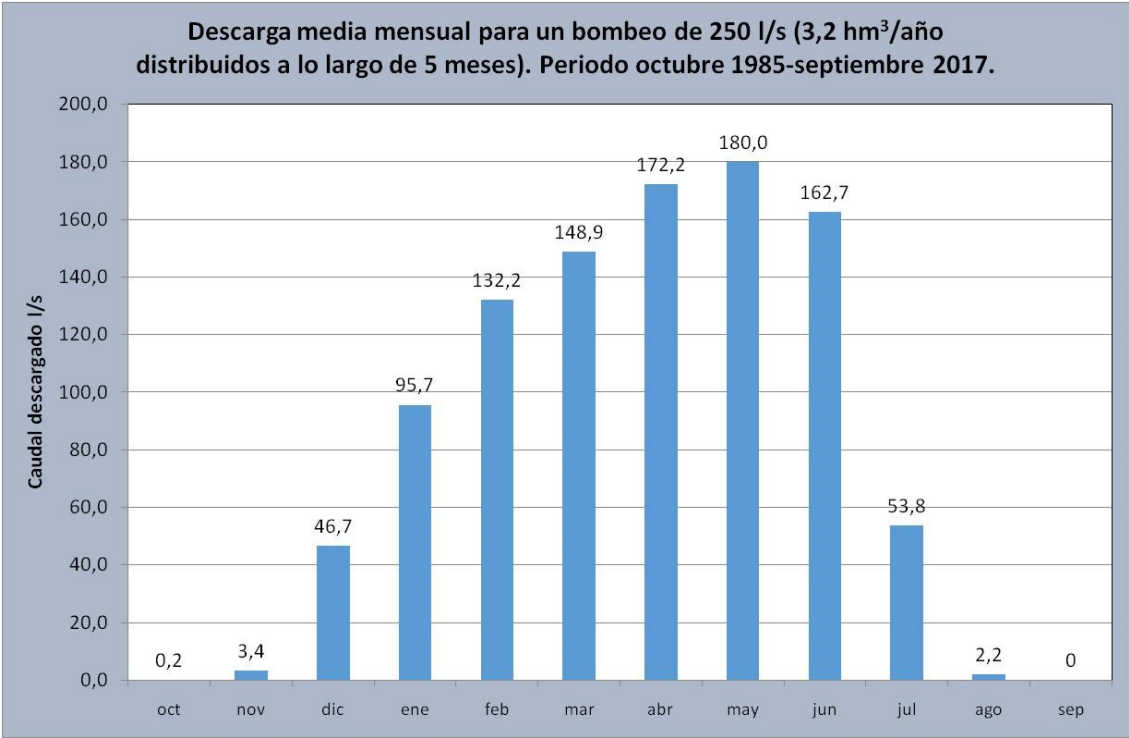
**Tabla 16.12-1 Meses con descarga nula a la red hidrográfica y con piezometría por debajo de la cota 800 ms.n.m (color ocre). Bombeo 3,2 hm<sup>3</sup>/año. (nmdn=número de meses con descarga nula y piezometría por debajo de la cota 800 m s.n.m.).**

| Año hidrológico | Meses con descarga nula a la red hidrográfica y con piezometría por debajo de la cota 800 m s.n.m (color ocre). Bombeo 3,2 hm <sup>3</sup> /año |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | nmdn |
|-----------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|                 | oct   | nov | dic | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sep |      |
| 1985-1986       | ○   | ○   | ○   | ■   | ■   | ■   | ■   | ■   | ■   | ■   | ○   | ○   | 5    |
| 1986-1987       | ○   | ○   | ○   | ■   | ■   | ■   | ■   | ■   | ■   | ■   | ○   | ○   | 5    |
| 1987-1988       | ○   | ○   | ■   | ■   | ■   | ■   | ■   | ■   | ■   | ■   | ○   | ○   | 3    |
| 1988-1989       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 6    |
| 1989-1990       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 1990-1991       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 1991-1992       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 1992-1993       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 3    |
| 1993-1994       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 2    |
| 1994-1995       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 1995-1996       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 1996-1997       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 3    |
| 1997-1998       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 3    |
| 1998-1999       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 1999-2000       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 3    |
| 2000-2001       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 2001-2002       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 2002-2003       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 3    |
| 2003-2004       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 2004-2005       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 2005-2006       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 2006-2007       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 2007-2008       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 2008-2009       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 3    |
| 2009-2010       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 2010-2011       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 2011-2012       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 2012-2013       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 1    |
| 2013-2014       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 3    |
| 2014-2015       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 4    |
| 2015-2016       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 5    |
| 2016-2017       | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   | 5    |
| nmdn            | 29  | 25  | 6   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 28  | 32  | 121  |

El comportamiento temporal de la piezometría es parejo al que presenta el drenaje del acuífero, ya que cuando la primera se sitúa por debajo de la cota de desagüe del acuífero, el segundo se anula, no volviendo a tener lugar descarga de agua a la red fluvial hasta que la cota piezometría se localiza nuevamente por encima de la cota de desagüe del acuífero. Esto implica que todo el análisis expuesto en los párrafos precedentes, para la distribución mensual y anual de la descarga a la red

hidrográfica, es también válido para la piezometría, que estará por debajo de la cota de drenaje (800 m s.n.m.) los mismos meses en que es nula la descarga de agua en el acuífero. La tabla 16.12-1 es susceptible de una doble lectura que afecta en su distribución temporal por igual a la cota piezométrica y al agua que descarga el acuífero. La máxima profundidad a la que se ha situado la lámina de agua por debajo de la cota de drenaje del acuífero es de 4,70 m y su valor medio de 1,53 m.

En la figura 16.12-5 se muestran gráficamente los valores mensuales medios de la descarga del acuífero a la red hidrográfica superficial para un bombeo de 250 l/s (3,2 hm<sup>3</sup>/año distribuidos a lo largo de 5 meses). Si se compara dicho gráfico con los correspondientes al régimen natural e influenciado para un bombeo de 70 l/s se observa una reducción significativa del caudal descargado a la red hidrográfica. Este hecho es especialmente significativo para los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre. En dichos meses el caudal medio es nulo en septiembre y prácticamente nulo en octubre, mientras que en agosto es de 2,2 l/s y en noviembre de 3,4 l/s.



**Figura 16.12-5. Descarga mensual media para un bombeo de 250 l/s (3,2 hm<sup>3</sup>/año distribuido a lo largo de 5 meses). Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

En la figura 16.12-6 se muestra el valor y la evolución del grado de afección que presenta la descarga mensual media para el periodo de estudio (octubre 1985-septiembre 2017) respecto de la descarga mensual media en régimen natural bajo la hipótesis de un bombeo de 3,2 hm<sup>3</sup>/año. Su valor se ha calculado a partir de la siguiente expresión:

$$A_j = 1 - D_{Rij} / D_{RNj}$$

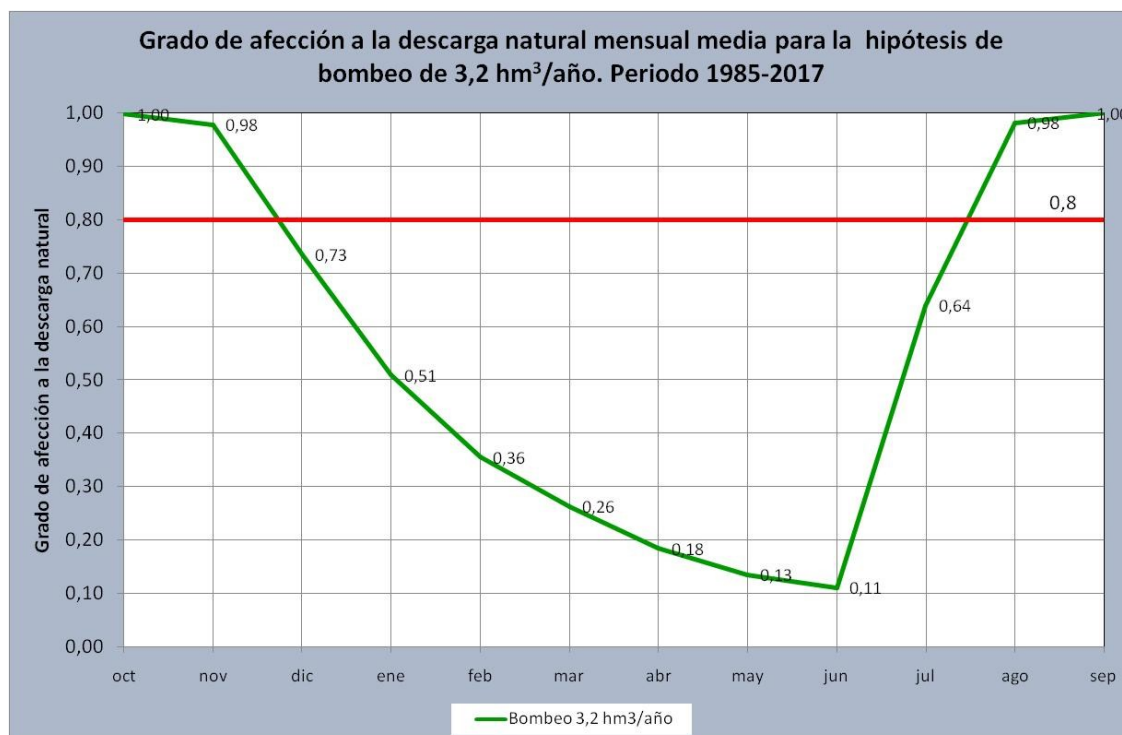
Donde:

$A_j$  es el grado de afección que presenta la descarga mensual media para el periodo de estudio en el mes  $j$  bajo una determinada hipótesis de bombeo.

$DR_{ij}$  el valor medio mensual de la descarga acaecida en régimen influenciado durante el periodo de estudio en el mes  $j$ .

y

$DR_{Nj}$  el valor medio mensual de la descarga acaecida en régimen natural durante el periodo de estudio en el mes  $j$ .



**Figura 16.12-6. Grado de afección a la descarga natural mensual media para la hipótesis de bombeo de 3,2 hm³/año. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

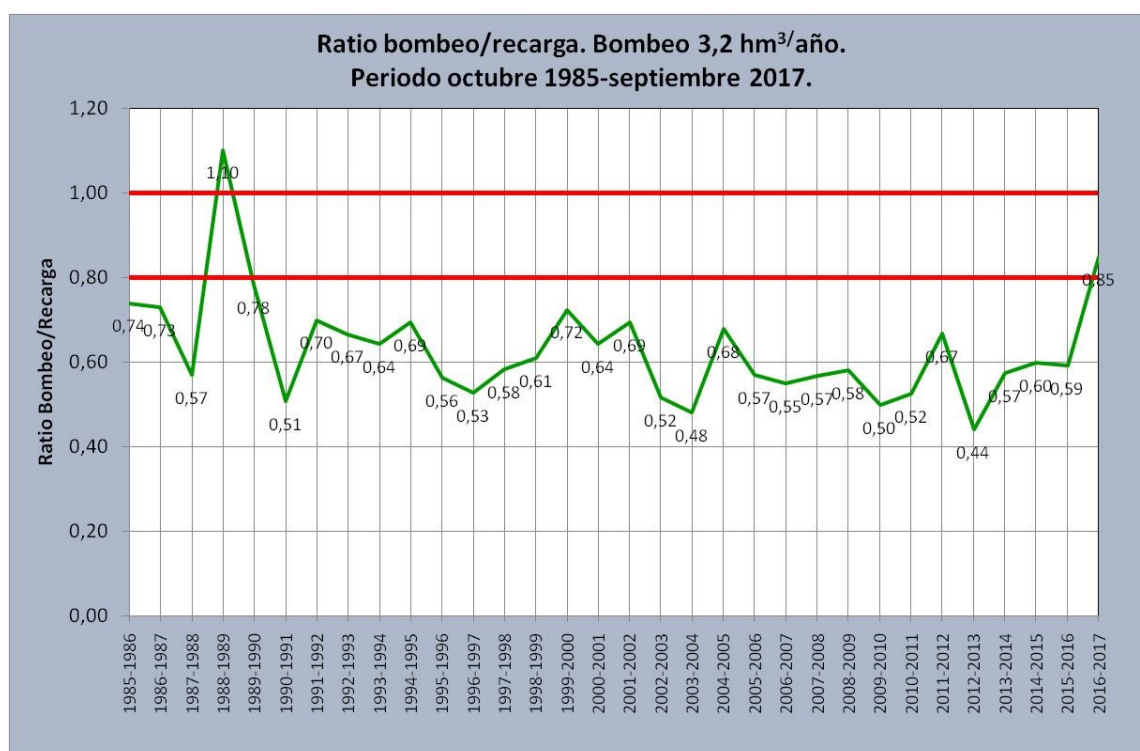
El grado de afección que se ha determinado para los distintos meses del año presenta cuatro valores superiores a 0,8 (agosto, septiembre, octubre y noviembre) y uno en torno a 0,7 (julio). Se trata de los 5 meses en que se bombea agua desde el acuífero. En el resto de los meses, que se caracterizan porque no se realiza ninguna explotación en el acuífero, el grado de afección es reducido e incluso muy bajo para los meses de febrero, marzo, abril, mayo y junio. Este comportamiento es indicativo de la rápida respuesta que presenta el acuífero ante las acciones externas y de lo difícil que resulta regular el mismo sin hacer uso del volumen almacenado por debajo de la cota de desagüe durante algunos meses del año. El valor medio del grado de afección que se ha calculado para el conjunto de los distintos meses del año es de 0,51.

En el caso concreto de la hipótesis de bombeo que se plantea sería preciso contemplar la adopción de medidas correctoras que complementen parte de los caudales que el acuífero deja de drenar de forma natural a la red hidrográfica superficial por efecto del bombeo propuesto. En la tabla 16.12-2 se realiza una

comparativa entre el caudal descargado bajo la hipótesis de bombeo de 3,2 hm<sup>3</sup>/año y la cuantía correspondiente al 20 por ciento del caudal que se descarga en régimen natural. En la misma también se muestra el caudal medio que se precisaría aportar para alcanzar una cuantía igual al 20 por ciento del caudal descargado en régimen natural.

**Tabla 16.12-2. Comparativa entre el 20% del caudal descargado en régimen natural y el caudal descargado para la hipótesis de bombeo de 3,2 hm<sup>3</sup>/año. Caudal medio que es necesario aportar para alcanzar el 20 % caudal descargado en régimen natural.**

| Concepto  | oct | nov | dic | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sep | Media |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 20 % caudal descargado en régimen natural (l/s)   | 25  | 32  | 35  | 39  | 41  | 40  | 42  | 42  | 37  | 30  | 23  | 22  | 34    |
| Caudal descargado (l/s) para la hipótesis de bombeo 3,2 hm <sup>3</sup> /año                                | 0   | 3   | 47  | 96  | 132 | 149 | 172 | 180 | 163 | 54  | 2   | 0   | 83    |
| Caudal medio (l/s) que es necesario aportar para alcanzar el 20 % del caudal descargado en régimen natural. | 25  |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 21  | 22  |       |



**Figura 16.12-7. Ratio entre un bombeo de 3,2 hm<sup>3</sup>/año y la recarga anual acaecida a lo largo del periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

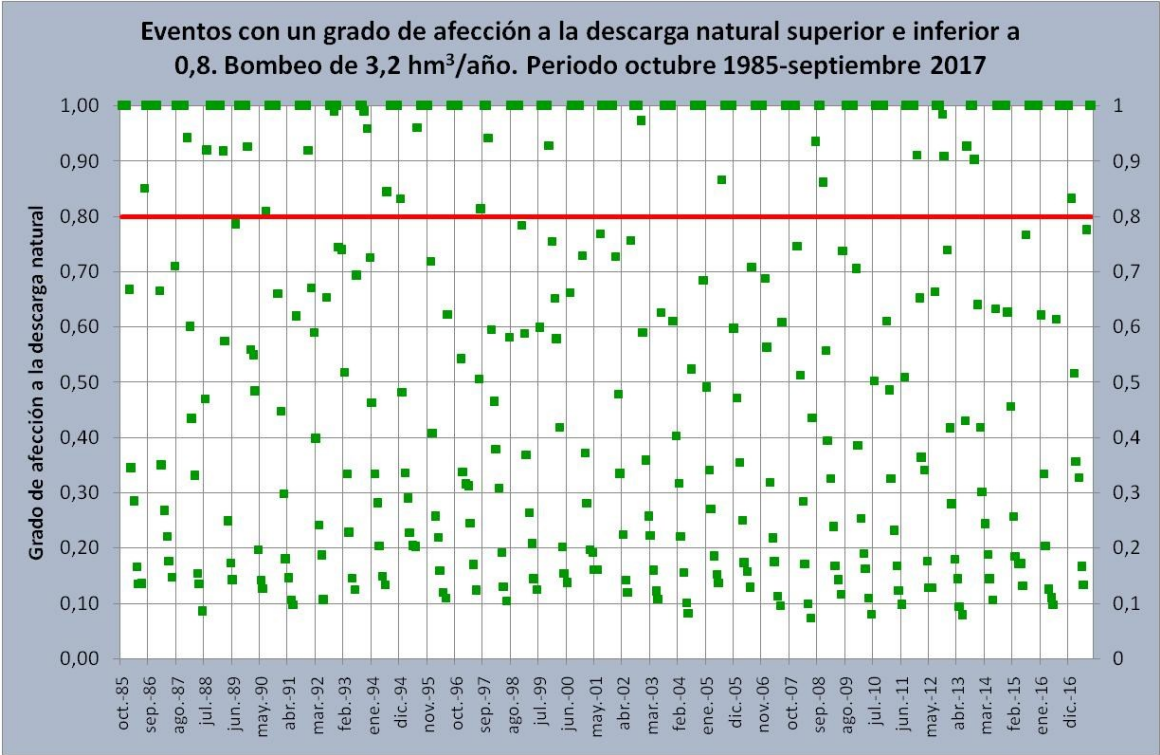
En la figura 16.12-7 se muestra el valor y evolución de la ratio entre un bombeo de 3,2 hm<sup>3</sup>/año y la recarga anual acaecida a lo largo del periodo octubre de 1985-septiembre de 2017. En la misma se observa que el índice de aprovechamiento del acuífero es inferior a 0,8, que es la tasa de explotación que se recomienda no sobrepasar para asegurar una gestión sostenible de un acuífero, salvo para los dos años hidrológicos extremadamente secos de 1988-1989 y 2016-2017 que toman en el primer caso un valor superior a 1, concretamente 1,10, y en el segundo un valor ligeramente superior a 0,8, concretamente 0,85. A lo largo de la mayor parte



de los 32 años que se han analizado el índice de aprovechamiento toma valores inferiores o próximos a 0,7.

La existencia de dos años hidrológicos que presenta un índice de aprovechamiento superior a 0,8, aunque uno de ellos sea ligeramente superior a 1, no constituye un hándicap que ponga en peligro la realización de un aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos del acuífero bajo la hipótesis de un bombeo de 250 l/s, que solo tendría lugar durante 5 meses al año.

En la figura 16.12.8 se muestran los eventos que presentan una afección superior a 0,8 para el periodo octubre 1985-septiembre 2017. El número de los mismos ascienden a 148, que sobre el total de meses analizados para todo el periodo simulado representan un porcentaje del 39 por ciento, por lo que aproximadamente durante algo más de un tercio del tiempo que se ha simulado habría que aportar un cierto caudal de apoyo a la descarga de agua subterránea que alimenta a la red hidrográfica superficial. Dicho porcentaje se concentra mayoritariamente durante los meses de agosto, septiembre y octubre.

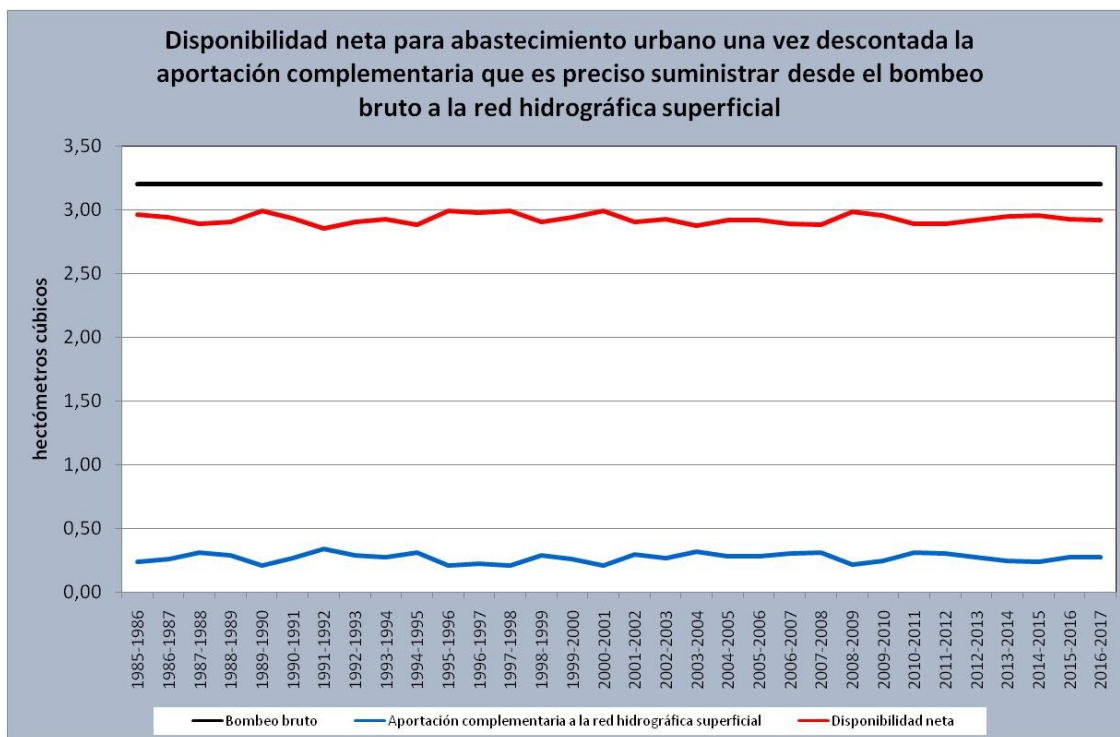


**Figura 16.12.8. Eventos con un grado de afección a la descarga natural superior e inferior a 0,8. Bombeo 3,2 hm<sup>3</sup>/año. Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

La secuencia temporal con la que se producen estos eventos, junto con la cuantía del caudal que habría que aportar para alcanzar el 20% del caudal descargado en régimen natural, se muestra en el anexo 16-11-2. En el mismo también se suministra el grado de afección a la descarga natural que se produce en cada evento. Como media habría que aportar a cada evento con un grado de afección superior a 0,8 un caudal de 22,69 l/s.

**Tabla 16.12-3. Disponibilidad neta para abastecimiento urbano una vez descontada la aportación complementaria que es preciso suministrar desde el bombeo bruto a la red hidrográfica superficial.**

| Año hidrológico | Bombeo bruto hm <sup>3</sup> /año | Aportación complementaria a la red hidrográfica superficial hm <sup>3</sup> /año | Disponibilidad neta hm <sup>3</sup> /año |
|-----------------|-----------------------------------|--|--|
| 1985-1986       | 3,20                              | 0,24   | 2,96                                     |
| 1986-1987       | 3,20                              | 0,26   | 2,94                                     |
| 1987-1988       | 3,20                              | 0,31   | 2,89                                     |
| 1988-1989       | 3,20                              | 0,29   | 2,91                                     |
| 1989-1990       | 3,20                              | 0,21   | 2,99                                     |
| 1990-1991       | 3,20                              | 0,27   | 2,93                                     |
| 1991-1992       | 3,20                              | 0,34   | 2,86                                     |
| 1992-1993       | 3,20                              | 0,29   | 2,91                                     |
| 1993-1994       | 3,20                              | 0,27   | 2,93                                     |
| 1994-1995       | 3,20                              | 0,31   | 2,89                                     |
| 1995-1996       | 3,20                              | 0,21   | 2,99                                     |
| 1996-1997       | 3,20                              | 0,22   | 2,98                                     |
| 1997-1998       | 3,20                              | 0,21   | 2,99                                     |
| 1998-1999       | 3,20                              | 0,29   | 2,91                                     |
| 1999-2000       | 3,20                              | 0,26   | 2,94                                     |
| 2000-2001       | 3,20                              | 0,21   | 2,99                                     |
| 2001-2002       | 3,20                              | 0,29   | 2,91                                     |
| 2002-2003       | 3,20                              | 0,27   | 2,93                                     |
| 2003-2004       | 3,20                              | 0,32   | 2,88                                     |
| 2004-2005       | 3,20                              | 0,28   | 2,92                                     |
| 2005-2006       | 3,20                              | 0,28   | 2,92                                     |
| 2006-2007       | 3,20                              | 0,31   | 2,89                                     |
| 2007-2008       | 3,20                              | 0,31   | 2,89                                     |
| 2008-2009       | 3,20                              | 0,22   | 2,98                                     |
| 2009-2010       | 3,20                              | 0,24   | 2,96                                     |
| 2010-2011       | 3,20                              | 0,31   | 2,89                                     |
| 2011-2012       | 3,20                              | 0,31   | 2,89                                     |
| 2012-2013       | 3,20                              | 0,28   | 2,92                                     |
| 2013-2014       | 3,20                              | 0,25   | 2,95                                     |
| 2014-2015       | 3,20                              | 0,24   | 2,96                                     |
| 2015-2016       | 3,20                              | 0,27   | 2,93                                     |
| 2016-2017       | 3,20                              | 0,28   | 2,92                                     |
| Promedio        | 3,20                              | 0,27   | 2,93                                     |



**Figura 16.12-9. Disponibilidad neta para abastecimiento urbano una vez descontada la aportación complementaria que es preciso suministrar desde el bombeo bruto a la red hidrográfica superficial. Bombeo bruto de 3,2 hm³/año.**

En la tabla 16.12-3 se indica, para los diferentes años hidrológicos que se han simulado, la cuantía del bombeo neto disponible para abastecimiento urbano una vez descontada la aportación complementaria que es preciso suministrar desde el bombeo bruto a la red hidrográfica superficial. En dicha tabla se observa que el bombeo bruto medio se reduce en tan solo 27 centésimas de hectómetro cúbico por lo que la cuantía media neta disponible para abastecimiento urbano es de 2,93 hm³/año.

La figura 16.12-9 se ha realizado al objeto de mostrar de manera visual la relación que existe entre la disponibilidad neta para abastecimiento urbano, la aportación complementaria que es preciso suministrar a la red hidrográfica superficial y el bombeo bruto que se ejerce sobre el acuífero.

En la tabla 16.12-4 se realiza una síntesis comparativa entre las simulaciones realizadas para el régimen natural y la correspondiente a un bombeo de 250 l/s. De los resultados contemplados en la misma, así como del análisis de las figuras 16.12-6 y 16.12-7 se desprende que se puede plantear un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos del acuífero. Por supuesto, siempre dentro de una gestión razonable y racional que optimice y proporcione una mayor garantía de satisfacción de las posibles demandas que se puedan producir.

**Tabla 16.12-4. Síntesis comparativa entre la simulación realizada para el régimen natural y la correspondiente a un bombeo de 250 l/s (3,2 hm<sup>3</sup>/año distribuido a lo largo de 5 meses). Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

| Régimen de funcionamiento | Recarga hm <sup>3</sup> /año | Bombeo hm <sup>3</sup> /año | Descarga a la red hidrográfica hm <sup>3</sup> /año | Volumen medio almacenado por encima de la cota de desagüe hm <sup>3</sup> | Volumen almacenado por encima de la cota de desagüe al final del periodo de simulación hm <sup>3</sup> |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|---|--|
| Natural                   | 5,29                         | 0,00                        | 5,29  | 1,39  | 0,73   |
| Bombeo 250 l/s            | 5,29                         | 3,20                        | 2,59  | 0,55  | -0,07  |

### 16.13. Resumen

El acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo se ha simulado utilizando un modelo unicelular. Este tipo de modelos tienen la ventaja de ser muy sencillos y la desventaja de simplificar excesivamente el sistema hídrico que se quiere simular. Entre las críticas que se les imputan se encuentran las siguientes:

- 1) Compendian excesivamente el sistema hídrico que se simula.
- 2) Solo proporcionan valores medios de las variaciones piezométricas e intercambios de flujo de agua con el sistema superficial.
- 3) No tienen en cuenta la distancia de los pozos a los ríos y/o a los manantiales.
- 4) No contemplan la distribución espacial de las acciones externas que tienen lugar sobre el acuífero.
- 5) Utilizan muy pocos parámetros que globalizan el comportamiento del acuífero.

Los modelos unicelulares a veces proporcionan resultados que están alejados de la realidad o no son lo suficientemente exactos, por lo que en esos casos no constituyen la herramienta adecuada para analizar las hipótesis de gestión hídrica que se plantean. En otras ocasiones, en cambio, proporcionan una aproximación suficientemente precisa que da respuesta a los objetivos y preguntas que se formulan. Por último, en algunos casos, se diseñan como una herramienta previa a partir de la cual plantear, en función de los resultados que proporcionan, si es preciso abordar la realización de modelos numéricos de una mayor complejidad, como los de flujo de parámetros distribuidos, ya que estos precisan de muchos datos, implican una ingente cantidad esfuerzo y tiempo de realización, y precisan de un elevado aporte económico para su correcta ejecución.

En el presente trabajo el modelo unicelular que se ha llevado a efecto se ha afrontado con un doble objetivo. Primero dar respuesta -si ello era posible- a las dudas existentes; y segundo -si lo anterior no era factible- analizar la viabilidad de realizar con éxito un modelo de flujo de parámetros distribuidos, ya que tanto la complejidad técnica de las acciones que se está llevando a efecto, como de la problemática socio-medioambiental que existe en la zona, justificarían sobradamente la ejecución del mismo y la inversión económica que se precisa realizar.

La formulación matemática en la que se fundamentan los modelos unicelulares se ha programado en el presente estudio sobre una hoja EXCEL de acuerdo a las siguientes consideraciones:

- 1) El acuífero se recarga solo a partir de la precipitación que cae sobre los afloramientos permeables del mismo.
- 2) La descarga tiene lugar de forma puntual a través de uno o varios manantiales que el modelo unifica en un único punto de drenaje.
- 3) El modelo solo contempla cesión de agua desde el acuífero a los ríos Tirón, Oja, Santurdejo y Ciloría a través de manantiales. En ningún caso tiene presente que puedan existir transferencias de agua entre los ríos y el acuífero de forma que los primeros aporten agua al segundo por efecto de los bombeos que puedan tener lugar en el acuífero. La transferencia de agua solo se contempla en un único sentido que es el determinado por el flujo que tiene lugar entre el acuífero y la red fluvial.

Como datos de partida el modelo necesita conocer la serie de recarga al acuífero, el coeficiente de agotamiento y el volumen inicial almacenado por encima de la cota de desagüe. Así mismo se precisa definir el periodo de simulación, que en el presente caso ha estado comprendido inicialmente entre octubre de 1980 y septiembre de 2017.

La serie de recarga al acuífero, que se ha utilizado durante el proceso de modelación, ha sido la obtenida mediante el empleo del código Visual Balance, ya que se ha estimado que constituye la metodología más contrastada de entre todas las aplicadas durante el presente proyecto. Su valor medio anual para el periodo de cálculo anteriormente referenciado es de 5,25 hm<sup>3</sup>/año. Sus valores extremos se han obtenido para el año 1988-1989 con 2,9 hm<sup>3</sup>/año y para el año 2012-2013 con 7,3 hm<sup>3</sup>/año.

Otros datos de partida y de calibración han sido los siguientes: superficie de afloramientos permeables: 19.970.000 m<sup>2</sup>; cota piezométrica inicial 805,64 m s.n.m.; cota de desagüe 800 m s.n.m.; altura inicial de la lámina de agua sobre la cota de desagüe 5,64 m; volumen inicial almacenado sobre la cota de desagüe 1.126.308 m<sup>3</sup>; coeficiente de almacenamiento 0,01; coeficiente de agotamiento o de desagüe 0,0105 días<sup>-1</sup>; periodo de calibración: abril 2002-mayo 2017. El mejor coeficiente de correlación que se ha podido conseguir entre la piezometría medida y la simulada ha sido de 0,72.

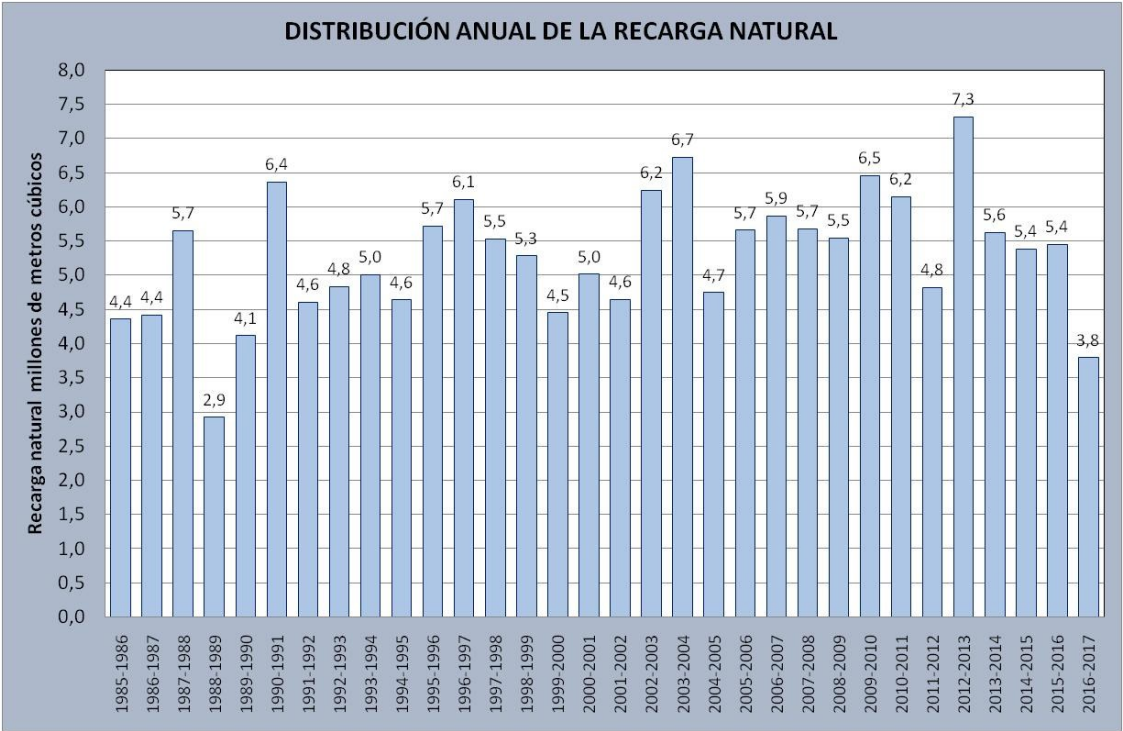
De acuerdo con los datos de partida que precisa el modelo matemático unicelular para poder operarlo y de los valores que se han obtenido durante la etapa de calibración, se puede afirmar que se trata de un acuífero que presenta una respuesta muy rápida entre los procesos de recarga y descarga, pues su periodo de semivaciado o semiagotamiento es de 66 días.

Se ha determinado que el periodo de validez del modelo se inicia en el mes de octubre de 1985, por lo que la serie temporal que se debe utilizar en el análisis de los resultados se limita al periodo comprendido entre octubre de 1985 y septiembre de 2017. La serie final con la que se ha operado se ha circunscrito a un periodo temporal de 32 años hidrológicos.



El nuevo valor medio que se obtiene para la recarga natural al acuífero, para periodo comprendido entre octubre de 1985 y septiembre de 2017, es de 5,29 hm<sup>3</sup>/año. Dicha cuantía es superior en cuatro centésimas de hectómetro cúbico a la obtenida con anterioridad a la determinación del periodo de validez del modelo y no implica por tanto una modifica sustancial del valor inicialmente calculado. El incremento que se detecta es únicamente fruto de que tres de los cinco años, que han sido precisos eliminar para alcanzar el periodo de estabilización del modelo, eran de tipología seca, mientras que los otros dos eran de tipología media y húmeda.

En las figuras 16.13-1 y 16.13-2 se muestran la distribución anual y mensual media de la recarga natural para el periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.

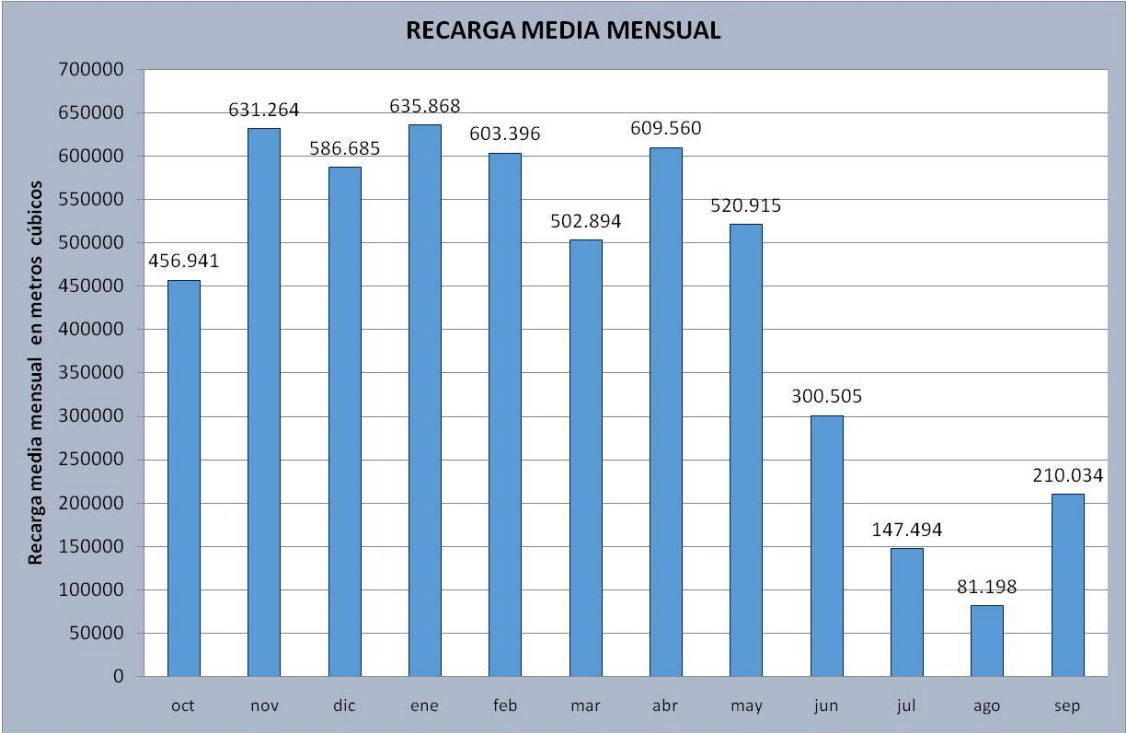


**Figura 16.13-1. Distribución anual de la recarga natural para el periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

En la primera de ellas se observa que al inicio de la serie se concentran cuatro de los cinco años más secos que se presentan en el periodo estudiado. El quinto, que corresponde al segundo más seco de toda la serie analizada, es el año hidrológico 2016-2017. Por debajo del valor medio de 5,29 hm<sup>3</sup>/año se detectan 15 años hidrológicos, aunque es preciso puntualizar que no se distribuyen uniformemente a lo largo del tiempo, pues diez de ellos se localizan en la primera mitad del periodo analizado. Así que el ciclo estudiado presenta dos partes claramente diferenciadas. Una primera que permite analizar las situaciones menos propicias a la explotación del acuífero y una segunda que habilita el estudio de las más favorables.

La figura 16.13-2, que muestra la distribución mensual media de la recarga natural para el periodo octubre de 1985-septiembre de 2017, permite apreciar la existencia de una serie de meses, que abarcan de noviembre a mayo, que presentan un valor de la recarga natural entre quinientos mil y seiscientos mil metros cúbicos, y otro,

correspondiente a los meses de estío, donde el valor de la recarga disminuye drásticamente, alcanzando un mínimo en el mes de agosto casi ocho veces inferior al valor máximo que se presenta en el mes de enero. Los meses de junio y octubre con valores de la recarga natural superiores a trescientos mil metros cúbicos, pero inferiores a quinientos mil, serían representativos de una situación intermedia. La distribución de la recarga natural anteriormente descrita evidencia que ante la solicitud de una explotación del acuífero de una cuantía media, pero concentrada en los meses de menor recarga, es de prever, dado el alto valor del coeficiente de agotamiento del mismo, situaciones significativas de descensos del nivel piezométrico, así como de disminución del caudal de la descarga natural que tiene lugar a través de los manantiales o directamente a los ríos, ya que este efecto también se produce de forma natural en el acuífero como se aprecia cuando se analizan los anexos 16.7-1a, 16.7-1b, 16.7-2a y 16.7-2b.



**Figura 16.13-1. Distribución mensual media de la recarga natural para el periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, el acuífero se caracteriza por presentar un hidrodinamismo que no favorece o posibilita una propuesta de aprovechamiento hídrico sencilla. Esto no constituye un inconveniente para lograr una gestión del mismo dentro de un marco de sostenibilidad que satisfaga determinados valores de la demanda con un índice de garantía total.

A este respecto se han planteado seis hipótesis de simulación:

- 1) Funcionamiento del acuífero Jurásico en régimen natural.

Esta hipótesis de simulación reproduce el comportamiento que tendría el acuífero cuando no está sometido a ningún tipo de acción externa. Su objetivo es generar series de datos no influenciados que constituyan una

base de referencia sobre la que poder comparar los resultados que proporcionan el resto de las simulaciones que se analizan.

- 2) Funcionamiento del acuífero Jurásico bajo la influencia de los bombeos reales realizados en el pozo San Torcuato durante el periodo octubre de 2016-septiembre 2017.

Esta hipótesis de simulación tiene por objeto reproducir el comportamiento del acuífero bajo la acción del bombeo acaecido durante el periodo octubre de 2016-septiembre 2017 y comparar los resultados que se obtienen con los proporcionados por el régimen natural. Analiza el comportamiento de las siguientes variables: volumen almacenado por encima y por debajo de la cota de desagüe del acuífero; evolución del nivel piezométrico y caudal descargado a la red hidrográfica superficial.

- 3) Funcionamiento del acuífero Jurásico bajo una hipótesis de bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año (70 l/s continuos a lo largo del año).

Esta hipótesis de gestión tiene por objeto reproducir el comportamiento que tendría el acuífero para una explotación continuada de 70 l/s, que es el volumen concesional otorgado temporalmente por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) como apoyo a la demanda de agua con destino al abastecimiento de la mancomunidad del río Oja.

- 4) Funcionamiento del acuífero Jurásico bajo una hipótesis de bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año (145 l/s continuos a lo largo del año).

Esta hipótesis de gestión tiene por objeto reproducir el comportamiento que tendría el acuífero para una explotación continuada de 145 l/s (4,5 hm<sup>3</sup>/año), que es el volumen de agua que se baraja como necesario para satisfacer la demanda de abastecimiento a la mancomunidad del río Oja en los próximos años según la Dirección General de Calidad Ambiental y Agua del Gobierno de La Rioja.

- 5) Funcionamiento del acuífero Jurásico bajo una hipótesis de bombeo de 2,6 hm<sup>3</sup>/año (200 l/s distribuido a lo largo de 5 meses).

El objetivo de esta simulación es plantear una alternativa más racional y coherente de gestión de los recursos hídricos mediante la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas. Así, en los meses de invierno y primavera la demanda se satisfaría a partir de recursos superficiales captados directamente en el río Oja, bien mediante un azud que derive agua desde su cauce o bien mediante la construcción de zanjas subterráneas transversales o perpendiculares al lecho del río. En los meses de verano y principio del otoño la demanda de agua se solventaría mediante bombeo en diferentes sondeos perforados en el acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo. La explotación propuesta precisaría de un caudal continuo de bombeo de agua de 200 l/s que solo tendría lugar durante 5 meses.

Dado que el bombeo que se propone realizar es relativamente intenso y concentrado en el tiempo, ya que, como se ha comentado, se limita a cinco meses, se precisará hacer uso de la técnica que se denomina utilización esporádica de reservas, que consiste en bombear durante los años secos un volumen de agua superior a la recarga natural y en los húmedos uno inferior. Esta forma de actuar tiene como objetivo compensar el déficit que se produce en los años secos con el superávit que tiene lugar en los húmedos, por lo que el balance hídrico entre la recarga y los bombeos, al final de un ciclo hiperanual suficientemente largo y representativo de todas las tipologías climáticas que pueden tener lugar, siempre sea positivo en mayor o en menor medida. La misma filosofía se puede aplicar dentro de un mismo año hidrológico a los meses lluviosos y secos.

La anterior forma de actuar, dependiendo de la mayor o menor inercia que tenga el acuífero, puede dar lugar, durante un cierto tiempo, al secado de alguna o todas las descargas de agua subterránea, que de forma difusa o puntual alimentan a la red fluvial, por lo que debe preverse alguna forma de paliación o compensación de las posibles consecuencias que se pudieran derivar, que se puede llevar a efecto vertiendo en los cauces, que potencialmente pudieran verse implicados, una parte del caudal bombeado durante el tiempo que dura la afección.

En relación con lo expuesto es importante no confundir sobreexplotación y uso esporádico de reservas, ya que la diferencia entre ambos conceptos es sustancial, puesto que el primero no asegura a largo plazo ni el aprovechamiento ni la sostenibilidad del recurso hídrico, mientras que el segundo sí lo hace.

6) Funcionamiento del acuífero Jurásico bajo una hipótesis de bombeo de 3,2 hm<sup>3</sup>/año (250 l/s distribuido a lo largo de 5 meses).

Esta hipótesis plantea el mismo esquema de gestión que la anterior, pero introduciendo algunas pequeñas modificaciones. Así, la cuantía de agua a bombear sería variable para cada uno de los 5 meses en que se explotaría el acuífero. El bombeo se iniciaría en el mes de julio y se finalizaría a finales de noviembre. Este cambio se debe a que se piensa que este régimen de bombeo se adaptaría mejor a la demanda que es preciso satisfacer con agua subterránea, ya que por el cauce del río Oja suele circular agua hasta bien entrado el mes de julio.

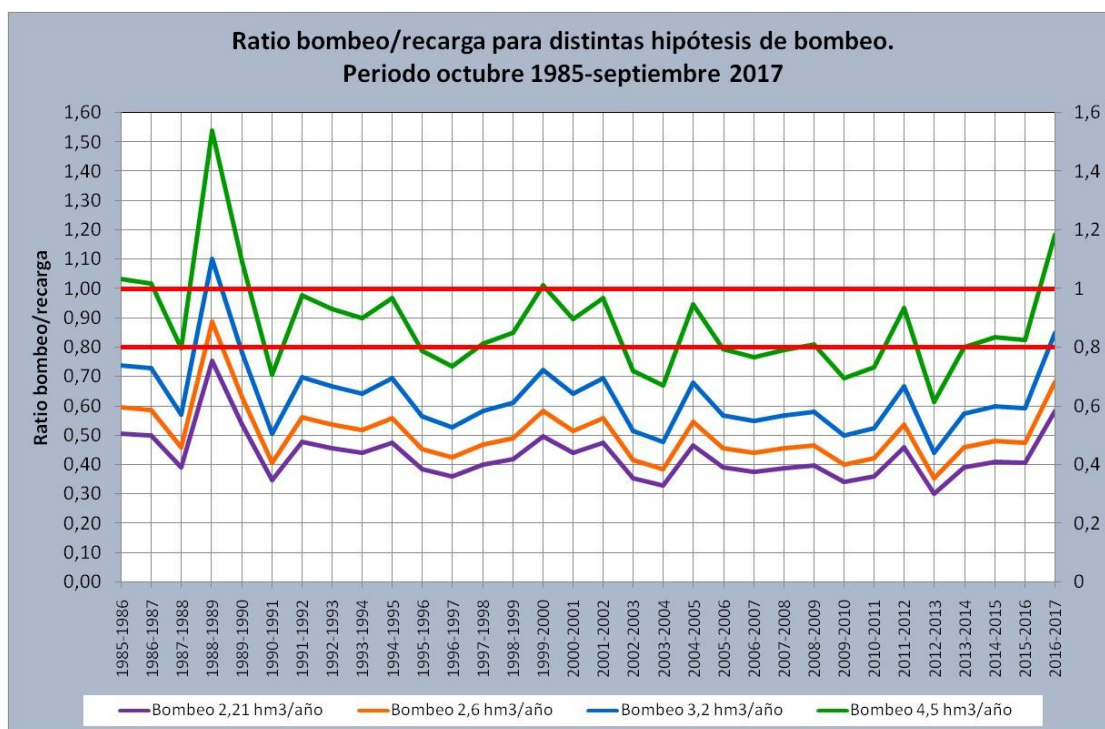
Los resultados que proporcionan dichas hipótesis de simulación se sintetizan en la tabla 16.13-1. Las cifras que figuran en la misma corresponden a valores anuales medios obtenidos para el periodo de simulación octubre de 1985-septiembre de 2017, salvo la hipótesis correspondiente al bombeo de 58 l/s que se simuló para el periodo octubre de 2016-septiembre de 2017.

**Tabla 16.13-1. Comparativa de las diferentes hipótesis de simulación planteadas (Valor medio anual). Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017 salvo para la simulación correspondiente al bombeo de 58 l/s que se simuló para el periodo octubre de 2016-septiembre de 2017.**

| Régimen de funcionamiento | Entradas al acuífero                 | Salidas del acuífero |                |                              |                                |     | Volumen almacenado por encima de la cota de desagüe (hm <sup>3</sup> ) | Cota Piezométrica m s.n.m. | Altura del agua sobre la cota de desagüe m |
|---------------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------|------------------------------|--------------------------------|-----|--|----------------------------|--|
|                           | Recarga natural hm <sup>3</sup> /año | Bombeo               |                |                              | Descarga a la red hidrográfica |     |  |                            |  |
|                           |                                      | Régimen              | Duración meses | Cuantía hm <sup>3</sup> /año | hm <sup>3</sup> /año           | l/s |  |                            |  |
| Natural                   | 5,29                                 |                      |                |                              | 5,29                           | 170 | 1,40   | 807,00                     | 7,00                                       |
| Bombeo 58 l/s             | 3,79                                 | V                    | 12             | 1,80                         | 2,40                           | 77  | 0,64   | 803,19                     | 3,19                                       |
| Bombeo 70 l/s             | 5,29                                 | C                    | 12             | 2,21                         | 3,08                           | 99  | 0,81   | 804,09                     | 4,09                                       |
| Bombeo 145 l/s            | 5,29                                 | C                    | 12             | 4,50                         | 0,95                           | 37  | 0,21   | 801,04                     | 1,04                                       |
| Bombeo 200 l/s            | 5,29                                 | C                    | 5              | 2,60                         | 2,95                           | 95  | 0,71   | 803,56                     | 3,56                                       |
| Bombeo 250 l/s            | 5,29                                 | V                    | 5              | 3,20                         | 2,59                           | 83  | 0,55   | 802,73                     | 2,73                                       |

V La cuantía del bombeo toma un valor distinto en cada uno de los meses del año.

C La cuantía del bombeo es la misma durante todos los meses del año y durante todo el periodo de simulación.



**Figura 16.13-3. Evolución de la ratio bombeo/recarga para distintas hipótesis de bombeo. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

En relación con esta última simulación, que responde a la situación real de aprovechamiento llevada a cabo en el acuífero durante el año hidrológico 2016-2017, cabe indicar que el grado de explotación del acuífero se puede catalogar de reducido, ya que se encuentra por debajo de 0,5, por lo que la explotación planteada hasta la fecha es susceptible de mejora. El aprovechamiento de los recursos del acuífero fue del 48 por ciento, si el cálculo se realiza sobre la recarga natural que tuvo lugar en el periodo octubre de 2016 a septiembre de 2017, que fue de 3,79 hm<sup>3</sup>/año, y del 34 por ciento, si dicho cálculo se efectúa respecto a la recarga media



estimada para el periodo comprendido entre octubre de 1985 y septiembre de 2017, que es de 5,29 hm<sup>3</sup>/año.

**Tabla 16.13-2. Ratio entre distintas hipótesis de bombeo y la recarga natural acaecida durante el periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

| Año hidrológico | Hipótesis de bombeo (hm <sup>3</sup> /año) |      |      |      | Tipología climática |
|-----------------|--|------|------|------|---------------------|
|                 | 2,21                                       | 2,6  | 3,2  | 4,5  |                     |
| 1985-1986       | 0,51                                       | 0,59 | 0,74 | 1,03 | Muy seco            |
| 1986-1987       | 0,50                                       | 0,59 | 0,73 | 1,02 | Muy seco            |
| 1987-1988       | 0,39                                       | 0,46 | 0,57 | 0,80 | Medio               |
| 1988-1989       | 0,76                                       | 0,89 | 1,10 | 1,54 | Muy seco            |
| 1989-1990       | 0,54                                       | 0,63 | 0,78 | 1,09 | Seco                |
| 1990-1991       | 0,35                                       | 0,41 | 0,51 | 0,71 | Medio               |
| 1991-1992       | 0,48                                       | 0,56 | 0,70 | 0,98 | Medio               |
| 1992-1993       | 0,46                                       | 0,54 | 0,67 | 0,93 | Medio               |
| 1993-1994       | 0,44                                       | 0,52 | 0,64 | 0,90 | Seco                |
| 1994-1995       | 0,48                                       | 0,56 | 0,69 | 0,97 | Seco                |
| 1995-1996       | 0,39                                       | 0,45 | 0,56 | 0,79 | Medio               |
| 1996-1997       | 0,36                                       | 0,42 | 0,53 | 0,74 | Húmedo              |
| 1997-1998       | 0,40                                       | 0,47 | 0,58 | 0,81 | Medio               |
| 1998-1999       | 0,42                                       | 0,49 | 0,61 | 0,85 | Medio               |
| 1999-2000       | 0,50                                       | 0,58 | 0,72 | 1,01 | Seco                |
| 2000-2001       | 0,44                                       | 0,52 | 0,64 | 0,90 | Medio               |
| 2001-2002       | 0,48                                       | 0,56 | 0,69 | 0,97 | Seco                |
| 2002-2003       | 0,35                                       | 0,41 | 0,52 | 0,72 | Húmedo              |
| 2003-2004       | 0,33                                       | 0,39 | 0,48 | 0,67 | Húmedo              |
| 2004-2005       | 0,46                                       | 0,55 | 0,68 | 0,95 | Muy seco            |
| 2005-2006       | 0,39                                       | 0,46 | 0,57 | 0,79 | Muy Húmedo          |
| 2006-2007       | 0,38                                       | 0,44 | 0,55 | 0,77 | Muy Húmedo          |
| 2007-2008       | 0,39                                       | 0,46 | 0,57 | 0,79 | Muy Húmedo          |
| 2008-2009       | 0,40                                       | 0,47 | 0,58 | 0,81 | Medio               |
| 2009-2010       | 0,34                                       | 0,40 | 0,50 | 0,70 | Muy Húmedo          |
| 2010-2011       | 0,36                                       | 0,42 | 0,52 | 0,73 | Muy Húmedo          |
| 2011-2012       | 0,46                                       | 0,54 | 0,67 | 0,93 | Medio               |
| 2012-2013       | 0,30                                       | 0,35 | 0,44 | 0,61 | Muy Húmedo          |
| 2013-2014       | 0,39                                       | 0,46 | 0,57 | 0,80 | Húmedo              |
| 2014-2015       | 0,41                                       | 0,48 | 0,60 | 0,84 | Húmedo              |
| 2015-2016       | 0,41                                       | 0,48 | 0,59 | 0,83 | Medio               |
| 2016-2017       | 0,58                                       | 0,68 | 0,85 | 1,19 | Seco                |
| Promedio        | 0,49                                       | 0,57 | 0,71 | 0,99 |                     |

Por lo que respecta al grado de aprovechamiento que se lograría para el resto de las hipótesis de bombeo cabe indicar que el mismo sería del 42 por ciento para la hipótesis de bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año, del 49 por ciento para la de 2,6 hm<sup>3</sup>/año, del

61 por ciento para la de 3,2 hm<sup>3</sup>/año y del 86 por ciento para la correspondiente a un bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año.

En la figura 16.13-3 se muestra la evolución de la ratio bombeo/recarga para distintas hipótesis de explotación del acuífero y en la tabla 16.13-2 los valores que toma el mismo en función de la recarga natural acaecida en cada año hidrológico. Nótese que los valores promedio que se presentan en dicha tabla son de una cuantía superior a los calculados a partir del valor medio anual de la recarga natural (5,29 hm<sup>3</sup>/año) para el periodo comprendido entre octubre de 1985 y septiembre de 2017. Especialmente significativo es el correspondiente a la hipótesis de bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año dada su proximidad al valor 1 que marca el comienzo de la sobreexplotación de un acuífero.

En la tabla 16.13-2 se han sombreado de color amarillo aquellos valores que superan un grado de explotación superior a 0,8, ya que dicha cuantía suele utilizarse como un valor límite por debajo del cual se está seguro que se realiza una gestión adecuada y sostenible de las disponibilidades hídricas de un acuífero.

Es importante indicar que dicho valor solo tiene sentido cuando es el resultado de una explotación realizada a lo largo de todo un ciclo hiperanual, como ocurre con la hipótesis de bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año, pero que no implica ninguna limitación en la gestión que se viene realizando de un acuífero cuando únicamente responde a valores esporádicos ligados a años de tipología climática muy seca o seca, como ocurre con las hipótesis de bombeo de 2,6 hm<sup>3</sup>/año y 3,2 hm<sup>3</sup>/año.

El intervalo comprendido entre 0,8 y 1 constituye un espacio de seguridad o de prealerta ante una posible o previsible sobreexplotación del acuífero, que estrictamente solo tiene lugar cuando la ratio bombeo/recarga supera el valor 1 para un ciclo hiperanual suficientemente largo y representativo de los diferentes escenarios climáticos que se pueden presentar.

Obsérvese en la figura 16.13-3 que la hipótesis de explotación correspondiente a un bombeo de 3,6 hm<sup>3</sup>/año presenta una evolución del ratio bombeo/recarga, para el periodo analizado, que siempre se sitúa, salvo en el año muy seco de 1988-1989 y en el seco de 2016-2017, por debajo del valor 0,8 e incluso en la mayor parte de los años hidrológicos por debajo de 0,7, por lo que constituye una excelente propuesta de explotación del acuífero, dado el grado de aprovechamiento ligeramente superior al 61 por ciento que proporciona.

Por lo que respecta al volumen almacenado por encima de la cota de desagüe cabe indicar que el adecuado manejo de estos volúmenes, unido en determinados momentos al que existe por debajo de la cota de desagüe, constituye la clave para lograr una adecuada gestión sostenible de los recursos hídricos del acuífero. Es importante significar, como ya se ha indicado con anterioridad, que se trata de un acuífero con importantes variaciones interanuales e intermensuales, tanto en el volumen de agua que se recarga como en el que descarga y se almacena. Dicha irregularidad temporal, que se encuentra ligada a las especiales características hidrodinámicas que presenta el acuífero, dificulta enormemente la gestión del mismo dentro de un marco de sostenibilidad, aunque esto no imposibilita satisfacer un cierto valor de la demanda haciendo uso en determinados meses del año del

volumen de agua que se almacena por debajo de la cota de desagüe del acuífero al objeto de conseguir una garantía de satisfacción total.

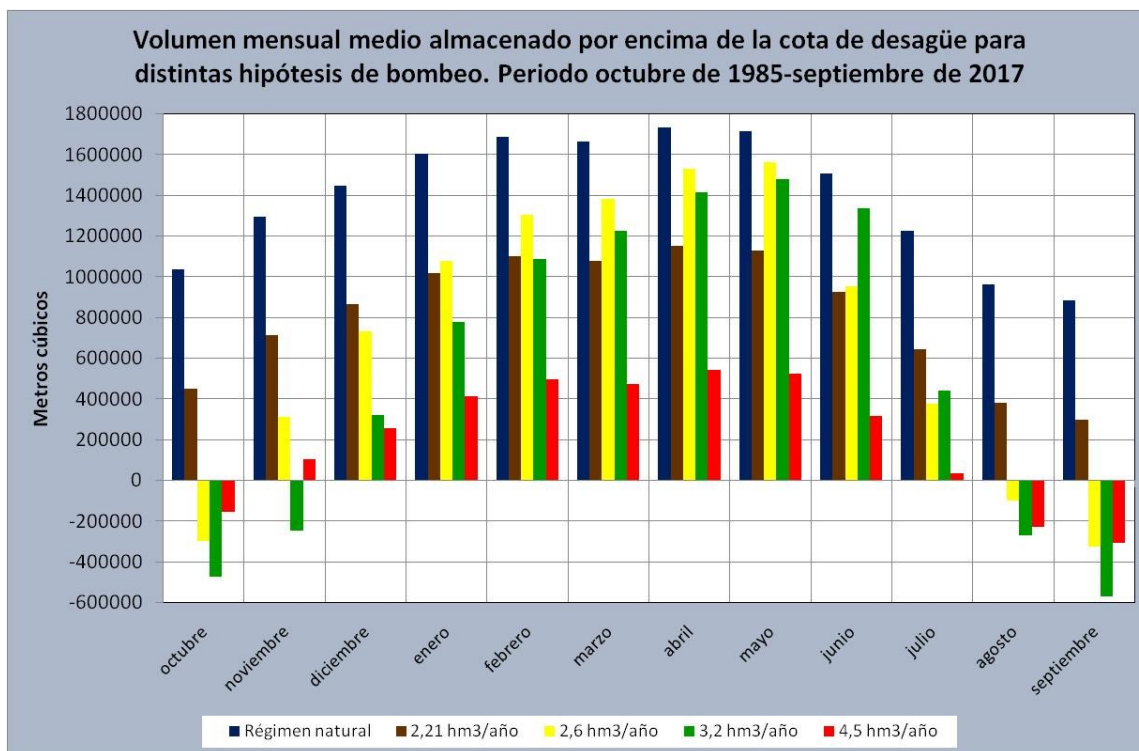
A este respecto en la figura 16.13-3 se muestra la distribución del volumen mensual medio almacenado por encima de la cota de desagüe del acuífero para distintas hipótesis de bombeo y en la tabla 16.13-2 el valor que adquiere el mismo. Del análisis de los datos contenidos en dicha tabla se desprende que salvo para la hipótesis correspondiente a un volumen bombeado de 2,21 hm<sup>3</sup>/año, que se caracteriza por presentar un grado reducido de aprovechamiento de los recursos hídricos del acuífero, el resto de las hipótesis de bombeo precisan hacer uso de la técnica denominada uso esporádico de reservas al objeto de lograr una mejor gestión hídrica.

**Tabla 16.13-3 Volumen mensual medio almacenado por encima de la cota de desagüe para distintas hipótesis de bombeo. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

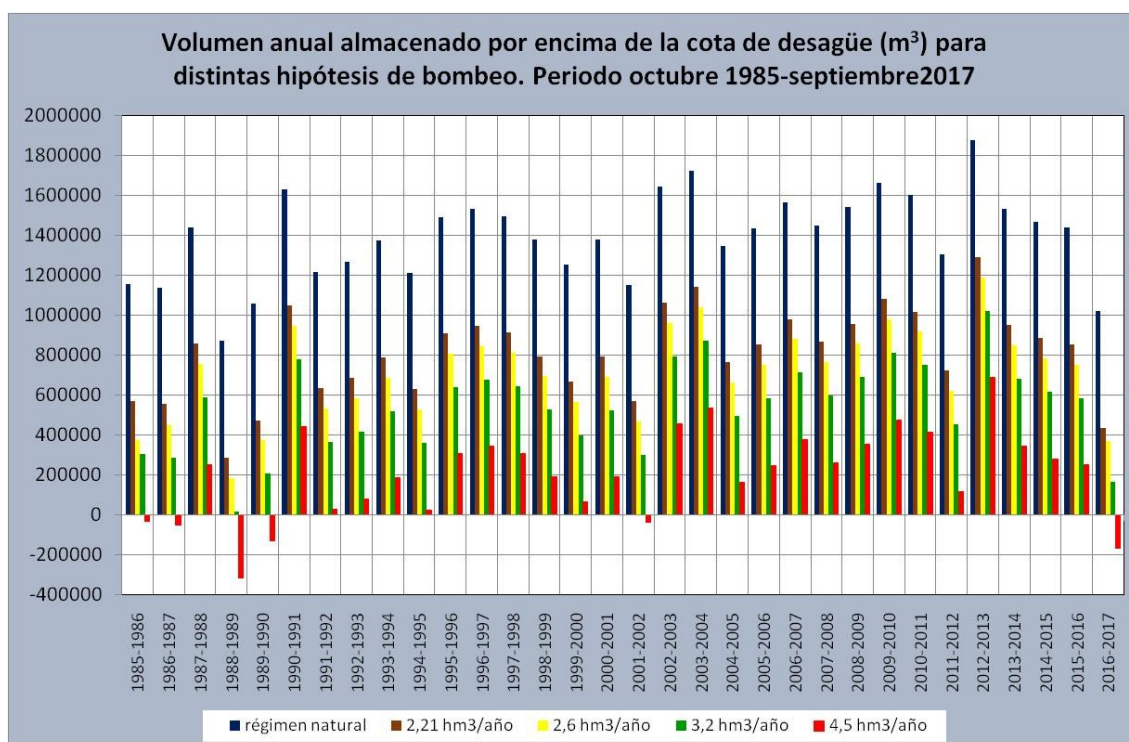
| Mes del año                  | Régimen Natural | Hipótesis de bombeo (hm <sup>3</sup> /año) |         |         |         |
|------------------------------|-----------------|--|---------|---------|---------|
|                              |                 | 2,21                                       | 2,26    | 3,2     | 4,5     |
| Octubre (m <sup>3</sup> )    | 1036058         | 452058                                     | -295205 | -470111 | -154418 |
| Noviembre (m <sup>3</sup> )  | 1297610         | 713610                                     | 312183  | -245923 | 107134  |
| Diciembre (m <sup>3</sup> )  | 1450247         | 866247                                     | 731094  | 323794  | 259771  |
| Enero (m <sup>3</sup> )      | 1603830         | 1019830                                    | 1079000 | 781757  | 413353  |
| Febrero (m <sup>3</sup> )    | 1688058         | 1104058                                    | 1305043 | 1088118 | 497582  |
| Marzo (m <sup>3</sup> )      | 1663315         | 1079315                                    | 1383795 | 1225486 | 472839  |
| Abril (m <sup>3</sup> )      | 1736758         | 1152758                                    | 1532767 | 1417235 | 546282  |
| Mayo (m <sup>3</sup> )       | 1714314         | 1130314                                    | 1565444 | 1481130 | 523838  |
| Junio (m <sup>3</sup> )      | 1508864         | 924864                                     | 955873  | 1338689 | 318388  |
| Julio (m <sup>3</sup> )      | 1227675         | 643675                                     | 379761  | 442966  | 37198   |
| Agosto (m <sup>3</sup> )     | 965596          | 381596                                     | -97550  | -267592 | -224881 |
| Septiembre (m <sup>3</sup> ) | 884851          | 300851                                     | -321482 | -570121 | -305625 |
| Promedio (m <sup>3</sup> )   | 1398098         | 814098                                     | 710894  | 545452  | 207622  |

Tanto en la tabla 16.13-3 como en la figura 16.13-3 se observa para las hipótesis de bombeo de 2,6 hm<sup>3</sup>/año, 3,2 hm<sup>3</sup>/año y 4,5 hm<sup>3</sup>/año que la utilización de los recursos subterráneos almacenados por debajo de la cota de desagüe del acuífero se limita a los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre.

La hipótesis que mayor uso hace del agua almacenada por debajo de la cota de desagüe de acuerdo a los datos contenidos en la tabla 16.13-2 es la correspondiente al bombeo de 3,5 hm<sup>3</sup>/año con un volumen medio aprovechado de 1,6 hm<sup>3</sup>/año, que es 2,2 veces superior al que se aprovecha en las otras hipótesis de bombeo, que solo es del orden de 0,7 hm<sup>3</sup>/año. La anterior aseveración se puede observar gráficamente en la figura 16.13-4.



**Figura 16.13-4. Volumen mensual medio almacenado por encima de la cota de desagüe para distintas hipótesis de bombeo. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**



**Figura 16.12-5. Volumen anual almacenado por encima de la cota de desagüe (m³) para distintas hipótesis de bombeo. Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

**Tabla 16.13-4. Volumen anual almacenado por encima de la cota de desagüe (m<sup>3</sup>) para distintas hipótesis de bombeo. Periodo octubre 1985-septiembre 2017**

| Año hidrológico | Hipótesis de bombeo (hm <sup>3</sup> /año) |                |                |                |                | Tipología climática |
|-----------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|
|                 | Régimen Natural                            | 2,21           | 2,6            | 3,2            | 4,5            |                     |
|                 | m <sup>3</sup>                             | m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> |                     |
| 1985-1986       | 1158015                                    | 574015         | 374666         | 305369         | -32461         | Muy seco            |
| 1986-1987       | 1140820                                    | 556820         | 452236         | 288174         | -49656         | Muy seco            |
| 1987-1988       | 1443818                                    | 859818         | 758555         | 591173         | 253342         | Medio               |
| 1988-1989       | 872950                                     | 288950         | 187763         | 20305          | -317526        | Muy seco            |
| 1989-1990       | 1060708                                    | 476708         | 375523         | 208063         | -129768        | Seco                |
| 1990-1991       | 1633022                                    | 1049022        | 947837         | 780377         | 442546         | Medio               |
| 1991-1992       | 1219486                                    | 635486         | 534301         | 366841         | 29010          | Medio               |
| 1992-1993       | 1270491                                    | 686491         | 585307         | 417846         | 80015          | Medio               |
| 1993-1994       | 1375867                                    | 791867         | 690682         | 523222         | 185391         | Seco                |
| 1994-1995       | 1215693                                    | 631693         | 530508         | 363048         | 25217          | Seco                |
| 1995-1996       | 1495322                                    | 911322         | 810137         | 642677         | 304846         | Medio               |
| 1996-1997       | 1533281                                    | 949281         | 848095         | 680635         | 342805         | Húmedo              |
| 1997-1998       | 1499235                                    | 915235         | 814050         | 646590         | 308759         | Medio               |
| 1998-1999       | 1380857                                    | 796857         | 695672         | 528211         | 190381         | Medio               |
| 1999-2000       | 1254038                                    | 670038         | 568853         | 401393         | 63562          | Seco                |
| 2000-2001       | 1380049                                    | 796049         | 694864         | 527404         | 189573         | Medio               |
| 2001-2002       | 1154194                                    | 570194         | 469008         | 301548         | -36283         | Seco                |
| 2002-2003       | 1647098                                    | 1063098        | 961913         | 794453         | 456622         | Húmedo              |
| 2003-2004       | 1727018                                    | 1143018        | 1041833        | 874373         | 536542         | Húmedo              |
| 2004-2005       | 1350954                                    | 766954         | 665769         | 498309         | 160478         | Muy seco            |
| 2005-2006       | 1439081                                    | 855081         | 753895         | 586435         | 248604         | Muy Húmedo          |
| 2006-2007       | 1566985                                    | 982985         | 881800         | 714340         | 376509         | Muy Húmedo          |
| 2007-2008       | 1453149                                    | 869149         | 767964         | 600503         | 262673         | Muy Húmedo          |
| 2008-2009       | 1544214                                    | 960214         | 859029         | 691569         | 353738         | Medio               |
| 2009-2010       | 1666327                                    | 1082327        | 981142         | 813682         | 475851         | Muy Húmedo          |
| 2010-2011       | 1603942                                    | 1019942        | 918757         | 751296         | 413466         | Muy Húmedo          |
| 2011-2012       | 1308464                                    | 724464         | 623279         | 455818         | 117988         | Medio               |
| 2012-2013       | 1876769                                    | 1292769        | 1191583        | 1024123        | 686292         | Muy Húmedo          |
| 2013-2014       | 1535570                                    | 951570         | 850385         | 682924         | 345094         | Húmedo              |
| 2014-2015       | 1470219                                    | 886219         | 785034         | 617573         | 279743         | Húmedo              |
| 2015-2016       | 1440065                                    | 856065         | 754880         | 587419         | 249589         | Medio               |
| 2016-2017       | 1021429                                    | 437429         | 373273         | 168784         | -169047        | Seco                |
| Promedio        | 1398098                                    | 814098         | 710894         | 545452         | 207622         |                     |

Tanto en dicha figura como en la tabla 16.13-3 también se puede corroborar que en los meses invernales el volumen almacenado por encima de la cota de desagüe es mayor para las hipótesis de 2,6 hm<sup>3</sup>/año y 3,2 hm<sup>3</sup>/año, que para la de 2,21 hm<sup>3</sup>/año. Este hecho se debe a que para esta última hipótesis el bombeo se reparte a lo largo de todo el año, mientras que para las otras dos la explotación se concentra en los cinco meses de máximo estiaje, que es cuando se precisa satisfacer la



demanda con agua subterránea, ya que durante el resto del año aquella se puede cumplimentar a partir del caudal circulante por el río Oja.

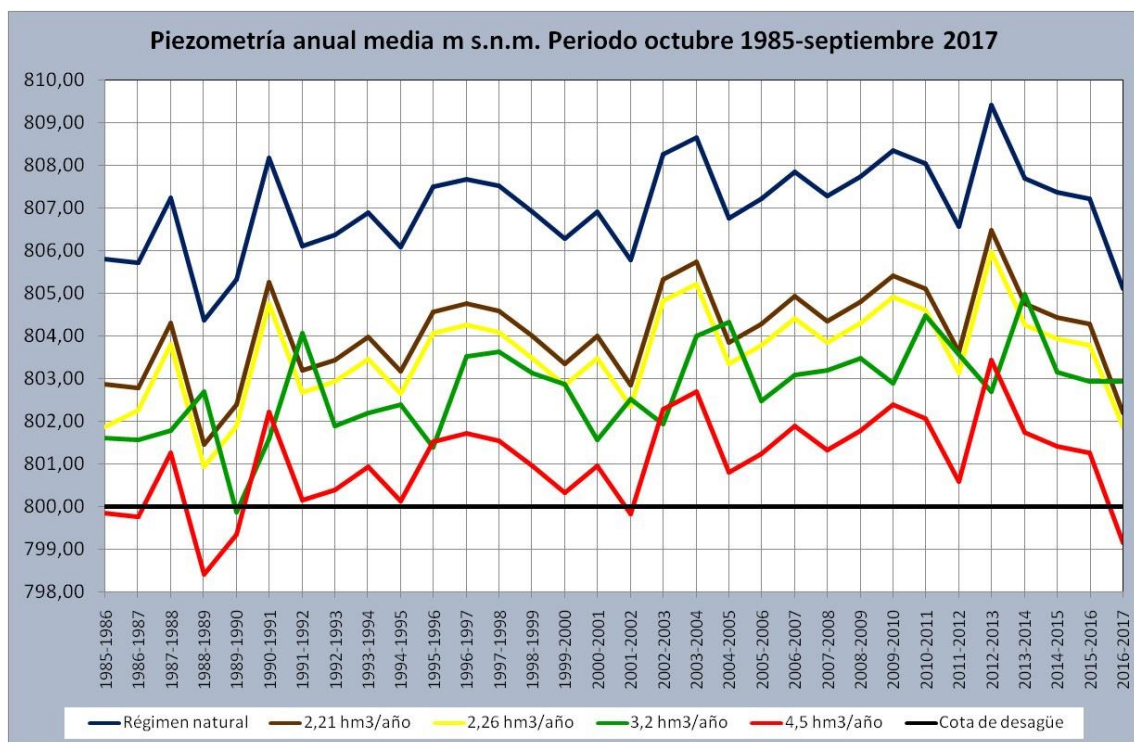
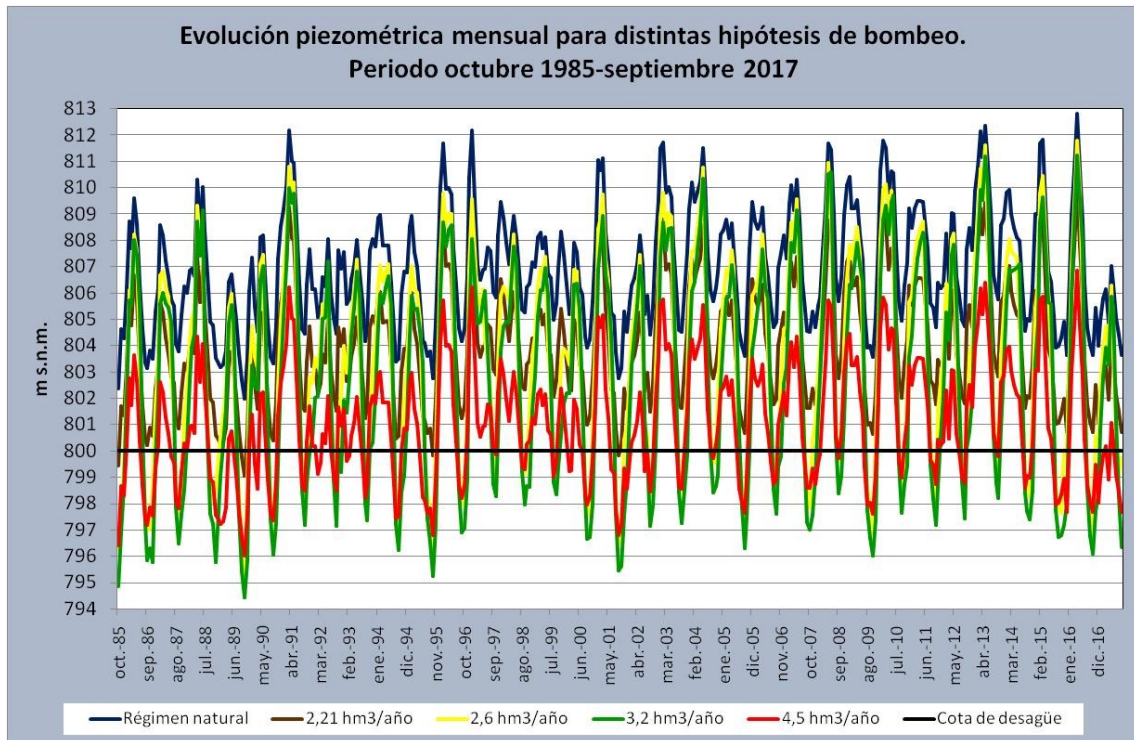
En la figura 16.13-5 se muestra la distribución del volumen anual almacenado por encima de la cota de desagüe del acuífero para distintas hipótesis de bombeo y en la tabla 16.13-4 el valor que adquiere el mismo en cada uno de los años hidrológicos analizados. Tanto del análisis de dicha tabla como de la observación de la figura 16.13-5 se deduce que la única hipótesis de bombeo que hace uso de volúmenes almacenados por debajo de la cota de desagüe a una escala superior a la anual es la correspondiente a la hipótesis de bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año. Este hecho sucede para los años hidrológicos de 1985-1986, 1986-1987, 1988-1989, 1989-1990, 2001-2002 y 2016-2017.

En la tabla 16.13-5 donde los datos anuales se han agrupado por tipológicas climáticas se confirma la anterior afirmación para los años de tipología climática seca y muy seca. Así mismo se puede observar que la diferencia entre el volumen almacenado por encima de la cota de desagüe entre un ciclo muy húmedo y otro muy seco, independientemente de la hipótesis de bombeo que se considere, es del orden de medio millón de metros cúbicos.

**Tabla 16.13-5. Volumen anual medio almacenado por encima de la cota de desagüe (m<sup>3</sup>) para distintas hipótesis de bombeo. Datos agrupados por tipologías climáticas. Periodo octubre 1985-septiembre 2017**

| Tipología climática | Hipótesis de bombeo (hm <sup>3</sup> /año) |                |                |                |                |
|---------------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                     | Régimen natural                            | 2,21           | 2,6            | 3,2            | 4,5            |
|                     | m <sup>3</sup>                             | m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> |
| Muy seco            | 1130685                                    | 546685         | 420109         | 278039         | -59791         |
| Seco                | 1180322                                    | 596322         | 501308         | 327676         | -10155         |
| Medio               | 1419548                                    | 835548         | 734356         | 566902         | 229072         |
| Húmedo              | 1582637                                    | 998637         | 897452         | 729992         | 392161         |
| Muy Húmedo          | 1601042                                    | 1017042        | 915857         | 748397         | 410566         |

En la figura 16.13-6 se muestra la evolución piezométrica mensual para distintas hipótesis de bombeo. En la misma se observan que la evolución piezométrica correspondiente a las hipótesis donde se simula un bombeo de igual magnitud mensual, durante todos los meses del año, presenta una respuesta de tendencia idéntica a la del régimen natural, salvo en lo que respecta a la diferencia de cota piezométrica entre una y otra hipótesis, mientras que las hipótesis donde se simulan bombeos circunscritos solo a ciertos meses del año, sea la intensidad de estos igual para todos ellos o variable a lo largo de cada mes, presentan una respuesta donde se puede apreciar el efecto al que da lugar la explotación que se realiza en cada momento. Lo anteriormente comentado se puede apreciar mejor en la figura 16.13-7 donde se representa la evolución piezométrica anual media para distintas hipótesis de bombeo. En dicha figura es significativo el desfase que se observa en la respuesta piezométrica para la hipótesis de bombeo de 3,2 hm<sup>3</sup>/año respecto a las hipótesis de 2,21 hm<sup>3</sup>/año, 2,6 hm<sup>3</sup>/año y 4,5 hm<sup>3</sup>/año debido al diferente ciclo de bombeo que se realiza en cada una de ellas.

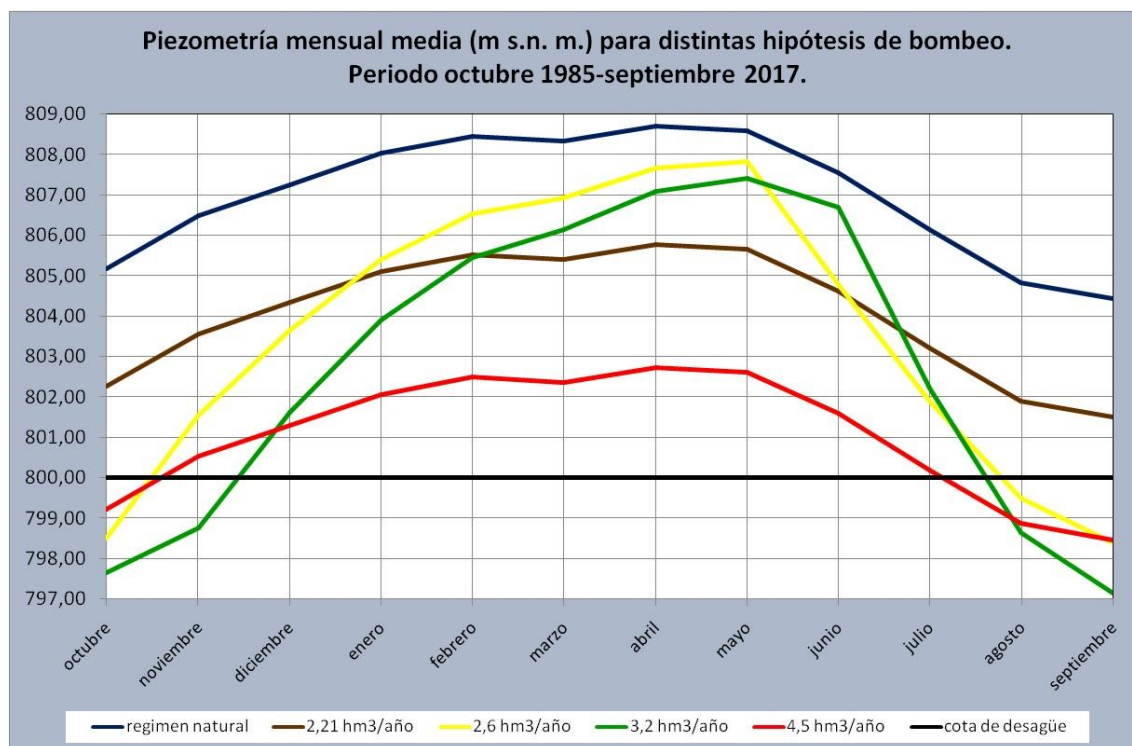


**Tabla 16.13-6. Piezometría anual media para distintas hipótesis de bombeo.  
Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

| Año hidrológico | Régimen natural | Hipótesis de bombeo (hm <sup>3</sup> /año) |          |          |          | Tipología climática |
|-----------------|-----------------|--|----------|----------|----------|---------------------|
|                 |                 | 2,21                                       |          | 3,2      | 4,5      |                     |
|                 | m s.n.m.        | m s.n.m.                                   | m s.n.m. | m s.n.m. | m s.n.m. |                     |
| 1985-1986       | 805,80          | 802,88                                     | 801,88   | 801,61   | 799,84   | Muy seco            |
| 1986-1987       | 805,71          | 802,79                                     | 802,26   | 801,55   | 799,75   | Muy seco            |
| 1987-1988       | 807,23          | 804,31                                     | 803,80   | 801,79   | 801,27   | Medio               |
| 1988-1989       | 804,37          | 801,45                                     | 800,94   | 802,70   | 798,41   | Muy seco            |
| 1989-1990       | 805,31          | 802,39                                     | 801,88   | 799,87   | 799,35   | Seco                |
| 1990-1991       | 808,18          | 805,25                                     | 804,75   | 801,59   | 802,22   | Medio               |
| 1991-1992       | 806,11          | 803,18                                     | 802,67   | 804,07   | 800,15   | Medio               |
| 1992-1993       | 806,36          | 803,44                                     | 802,93   | 801,88   | 800,40   | Medio               |
| 1993-1994       | 806,89          | 803,97                                     | 803,46   | 802,19   | 800,93   | Seco                |
| 1994-1995       | 806,09          | 803,16                                     | 802,66   | 802,38   | 800,13   | Seco                |
| 1995-1996       | 807,49          | 804,56                                     | 804,06   | 801,39   | 801,53   | Medio               |
| 1996-1997       | 807,68          | 804,75                                     | 804,25   | 803,52   | 801,72   | Húmedo              |
| 1997-1998       | 807,51          | 804,58                                     | 804,08   | 803,64   | 801,55   | Medio               |
| 1998-1999       | 806,91          | 803,99                                     | 803,49   | 803,12   | 800,96   | Medio               |
| 1999-2000       | 806,28          | 803,36                                     | 802,85   | 802,87   | 800,32   | Seco                |
| 2000-2001       | 806,91          | 803,99                                     | 803,48   | 801,57   | 800,95   | Medio               |
| 2001-2002       | 805,78          | 802,86                                     | 802,35   | 802,52   | 799,82   | Seco                |
| 2002-2003       | 808,25          | 805,32                                     | 804,82   | 801,93   | 802,29   | Húmedo              |
| 2003-2004       | 808,65          | 805,72                                     | 805,22   | 804,00   | 802,69   | Húmedo              |
| 2004-2005       | 806,76          | 803,84                                     | 803,34   | 804,33   | 800,80   | Muy seco            |
| 2005-2006       | 807,21          | 804,28                                     | 803,78   | 802,47   | 801,25   | Muy Húmedo          |
| 2006-2007       | 807,85          | 804,92                                     | 804,42   | 803,09   | 801,89   | Muy Húmedo          |
| 2007-2008       | 807,28          | 804,35                                     | 803,85   | 803,19   | 801,32   | Muy Húmedo          |
| 2008-2009       | 807,73          | 804,81                                     | 804,30   | 803,48   | 801,77   | Medio               |
| 2009-2010       | 808,34          | 805,42                                     | 804,91   | 802,89   | 802,38   | Muy Húmedo          |
| 2010-2011       | 808,03          | 805,11                                     | 804,60   | 804,47   | 802,07   | Muy Húmedo          |
| 2011-2012       | 806,55          | 803,63                                     | 803,12   | 803,57   | 800,59   | Medio               |
| 2012-2013       | 809,40          | 806,47                                     | 805,97   | 802,70   | 803,44   | Muy Húmedo          |
| 2013-2014       | 807,69          | 804,76                                     | 804,26   | 804,98   | 801,73   | Húmedo              |
| 2014-2015       | 807,36          | 804,44                                     | 803,93   | 803,16   | 801,40   | Húmedo              |
| 2015-2016       | 807,21          | 804,29                                     | 803,78   | 802,93   | 801,25   | Medio               |
| 2016-2017       | 805,11          | 802,19                                     | 801,87   | 802,93   | 799,15   | Seco                |
| Promedio        | 807,00          | 804,08                                     | 803,56   | 802,76   | 801,04   |                     |

**Tabla 16.13-7. Piezometría mensual media (m s.n.m.) para distintas hipótesis de bombeo. Periodo octubre 1985-septiembre 2017**

| Mes del año | Régimen natural | Hipótesis de bombeo (hm <sup>3</sup> /año) |          |          |          |
|-------------|-----------------|--|----------|----------|----------|
|             |                 | 2,1  | 2,6      | 3,2      | 4,5      |
|             | m s.n.m.        | m s.n.m.                                   | m s.n.m. | m s.n.m. | m s.n.m. |
| octubre     | 805,19          | 802,26                                     | 798,52   | 797,65   | 799,23   |
| noviembre   | 806,50          | 803,57                                     | 801,56   | 798,77   | 800,54   |
| diciembre   | 807,26          | 804,34                                     | 803,66   | 801,62   | 801,30   |
| enero       | 808,03          | 805,11                                     | 805,40   | 803,91   | 802,07   |
| febrero     | 808,45          | 805,53                                     | 806,54   | 805,45   | 802,49   |
| marzo       | 808,33          | 805,40                                     | 806,93   | 806,14   | 802,37   |
| abril       | 808,70          | 805,77                                     | 807,68   | 807,10   | 802,74   |
| mayo        | 808,58          | 805,66                                     | 807,84   | 807,42   | 802,62   |
| junio       | 807,56          | 804,63                                     | 804,79   | 806,70   | 801,59   |
| julio       | 806,15          | 803,22                                     | 801,90   | 802,22   | 800,19   |
| agosto      | 804,84          | 801,91                                     | 799,51   | 798,66   | 798,87   |
| septiembre  | 804,43          | 801,51                                     | 798,39   | 797,15   | 798,47   |
| Promedio    | 807,00          | 804,08                                     | 803,56   | 802,73   | 801,04   |



**Figura 16.13-8. Piezometría mensual media (m s.n.m.) para distintas hipótesis de bombeo. Periodo octubre 1985-septiembre 2017**

De la observación del gráfico piezométrico correspondiente a la figura 16.13-6 se deduce que son frecuentes los episodios donde el nivel piezométrico se sitúa por debajo de la cota de desagüe (800 m s.n.m.). Concretamente su número es el siguiente: 5 para la hipótesis de bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año, 88 para la de 2,6

hm<sup>3</sup>/año, 121 para la de 3,2 hm<sup>3</sup>/año y 133 para la de 4,5 hm<sup>3</sup>/año, que en porcentaje sobre el total de 384 meses analizados representan respectivamente el 1 por ciento, el 23 por ciento, el 32 por ciento y el 35 por ciento. Únicamente para la hipótesis de 4,5 hm<sup>3</sup>/año dicho efecto presenta una persistencia superior al ciclo anual (Figura 16.13-7). Este hecho es especialmente significativo al inicio del periodo de estudio debido a la presencia de una mayor concentración de años de tipología climática seca y muy seca (Tabla 16.13-6).

En dicha tabla se puede observar que la cota piezométrica promedio se sitúa siempre, independientemente de la hipótesis de bombeo que se considere, por encima de la cota de desagüe del acuífero, aunque en el caso de la hipótesis de bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año se localiza a tan solo 1,04 m por encima de la misma. La diferencia de altura de lámina de agua para este supuesto de bombeo se sitúa seis metros por debajo de la cota correspondiente al régimen natural.

En la tabla 16.13-7 se muestra la piezometría mensual media (m s.n.m.) para distintas hipótesis de bombeo. En color amarillo se han sombreado aquellos meses en los que la cota piezométrica media se localiza por debajo de la cota de desagüe del acuífero. Dado que el comportamiento de la piezometría es parejo al que presenta el drenaje del acuífero, ocurre que, cuando la primera se sitúa por debajo de la cota de desagüe del acuífero, el segundo se anula, no volviendo a tener lugar descarga de agua a la red fluvial hasta que la cota piezométrica se localiza nuevamente por encima de la cota de desagüe del acuífero. Esto implica que durante los meses de agosto, septiembre y octubre las descargas naturales de acuífero normalmente se anulen por efecto de los bombeos. En la figura 16.13-8 se puede apreciar visualmente el efecto anteriormente descrito para las hipótesis de bombeo de 2,6 hm<sup>3</sup>/año, 3,2 hm<sup>3</sup>/año y 4,5 hm<sup>3</sup>/año.

En la figura citada anteriormente se tiene que, si se integra el área que determinan la recta que define la cota de desagüe del acuífero y la curva de evolución piezométrica situada bajo la misma, para cada una de las hipótesis de bombeo, se obtiene el volumen de agua almacenado por debajo de la cota de desagüe, que se aprovecha adicionalmente, en cada una de ellas, frente a otras hipótesis de bombeo que no dan lugar a un descenso del nivel piezométrico por debajo de la cota de desagüe. La hipótesis de bombeo que aprovecha un mayor volumen de agua en estas condiciones es la correspondiente al bombeo de 3,2 hm<sup>3</sup>/año.

Por otro lado, si se supone que entre los meses de diciembre y julio la demanda de agua del sistema se puede atender con agua superficial del río Oja, se tiene que si se integra, para los meses que van de julio a diciembre, el área comprendida entre la curva de evolución piezométrica en régimen natural y la curva de evolución piezométrica de cada una de las hipótesis de bombeo que se han considerado, la hipótesis que proporciona un mayor volumen de agua atendido es la correspondiente a 3,2 hm<sup>3</sup>/año.

Evidentemente, dado que dicha hipótesis de bombeo, al igual que ocurre con todas las simuladas en mayor o menor medida, induce durante ciertos meses del año el secado de alguna o todas las descargas de agua subterránea, que de forma difusa o puntual alimentan a la red fluvial, por lo que debe preverse alguna forma de paliación o compensación de las posibles consecuencias que se pudieran derivar,



que se puede llevar a efecto vertiendo en los cauces, que potencialmente pudieran verse implicados, una parte del caudal bombeado durante el tiempo que dura la afección.

Por último, en lo que respecta al análisis piezométrico se ha elaborado la tabla 16.13-8 que proporciona datos agrupados por tipologías climáticas sobre la piezometría anual media (m s.n.m.) para distintas hipótesis de bombeo. En la misma se observa que la piezometría anual media para los años de tipología climática seca y muy seca se localiza por debajo de la cota de desagüe del acuífero.

**Tabla 16.13-8. Piezometría anual media (m s.n.m.) para distintas hipótesis de bombeo. Datos agrupados por tipologías climáticas. Periodo octubre 1985-septiembre 2017**

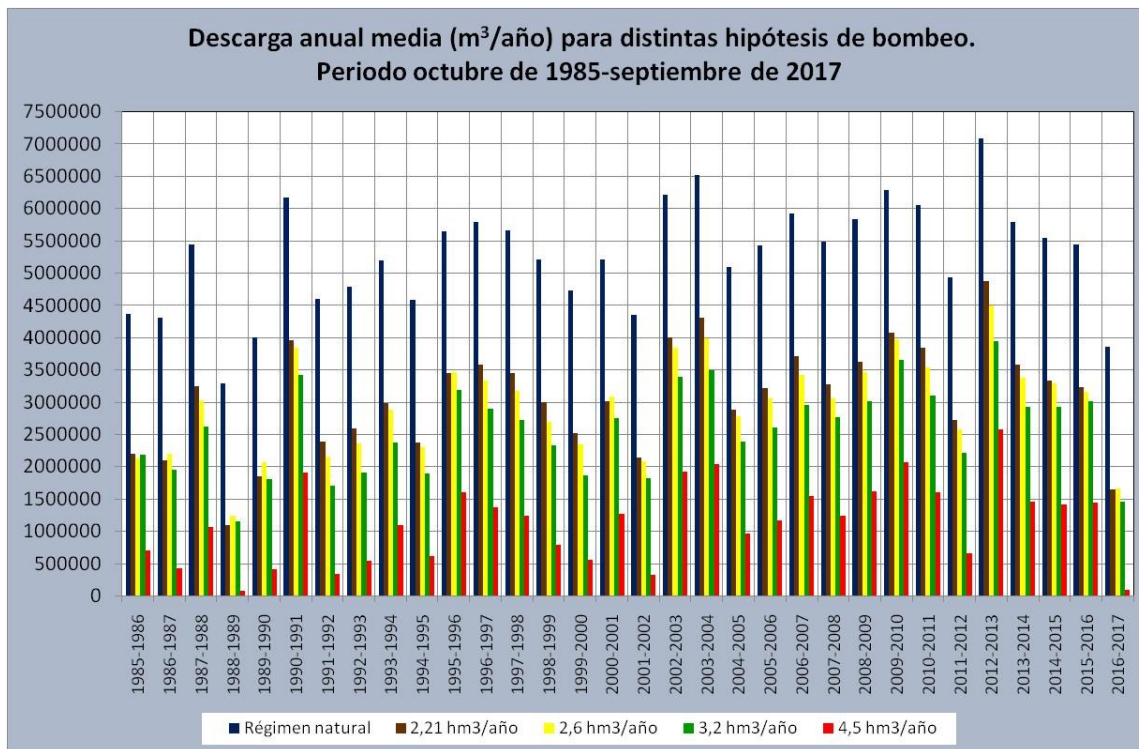
| Tipología climática | Hipótesis de bombeo (hm <sup>3</sup> /año) |          |          |          |          |
|---------------------|--|----------|----------|----------|----------|
|                     | Régimen natural                            | 2,21     | 2,6      | 3,2      | 4,5      |
|                     | m s.n.m.                                   | m s.n.m. | m s.n.m. | m s.n.m. | m s.n.m. |
| Muy seco            | 805,66                                     | 802,74   | 802,11   | 802,55   | 799,70   |
| Seco                | 805,91                                     | 802,99   | 802,51   | 802,13   | 799,95   |
| Medio               | 807,11                                     | 804,18   | 803,68   | 802,64   | 801,15   |
| Húmedo              | 807,93                                     | 805,00   | 804,50   | 803,52   | 801,97   |
| Muy Húmedo          | 808,02                                     | 805,09   | 804,59   | 803,14   | 802,06   |

La última componente del balance hídrico que se sintetiza en la tabla 16.13-1 y resta de analizar en el presente apartado es el volumen descargado a la red hidrográfica superficial. El comportamiento de esta componente del balance hídrico frente a los diferentes bombeos a los que se somete al acuífero es de singular importancia y significación, puesto que el grado en que disminuya el caudal aportado por el acuífero a la red hidrográfica superficial puede implicar modificaciones de diversa magnitud y alcance en cualquiera de los aspectos que se relacionan con la misma, que pueden incluir entre otros a los medioambientales y ecológicos. Por esta razón en el presente estudio esta componente del balance hídrico se ha tratado con especial sensibilidad, atención y profundidad.

En la figura 16.13-9 se muestran gráficamente, para las distintas hipótesis de bombeo simuladas, la distribución anual de la descarga a la red hidrográfica superficial para el periodo estudiado y en la tabla 16.13-9 la cuantía de las mismas. Para las hipótesis de bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año, 2,6 hm<sup>3</sup>/año, y 3,2 hm<sup>3</sup>/año no existe una gran diferencia en el caudal promedio que se drena entre unas y otras a la red hidrográfica superficial para el periodo estudiado, que se estima en torno a 0,5 hm<sup>3</sup>/año. Esta diferencia sí es apreciable en el caso de la hipótesis de 4,5 hm<sup>3</sup>/año con un intervalo de variación entre 1,5 hm<sup>3</sup>/año y 2 hm<sup>3</sup>/año en relación con las otras hipótesis de bombeo. Con respecto a la aportación en régimen natural la disminución del caudal descargado bajo la influencia de las distintas hipótesis de bombeo se cifra en los siguientes porcentajes: 41% (2,21 hm<sup>3</sup>/año), 44% (2,6 hm<sup>3</sup>/año), 51% (3,2 hm<sup>3</sup>/año) y 78% (4,5 hm<sup>3</sup>/año). En principio no se detectan grandes diferencias entre las tres primeras hipótesis, aunque sí entre estas y la cuarta.

**Tabla 16.13-9. Descarga anual (m<sup>3</sup>/año) a la red hidrográfica superficial para distintas hipótesis de bombeo. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

| Año hidrológico | Régimen natural       | Hipótesis de bombeo (hm <sup>3</sup> /año) |                       |                       |                       |            |
|-----------------|-----------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|
|                 |                       | 2,21                                       | 2,6                   | 3,2                   | 4,5                   |            |
|                 | (m <sup>3</sup> /año) | (m <sup>3</sup> /año)                      | (m <sup>3</sup> /año) | (m <sup>3</sup> /año) | (m <sup>3</sup> /año) |            |
| 1985-1986       | 4377297               | 2203662                                    | 2137895               | 2196436               | 716911                | Muy seco   |
| 1986-1987       | 4312299               | 2104779                                    | 2209050               | 1964514               | 440723                | Muy seco   |
| 1987-1988       | 5457633               | 3250112                                    | 3037891               | 2625326               | 1073522               | Medio      |
| 1988-1989       | 3299753               | 1106530                                    | 1246814               | 1165190               | 81803                 | Muy seco   |
| 1989-1990       | 4009476               | 1860920                                    | 2082397               | 1810791               | 415694                | Seco       |
| 1990-1991       | 6172825               | 3965305                                    | 3848085               | 3424286               | 1923831               | Medio      |
| 1991-1992       | 4609658               | 2402139                                    | 2163845               | 1716648               | 345467                | Medio      |
| 1992-1993       | 4802458               | 2594938                                    | 2376029               | 1921630               | 550751                | Medio      |
| 1993-1994       | 5200777               | 2993258                                    | 2894665               | 2389545               | 1097816               | Seco       |
| 1994-1995       | 4595320               | 2387800                                    | 2313275               | 1909113               | 620795                | Seco       |
| 1995-1996       | 5652319               | 3454396                                    | 3471482               | 3197156               | 1612731               | Medio      |
| 1996-1997       | 5795801               | 3588279                                    | 3339869               | 2903377               | 1379501               | Húmedo     |
| 1997-1998       | 5667109               | 3459589                                    | 3185403               | 2730387               | 1257174               | Medio      |
| 1998-1999       | 5219639               | 3012119                                    | 2710468               | 2344766               | 802394                | Medio      |
| 1999-2000       | 4740265               | 2532745                                    | 2348841               | 1881000               | 565841                | Seco       |
| 2000-2001       | 5216586               | 3019795                                    | 3088745               | 2765365               | 1277405               | Medio      |
| 2001-2002       | 4362852               | 2155332                                    | 2100264               | 1836616               | 340156                | Seco       |
| 2002-2003       | 6226032               | 4018513                                    | 3854585               | 3403544               | 1930331               | Húmedo     |
| 2003-2004       | 6528128               | 4320610                                    | 4002951               | 3510134               | 2044746               | Húmedo     |
| 2004-2005       | 5106607               | 2899087                                    | 2787703               | 2393107               | 969133                | Muy seco   |
| 2005-2006       | 5439724               | 3232205                                    | 3070648               | 2622005               | 1172731               | Muy Húmedo |
| 2006-2007       | 5923203               | 3715683                                    | 3429899               | 2970875               | 1549287               | Muy Húmedo |
| 2007-2008       | 5492903               | 3285382                                    | 3064573               | 2770771               | 1255624               | Muy Húmedo |
| 2008-2009       | 5837130               | 3629610                                    | 3475009               | 3023967               | 1630583               | Medio      |
| 2009-2010       | 6298718               | 4091199                                    | 3978814               | 3668006               | 2083580               | Muy Húmedo |
| 2010-2011       | 6062900               | 3855380                                    | 3539641               | 3104271               | 1615874               | Muy Húmedo |
| 2011-2012       | 4945993               | 2738473                                    | 2586559               | 2219215               | 665400                | Medio      |
| 2012-2013       | 7094185               | 4886666                                    | 4506702               | 3947805               | 2594186               | Muy Húmedo |
| 2013-2014       | 5804454               | 3596933                                    | 3389689               | 2938648               | 1465434               | Húmedo     |
| 2014-2015       | 5557427               | 3349908                                    | 3295151               | 2939373               | 1423976               | Húmedo     |
| 2015-2016       | 5443445               | 3235923                                    | 3172839               | 3023059               | 1458799               | Medio      |
| 2016-2017       | 3861002               | 1653481                                    | 1673739               | 1469178               | 102674                | Seco       |
| Promedio        | 5284810               | 3081273                                    | 2949485               | 2587066               | 1139527               |            |



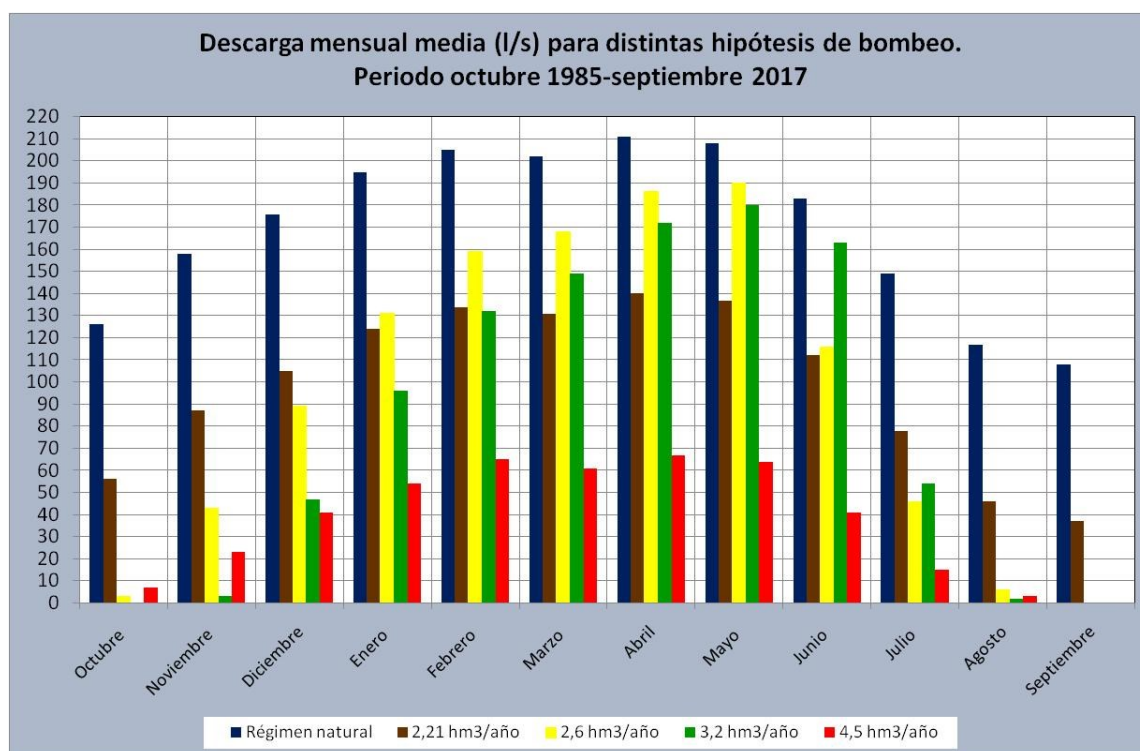
**Figura 16.13-9. Descarga anual ( $m^3/año$ ) a la red hidrográfica superficial para distintas hipótesis de bombeo. Periodo octubre de 1985-septiembre de 2017.**

En la figura 16.13-10 se muestran gráficamente, para las distintas hipótesis de bombeo simuladas, la distribución mensual media de la descarga a la red hidrográfica superficial para el periodo estudiado, y en la tabla 16.13-9 la cuantía de las mismas. En dicha tabla se observa que la disminución promedio del caudal descargado a la red hidrográfica con respecto al régimen natural, para las distintas hipótesis de bombeo, es la siguiente: 71 l/s (2,21  $hm^3/año$ ), 75 l/s (2,6  $hm^3/año$ ), 81 l/s (3,2  $hm^3/año$ ) y 133 l/s (4,5  $hm^3/año$ ). Nuevamente vuelve a detectarse para la última hipótesis mencionada una gran discrepancia con respecto a las otras tres. A escala de un determinado mes la afección es muy importante para los meses de agosto, septiembre y octubre en el caso de las hipótesis de bombeo de 2,6  $hm^3/año$ , para los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre para la hipótesis de 3,2  $hm^3/año$  y prácticamente para todos los meses del año para la hipótesis de 4,5  $hm^3/año$ , aunque la misma es mucho mayor en los meses de agosto, septiembre y octubre en las que el caudal de descarga es nulo o muy reducido.

En la Tabla 16.13-11 se muestra la distribución del número de meses con descarga nula a la red hidrográfica superficial para las distintas hipótesis de bombeo durante el periodo octubre 1985-septiembre 2017. Salvo para la hipótesis de 2,21  $hm^3/año$ , que es tan solo de 5 meses para todo el periodo analizado, en las otras tres hipótesis los porcentajes con descarga nula sobre el total de meses analizados son del 23 % (2,6  $hm^3/año$ ), 32% (3,2  $hm^3/año$ ) y 35 % (4,5  $hm^3/año$ ), aproximadamente una cuarta y una tercera parte de los mismos. Ahora bien, la distribución de estos meses sin descarga de agua subterránea a la red hidrográfica superficial se concentra (Tabla 16.13-12) en agosto, septiembre, octubre y noviembre para las hipótesis de 2,6  $hm^3/año$  y 3,2  $hm^3/año$  y prácticamente a lo largo de la totalidad del año para la hipótesis de 4,5  $hm^3/año$ , aunque es verdad que en los meses abril y mayo es tan solo de una unidad.

**Tabla 16.13-10. Descarga mensual media (l/s) a la red hidrográfica superficial para distintas hipótesis de bombeo. Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

| Mes del año      | Régimen natural | Hipótesis de bombeo (hm <sup>3</sup> /año) |     |     |     |
|------------------|-----------------|--|-----|-----|-----|
|                  |                 | 2,21                                       | 2,6 | 3,2 | 4,5 |
| Octubre (l/s)    | 126             | 56   | 3   | 0   | 7   |
| Noviembre (l/s)  | 158             | 87   | 43  | 3   | 23  |
| Diciembre (l/s)  | 176             | 105  | 89  | 47  | 41  |
| Enero (l/s)      | 195             | 124  | 131 | 96  | 54  |
| Febrero (l/s)    | 205             | 134  | 159 | 132 | 65  |
| Marzo (l/s)      | 202             | 131  | 168 | 149 | 61  |
| Abril (l/s)      | 211             | 140  | 186 | 172 | 67  |
| Mayo (l/s)       | 208             | 137  | 190 | 180 | 64  |
| Junio (l/s)      | 183             | 112  | 116 | 163 | 41  |
| Julio (l/s)      | 149             | 78   | 46  | 54  | 15  |
| Agosto (l/s)     | 117             | 46   | 6   | 2   | 3   |
| Septiembre (l/s) | 108             | 37   | 0   | 0   | 0   |
| Promedio (l/s)   | 170             | 99   | 95  | 83  | 37  |



**Figura 16.13-10. Descarga mensual media (l/s) a la red hidrográfica superficial para distintas hipótesis de bombeo. Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

**Tabla 16.13-11. Número de meses con descarga nula a la red hidrográfica superficial para distintas hipótesis de bombeo. Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

| Año hidrológico | Meses con descarga nula a la red hidrográfica |     |     |     | Tipología climática |
|-----------------|---|-----|-----|-----|---------------------|
|                 | Hipótesis de bombeo (hm <sup>3</sup> /año)    |     |     |     |                     |
|                 | 2,21  | 2,6 | 3,2 | 4,5 |                     |
| 1985-1986       | 1   | 5   | 5   | 6   | Muy seco            |
| 1986-1987       | 0   | 4   | 5   | 7   | Muy seco            |
| 1987-1988       | 0   | 2   | 3   | 2   | Medio               |
| 1988-1989       | 0   | 5   | 6   | 9   | Muy seco            |
| 1989-1990       | 1   | 4   | 4   | 7   | Seco                |
| 1990-1991       | 0   | 3   | 4   | 3   | Medio               |
| 1991-1992       | 0   | 3   | 4   | 4   | Medio               |
| 1992-1993       | 0   | 2   | 3   | 5   | Medio               |
| 1993-1994       | 0   | 2   | 2   | 3   | Seco                |
| 1994-1995       | 1   | 4   | 4   | 6   | Seco                |
| 1995-1996       | 1   | 3   | 4   | 4   | Medio               |
| 1996-1997       | 0   | 2   | 3   | 1   | Húmedo              |
| 1997-1998       | 0   | 2   | 3   | 3   | Medio               |
| 1998-1999       | 0   | 3   | 4   | 2   | Medio               |
| 1999-2000       | 0   | 2   | 3   | 5   | Seco                |
| 2000-2001       | 1   | 3   | 4   | 6   | Medio               |
| 2001-2002       | 0   | 2   | 4   | 7   | Seco                |
| 2002-2003       | 0   | 3   | 3   | 3   | Húmedo              |
| 2003-2004       | 0   | 2   | 4   | 1   | Húmedo              |
| 2004-2005       | 0   | 3   | 4   | 3   | Muy seco            |
| 2005-2006       | 0   | 3   | 4   | 4   | Muy Húmedo          |
| 2006-2007       | 0   | 1   | 4   | 2   | Muy Húmedo          |
| 2007-2008       | 0   | 2   | 4   | 6   | Muy Húmedo          |
| 2008-2009       | 0   | 3   | 3   | 3   | Medio               |
| 2009-2010       | 0   | 2   | 4   | 4   | Muy Húmedo          |
| 2010-2011       | 0   | 2   | 4   | 2   | Muy Húmedo          |
| 2011-2012       | 0   | 3   | 4   | 4   | Medio               |
| 2012-2013       | 0   | 1   | 1   | 0   | Muy Húmedo          |
| 2013-2014       | 0   | 3   | 3   | 3   | Húmedo              |
| 2014-2015       | 0   | 3   | 4   | 4   | Húmedo              |
| 2015-2016       | 0   | 3   | 5   | 5   | Medio               |
| 2016-2017       | 0   | 3   | 5   | 9   | Seco                |
| Total           | 5   | 88  | 121 | 133 |                     |

En la tabla 16.13-13 se muestran los resultados correspondientes a la descarga anual media para distintas hipótesis de bombeo agrupados por tipologías climáticas. En la misma se aprecia que para la hipótesis de 4,5 hm<sup>3</sup>/año la descarga para un año hidrológico de tipo muy húmedo es tres veces superior a la correspondiente a un año tipo muy seco, mientras que, para el resto de las hipótesis



de bombeo, incluido el régimen natural, dicha descarga es tan solo del orden de 1,5 a 1,8 veces.

**Tabla 16.13-12. Número descarga nula a la red hidrográfica superficial para distintas hipótesis de bombeo según el mes del año. Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

| Mes del año | Meses con descarga nula a la red hidrográfica |     |     |     |
|-------------|---|-----|-----|-----|
|             | Hipótesis de bombeo (hm <sup>3</sup> /año)    |     |     |     |
|             | 2,21  | 2,6 | 3,2 | 4,5 |
| Octubre     | 3   | 27  | 29  | 21  |
| Noviembre   | 0   | 4   | 25  | 11  |
| Diciembre   | 0   | 2   | 6   | 7   |
| Enero       | 0   | 0   | 1   | 5   |
| Febrero     | 0   | 0   | 0   | 7   |
| Marzo       | 0   | 0   | 0   | 4   |
| Abril       | 0   | 0   | 0   | 1   |
| Mayo        | 0   | 0   | 0   | 1   |
| Junio       | 0   | 0   | 0   | 3   |
| Julio       | 0   | 1   | 0   | 16  |
| Agosto      | 0   | 22  | 28  | 27  |
| Septiembre  | 2   | 32  | 32  | 30  |
| Promedio    | 5   | 88  | 121 | 133 |

**Tabla 16.13-13. Descarga anual media para distintas hipótesis de bombeo. Datos agrupados por tipologías climáticas. Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

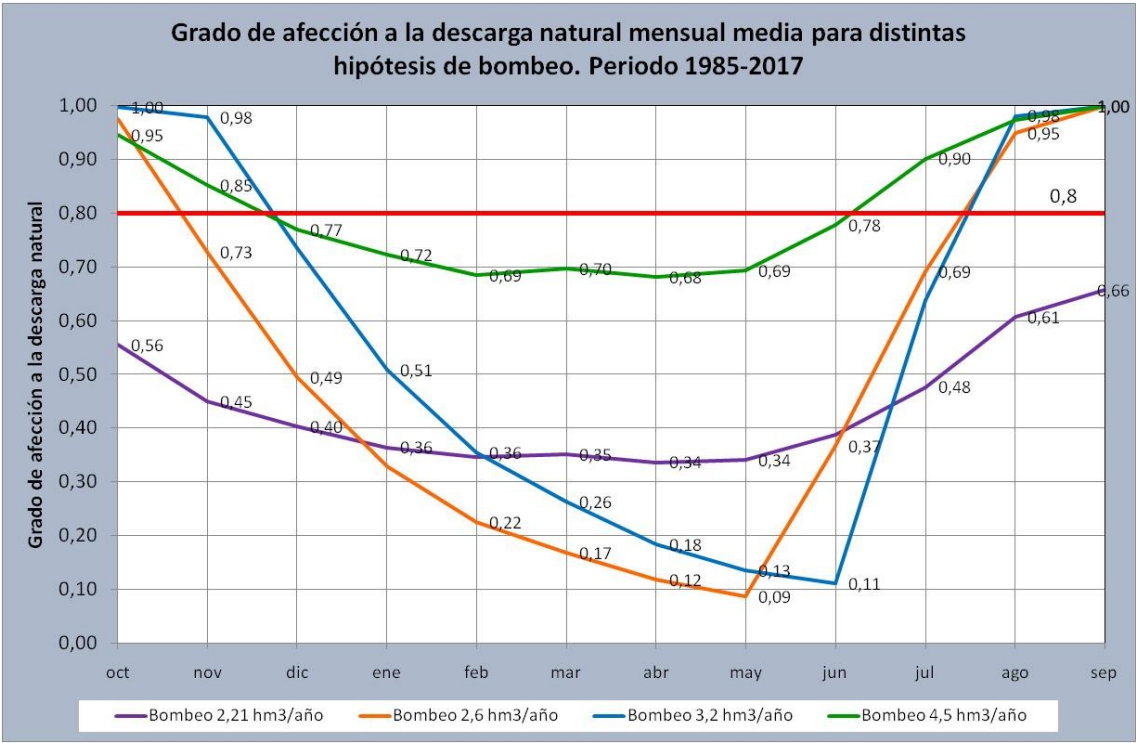
| Tipología climática | Hipótesis de bombeo( hm <sup>3</sup> /año) |                |                |                |                |
|---------------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                     | Régimen natural                            | 2,21           | 2,6            | 3,2            | 4,5            |
|                     | m <sup>3</sup>                             | m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> |
| Muy seco            | 4273989                                    | 2078515        | 2095366        | 1929812        | 552143         |
| Seco                | 4461615                                    | 2263923        | 2235530        | 1882707        | 523829         |
| Medio               | 5365890                                    | 3160218        | 3010578        | 2635619        | 1145278        |
| Húmedo              | 5982368                                    | 3774849        | 3576449        | 3139015        | 1648798        |
| Muy Húmedo          | 6051939                                    | 3844419        | 3598380        | 3180622        | 1711880        |

En la figura 16.13-11 se muestra la evolución de grado de afección que presenta la descarga mensual media para el periodo de estudio (octubre 1985-septiembre 2017) respecto de la descarga mensual media en régimen natural para las distintas hipótesis de bombeo que se han simulado, y en la tabla 16.13-14 el valor del mismo. En dicha tabla se han sombreado de amarillo aquellos valores superiores a 0,8. Así para la hipótesis correspondiente a un bombeo de 4,5 hm<sup>3</sup>/año se detectan cinco meses (julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre) con un grado de afección superior a 0,8 y valores entre 0,68 y 0,78 para el resto de los meses del año, lo que indica que se trata de una hipótesis de gestión que genera una importante interferencia sobre la descarga de agua a la red hidrográfica superficial.

La hipótesis de 3,2 hm<sup>3</sup>/año cuatro valores superiores a 0,8; la de 2,6 hm<sup>3</sup>/año tres y la de 2,21 hm<sup>3</sup>/año ninguno. Para las hipótesis de 2,6 hm<sup>3</sup>/año y 3,2 hm<sup>3</sup>/año sería preciso plantear la adopción de medidas correctoras que complementen parte de los caudales que el acuífero deja de drenar de forma natural a la red hidrográfica superficial por efecto de los bombes propuestos.

**Tabla 16.13-14. Grado de afección a la descarga natural media para distintas hipótesis de bombeo. Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

| Mes del año      | Régimen natural | Hipótesis de bombeo (hm <sup>3</sup> /año) |      |      |      |
|------------------|-----------------|--|------|------|------|
|                  |                 | 2,21                                       | 2,6  | 3,2  | 4,5  |
| Octubre (l/s)    | 0               | 0,56                                       | 0,98 | 1,00 | 0,95 |
| Noviembre (l/s)  | 0               | 0,45                                       | 0,73 | 0,98 | 0,85 |
| Diciembre (l/s)  | 0               | 0,40                                       | 0,49 | 0,73 | 0,77 |
| Enero (l/s)      | 0               | 0,36                                       | 0,33 | 0,51 | 0,72 |
| Febrero (l/s)    | 0               | 0,35                                       | 0,22 | 0,36 | 0,69 |
| Marzo (l/s)      | 0               | 0,35                                       | 0,17 | 0,26 | 0,70 |
| Abril (l/s)      | 0               | 0,34                                       | 0,12 | 0,18 | 0,68 |
| Mayo (l/s)       | 0               | 0,34                                       | 0,09 | 0,13 | 0,69 |
| Junio (l/s)      | 0               | 0,39                                       | 0,37 | 0,11 | 0,78 |
| Julio (l/s)      | 0               | 0,48                                       | 0,69 | 0,64 | 0,90 |
| Agosto (l/s)     | 0               | 0,61                                       | 0,95 | 0,98 | 0,97 |
| Septiembre (l/s) | 0               | 0,66                                       | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Promedio (l/s)   | 0               | 0,42                                       | 0,44 | 0,51 | 0,78 |



**Figura 16-13.11. Grado de afección a la descarga natural media para distintas hipótesis de bombeo. Periodo octubre 1985-septiembre 2017.**

El valor medio del grado de afección que se ha calculado para el conjunto de los distintos meses del año es de 0,42 para la hipótesis de 2,21 hm<sup>3</sup>/año; 0,44 para la hipótesis de 2,6 hm<sup>3</sup>/año, 0,51 para la hipótesis de 3,2 hm<sup>3</sup>/año y 0,78 para la hipótesis de 4,5 hm<sup>3</sup>/año. La proximidad de este último valor a 0,8 corrobora lo apuntado anteriormente en lo que respecta a la importante y elevada disminución que experimenta la cuantía de la descarga de agua subterránea a la red hidrográfica superficial bajo la influencia de un bombeo de una cuantía de 4,5 hm<sup>3</sup>/año. Para el resto de la hipótesis de bombeo el grado de afección se puede considerar de un orden similar para todas ellas y admisible en todos los casos, ya que se sitúa en torno a 0,5, siempre y cuando se adopten las pertinentes medidas paliativas, correctoras o amortiguadoras.

Las afecciones a la que dan lugar los bombeos que se realizan en un acuífero se pueden solventar de forma análoga a como se procede en el caso de las aguas superficiales. En esta última situación el problema se solventa mediante la suelta de un cierto volumen de agua desde los embalses, mientras que en las primeras el caudal que se debe aportar a la red fluvial tiene que proceder de parte del volumen de agua que se bombea desde los acuíferos.

A falta de estudios y normas específicas, que concreten un valor límite del grado de afección a partir del cual se considera preciso incorporar un caudal adicional a la red fluvial, se proponer, para el presente estudio, sugerir que el mismo sea de 0,8. Dicho valor responde a un criterio algo más riguroso que el adoptado durante mucho tiempo por los planes hidrológicos de cuenca para las aguas superficiales, que fijaron el caudal ecológico en el 10% del caudal histórico medio. La cuantía del caudal medio mensual que habría que aportar para alcanzar el 20% del caudal descargado en régimen natural a la red hidrográfica se muestra en la tabla 16.13-15 para las distintas hipótesis de bombeo simuladas.

**Tabla 16.13-15. Caudal medio que es necesario aportar a la red hidrográfica superficial para alcanzar un caudal del 20% del descargado en régimen natural bajo la acción de diferentes hipótesis de bombeo.**

| Mes del año      | Hipótesis de bombeo (hm <sup>3</sup> /año) |      |      |      |
|------------------|--|------|------|------|
|                  | 2,21                                       | 2,6  | 3,2  | 4,5  |
| Octubre (l/s)    |  | 22   | 25   | 18,4 |
| Noviembre (l/s)  |  |      |      | 9    |
| Diciembre (l/s)  |  |      |      |      |
| Enero (l/s)      |  |      |      |      |
| Febrero (l/s)    |  |      |      |      |
| Marzo (l/s)      |  |      |      |      |
| Abril (l/s)      |  |      |      |      |
| Mayo (l/s)       |  |      |      |      |
| Junio (l/s)      |  |      |      |      |
| Julio (l/s)      |  |      |      | 15,2 |
| Agosto (l/s)     |  | 17   | 21   | 20,4 |
| Septiembre (l/s) |  | 21,5 | 21,5 | 21,5 |

**Tabla 16.13-16. Disponibilidad neta para abastecimiento urbano una vez descontada la aportación complementaria que es preciso suministrar desde el bombeo bruto a la red hidrográfica superficial. (AC=aportación complementaria a la red hidrográfica superficial. DN= disponibilidad neta para abastecimiento urbano).**

| Año Hidrológico | Hipótesis de bombeo (hm <sup>3</sup> /año) |                              |                              |                              |                              |                              |                              |                              |
|-----------------|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                 | 2,21                                       |                              | 2,60                         |                              | 3,20                         |                              | 4,50                         |                              |
|                 | AC<br>(hm <sup>3</sup> /año)               | DN<br>(hm <sup>3</sup> /año) | AC<br>(hm <sup>3</sup> /año) | DN<br>(hm <sup>3</sup> /año) | AC<br>(hm <sup>3</sup> /año) | DN<br>(hm <sup>3</sup> /año) | AC<br>(hm <sup>3</sup> /año) | DN<br>(hm <sup>3</sup> /año) |
| 1985-1986       | 0,07                                       | 2,14                         | 0,27                         | 2,33                         | 0,24                         | 2,96                         | 0,40                         | 4,10                         |
| 1986-1987       | 0,01                                       | 2,20                         | 0,19                         | 2,41                         | 0,26                         | 2,94                         | 0,52                         | 3,98                         |
| 1987-1988       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,13                         | 2,47                         | 0,31                         | 2,89                         | 0,39                         | 4,11                         |
| 1988-1989       | 0,10                                       | 2,11                         | 0,25                         | 2,35                         | 0,29                         | 2,91                         | 0,58                         | 3,92                         |
| 1989-1990       | 0,05                                       | 2,16                         | 0,18                         | 2,42                         | 0,21                         | 2,99                         | 0,46                         | 4,04                         |
| 1990-1991       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,17                         | 2,43                         | 0,27                         | 2,93                         | 0,24                         | 4,26                         |
| 1991-1992       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,20                         | 2,40                         | 0,34                         | 2,86                         | 0,62                         | 3,88                         |
| 1992-1993       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,15                         | 2,45                         | 0,29                         | 2,91                         | 0,45                         | 4,05                         |
| 1993-1994       | 0,02                                       | 2,19                         | 0,16                         | 2,44                         | 0,27                         | 2,93                         | 0,20                         | 4,30                         |
| 1994-1995       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,22                         | 2,38                         | 0,31                         | 2,89                         | 0,43                         | 4,07                         |
| 1995-1996       | 0,03                                       | 2,18                         | 0,21                         | 2,39                         | 0,21                         | 2,99                         | 0,27                         | 4,23                         |
| 1996-1997       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,13                         | 2,47                         | 0,22                         | 2,98                         | 0,29                         | 4,21                         |
| 1997-1998       | 0,03                                       | 2,18                         | 0,21                         | 2,39                         | 0,21                         | 2,99                         | 0,27                         | 4,23                         |
| 1998-1999       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,21                         | 2,39                         | 0,29                         | 2,91                         | 0,37                         | 4,13                         |
| 1999-2000       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,17                         | 2,43                         | 0,26                         | 2,94                         | 0,45                         | 4,05                         |
| 2000-2001       | 0,03                                       | 2,18                         | 0,16                         | 2,44                         | 0,21                         | 2,99                         | 0,35                         | 4,15                         |
| 2001-2002       | 0,02                                       | 2,19                         | 0,18                         | 2,42                         | 0,29                         | 2,91                         | 0,57                         | 3,93                         |
| 2002-2003       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,18                         | 2,42                         | 0,27                         | 2,93                         | 0,24                         | 4,26                         |
| 2003-2004       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,17                         | 2,43                         | 0,32                         | 2,88                         | 0,21                         | 4,29                         |
| 2004-2005       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,21                         | 2,39                         | 0,28                         | 2,92                         | 0,25                         | 4,25                         |
| 2005-2006       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,18                         | 2,42                         | 0,28                         | 2,92                         | 0,30                         | 4,20                         |
| 2006-2007       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,19                         | 2,41                         | 0,31                         | 2,89                         | 0,20                         | 4,30                         |
| 2007-2008       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,17                         | 2,43                         | 0,31                         | 2,89                         | 0,44                         | 4,06                         |
| 2008-2009       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,18                         | 2,42                         | 0,22                         | 2,98                         | 0,22                         | 4,28                         |
| 2009-2010       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,20                         | 2,40                         | 0,24                         | 2,96                         | 0,24                         | 4,26                         |
| 2010-2011       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,20                         | 2,40                         | 0,31                         | 2,89                         | 0,21                         | 4,29                         |
| 2011-2012       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,18                         | 2,42                         | 0,31                         | 2,89                         | 0,52                         | 3,98                         |
| 2012-2013       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,11                         | 2,49                         | 0,28                         | 2,92                         | 0,11                         | 4,39                         |
| 2013-2014       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,19                         | 2,41                         | 0,25                         | 2,95                         | 0,26                         | 4,24                         |
| 2014-2015       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,17                         | 2,43                         | 0,24                         | 2,96                         | 0,37                         | 4,13                         |
| 2015-2016       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,26                         | 2,34                         | 0,27                         | 2,93                         | 0,37                         | 4,13                         |
| 2016-2017       | 0,00                                       | 2,21                         | 0,21                         | 2,39                         | 0,28                         | 2,92                         | 0,67                         | 3,83                         |
| Promedio        | 0,01                                       | 2,20                         | 0,19                         | 2,41                         | 0,27                         | 2,93                         | 0,36                         | 4,14                         |

En la tabla 16.13-16 se indica, para los diferentes años hidrológicos que se han simulado, la cuantía del bombeo neto disponible para abastecimiento urbano una vez descontada la aportación complementaria que es preciso suministrar desde el bombeo bruto a la red hidrográfica superficial. En dicha tabla se observa que el

bombeo bruto medio para las hipótesis de bombeo de 2,21 hm<sup>3</sup>/año, 2,6 hm<sup>3</sup>/año; 3,2 hm<sup>3</sup>/año y 4,5 hm<sup>3</sup>/año se reduce respectivamente en 0,01, 0,19, 0,27 y 0,36 hectómetros cúbicos.

#### **16.14. Conclusiones.**

No existe ningún criterio objetivo que ponga en duda los resultados proporcionados por el modelo unicelular realizado en el acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo, salvo las incertidumbres inherentes a este tipo de modelos, que se han expuesto con suficiente rigor y claridad en el apartado titulado “Fundamentos matemáticos de los modelos unicelulares de acuíferos” y en el capítulo denominado “Resumen”.

Los resultados que ha proporcionado el modelo unicelular sobre la explotación a la que se ha sometido al acuífero durante el año hidrológico de 2016-2017 han puesto de manifiesto que su aprovechamiento se ha situado por debajo de la potencialidad hídrica que presenta el acuífero, ya que el grado de explotación al que se ha sometido al mismo ha sido de tan solo el 34 por ciento. Este hecho no tendría ninguna importancia si el caudal que se ha bombeado correspondiera a la demanda que realmente se precisa en la zona.

A partir de las diferentes series de recarga natural que se han determinado a lo largo del presente proyecto y de la cuantía de la demanda futura que ha estimado el Gobierno de la Rioja en los diferentes estudios, que ha realizado al respecto para la zona objeto del presente análisis, cabe indicar que es factible incrementar sustancialmente el agua que se ha bombeado desde el acuífero durante el año hidrológico 2016-2017, ya que de acuerdo al modelo matemático realizado en el presente estudio es posible adaptar la potencialidad hídrica del acuífero a la futura demanda de agua que será preciso satisfacer. Esto será posible siempre que se haga uso de la técnica de utilización conjunta entre aguas superficiales y subterráneas.

El esquema de gestión hídrica que se propone operara se expone y explicita a continuación:

- 1) Durante los meses de invierno y primavera la demanda se satisfará a partir de recursos superficiales captados directamente en el río Oja, aguas arriba de la población de Ezcaray, bien mediante un azud que derive agua desde su cauce o bien mediante la construcción de zanjias subterráneas transversales o perpendiculares al lecho del río.

Los diferentes estudios realizados hasta la fecha por el Gobierno de La Rioja, así como el análisis de los recursos superficiales realizado en el presente estudio, ponen de manifiesto la existencia de un caudal circulante por el río Oja de suficiente entidad para satisfacer la demanda que precisa el abastecimiento urbano de la zona durante la época reseñada.

- 2) En los meses de verano y otoño, probablemente hasta bien entrado noviembre e incluso hasta principios de diciembre, la demanda de agua se solventará mediante bombeo de agua subterránea en los diferentes sondeos perforados hasta la fecha en el acuífero Jurásico comprendido entre los ríos



Tirón y Santurdejo. Probablemente no será preciso realizar ningún sondeo complementario a los ya existentes, pero la confirmación de la anterior aseveración dependerá bien de la realización de estudios complementarios de un mayor detalle o bien de la experiencia que se derive del propio funcionamiento de las instalaciones.

La explotación que se propone realizar en el acuífero precisará de un caudal continuo de bombeo de 200 l/s a 250 l/s durante aproximadamente 5 meses. Esta cuantía equivale a un volumen de agua anual que puede estar comprendido entre 2,6 hm<sup>3</sup> y 3,2 hm<sup>3</sup>. De acuerdo a dichos volúmenes de explotación el grado de aprovechamiento del acuífero se localizaría entre un 42 y 61 por ciento.

La secuencia de bombeo propuesta no constituye una actuación rígida e inamovible, por lo que si las circunstancias lo requieren podría iniciarse antes o finalizarse con posterioridad a las fechas indicadas. Así mismo en determinadas épocas punta, como Semana Santa o determinadas festividades, los recursos superficiales procedentes del río Oja podrían cumplimentarse puntualmente con recursos subterráneos.

Dado que el bombeo que se propone realizar es relativamente intenso y concentrado en el tiempo, ya que, como se ha comentado, se limitará a un periodo de tiempo en torno a cinco meses, se precisará hacer uso de la técnica que se denomina utilización esporádica de reservas, que consiste en bombear durante los años secos un volumen de agua superior a la recarga natural y en los húmedos uno inferior. La misma filosofía se puede aplicar dentro de un mismo año hidrológico a los meses lluviosos y secos.

Esta forma de actuar, que tiene como finalidad potenciar la capacidad natural de autoregulación que presentan los acuíferos, tiene como objeto compensar el déficit de agua que se produce en los años secos con el superávit que tiene lugar en los húmedos, por lo que el balance hídrico en el acuífero entre recarga y bombeo, al final de un ciclo hiperanual, suficientemente largo y representativo de todas las tipologías climáticas que pueden tener lugar, sea siempre positivo en mayor o en menor medida.

El adecuado manejo en determinados momentos de los volúmenes almacenados en el acuífero por debajo de la cota de desagüe, constituye la clave para lograr una adecuada gestión sostenible de los recursos hídricos del acuífero. Es importante significar que se trata de un acuífero con importantes variaciones interanuales e intermensuales, tanto en el volumen de agua que se descarga como en el que se almacena. Dicha irregularidad temporal, que se encuentra ligada a las especiales características hidrodinámicas que presenta el acuífero, dificulta enormemente la gestión del mismo dentro de un marco de sostenibilidad, aunque esto no imposibilita que se pueda adecuar el volumen recargado de forma natural a un determinado valor de la demanda con un índice de garantía total.

De acuerdo a las simulaciones realizadas el uso de reservas se compensa siempre en un plazo inferior a doce meses. Por lo que en ningún caso se ha detectado un balance hídrico negativo superior a dicho plazo. En los meses

de agosto, septiembre, octubre y noviembre generalmente se hará uso del agua almacenada por debajo de la cota de desagüe del acuífero, pero en cuanto se produzcan los primeros episodios de recarga las cotas piezométricas volverán a situarse por encima del nivel de descarga a la red hidrográfica superficial.

- 3) La anterior forma de actuar, dado que se trata de acuífero rápido con un periodo de semiagotamiento de 66 días, puede dar origen, durante un cierto tiempo, al secado de alguna o todas las descargas de agua subterránea, que de forma difusa o puntual alimentan a la red fluvial, por lo que debe preverse alguna forma de amortiguación o compensación de las posibles consecuencias que se pudieran derivar, que se puede llevar a efecto vertiendo en los cauces, que potencialmente pudieran verse implicados, una parte del caudal bombeado durante el tiempo que dura la afección.

El grado de afección a la red hidrográfica superficial se cuantifica, para el volumen de explotación que se propone, en un porcentaje comprendido entre el 44 % y el 51% de la descarga que tiene lugar en régimen natural. No obstante, aunque dicho valor es de tipo medio-bajo, el hidrodinamismo que presenta el acuífero provoca que las descargas naturales se sequen entre el 23 % y 32 % del total de meses analizados.

En dichos meses será preciso aportar un caudal compensatorio a la red hidrográfica superficial que estará comprendido entre 9 l/s y 25 l/s, si se considera que dicho caudal debe ser del orden del 20% del descargado de forma natural a la red hidrográfica. La disminución que experimentará volumen medio bombeado en el acuífero por causa de este caudal compensatorio será relativamente pequeña y estará comprendida entre 0,19 hm<sup>3</sup> y 0,23 hm<sup>3</sup>.

- 4) En relación con lo expuesto es importante hacer hincapié en el hecho de no confundir sobreexplotación y uso esporádico de reservas, ya que la diferencia entre ambos conceptos es sustancial, puesto que el primero no asegura a largo plazo ni el aprovechamiento ni la sostenibilidad del recurso hídrico, mientras que el segundo sí lo hace. La propuesta de gestión que se propone corresponde a este último supuesto.
- 5) En esencia, la filosofía que debe presidir en todo momento la gestión hídrica que se propone realizar en el acuífero es la de mantener la sostenibilidad de su aprovechamiento hídrico y la de conservar y mantener los sistemas naturales y restantes usos ligados al mismo, actuando con flexibilidad en función de las necesidades que se presenten, pero siempre teniendo en cuenta que al final de un ciclo hiperanual suficiente largo y representativo debe existir superávit, y que es preciso compensar en un cierto porcentaje de la recarga natural las posibles afección que se produzca al sistema hídrico superficial.

### **16.15. Recomendaciones.**

Dado que el modelo unicelular que se ha realizado para el acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo no clarifica la distribución espacial de las acciones y reacciones que sobre el nivel piezométrico del acuífero y sus descargas naturales pueden comportar las diferentes hipótesis de bombeo que se han simulado, se considera necesario realizar un modelo matemático de flujo de parámetros distribuidos que permita simular aspectos esenciales del funcionamiento hídrico del acuífero, como es su interrelación hídrica con el río Oja y su aluvial bajo la influencia de los bombeos propuestos, ya que el efecto al que puede dar lugar dicha interrelación hídrica puede modificar significativamente el resultado proporcionado por el modelo unicelular. Se estima que dicha modificación contribuirá positivamente a mejorar la gestión que se propone realizar en el acuífero, pero también se considera esencial que la misma se concrete espacialmente y se cuantifique volumétrica y temporalmente.

Para poder proceder a realizar dicho modelo matemático es preciso mejorar el conocimiento hidrogeológico del acuífero en lo que respecta a su geometría, relaciones hídricas y transferencias subterráneas con el acuífero aluvial del río Oja, piezometría de este último acuífero, cuantía y evolución de las descarga del acuífero Jurásico a los ríos Tirón, Santurdejo y Ciloría, y evolución hidroquímica de agua que se bombea en el acuífero jurásico en relación al tiempo de bombeo y a la profundidad a la que se sitúa el nivel dinámico. Este último aspecto es esencial, pues la viabilidad de aprovechamiento del acuífero se ha determinado en relación con la cuantía de sus recursos, pero no respecto a la calidad de los mismos.

Otro aspecto que es necesario conocer con precisión, antes de fijar un caudal definitivo de bombeo, es determinar el potencial impacto ambiental al que podría dar lugar el mismo sobre cualquiera de las descargas de agua que tienen lugar en el acuífero, así como identificar y evaluar las medidas que es preciso adoptar en caso de que este se produzca. Dicho estudio debe contemplar tanto la utilización de métodos hidrológico-hidráulicos como de hábitat.

**17. LOCALIZACIÓN DE ÁREAS  
FAVORABLES PARA LA UBICACIÓN DE  
SONDEOS DE ALTA PRODUCTIVIDAD.**

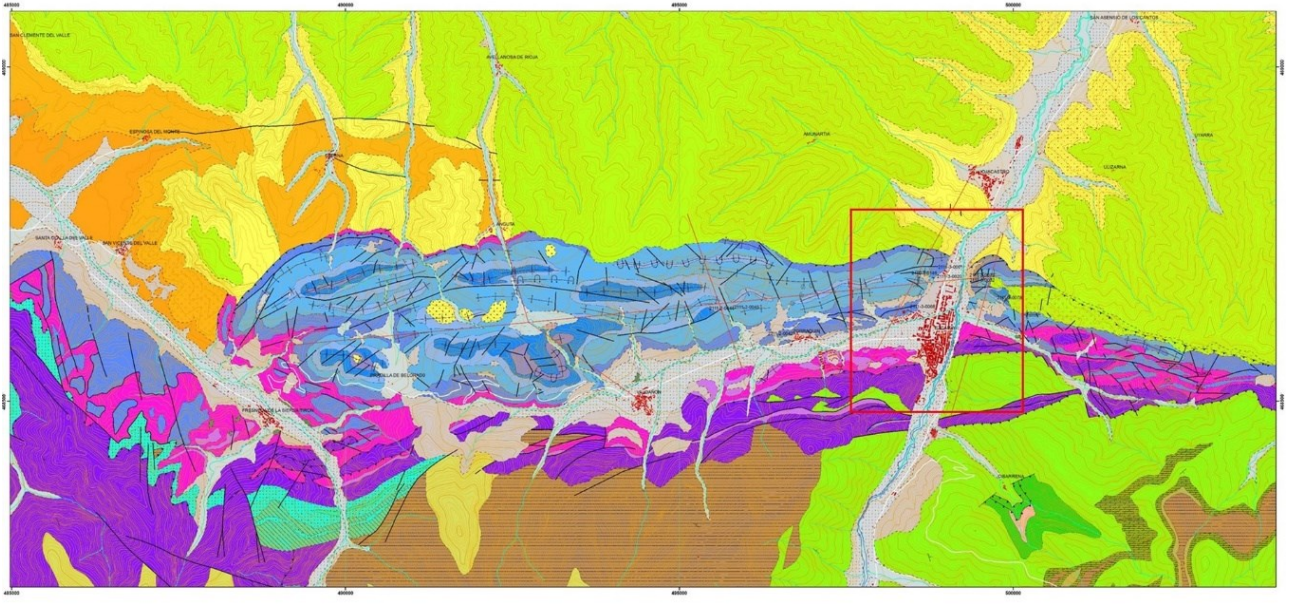




## 17. LOCALIZACIÓN DE ÁREAS FAVORABLES PARA LA UBICACIÓN DE SONDEOS DE ALTA PRODUCTIVIDAD.

Los resultados, que ha proporcionado el modelo unicelular sobre las diferentes hipótesis de explotación que se han simulado, han puesto de manifiesto que el aprovechamiento del acuífero Jurásico, comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo, de acuerdo a la demanda prevista por el Gobierno de La Rioja, si se realiza según la hipótesis de gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas que se propone en el presente documento, se puede solventar mediante bombeo de agua subterránea en los diferentes sondeos perforados hasta la fecha en el acuífero Jurásico, por lo que probablemente no precisará de la realización de ningún sondeo complementario a los ya existentes. La confirmación de la anterior aseveración dependerá bien de la realización de estudios complementarios de un mayor detalle o bien de la experiencia que se derive del propio funcionamiento de las instalaciones. Fundamentalmente de esto último.

No obstante, en las figuras 17-1-a y 17-1-b se localiza la ubicación de tres sondeos por si fuera menester la realización de perforaciones complementarias a las ya existentes. Dos de los sondeos se ubican directamente sobre los afloramientos del acuífero jurásico. El tercero se localizaría sobre el aluvial del río Oja en un paraje sito entre la carretera a Santo Domingo de la Calzada y el río Oja. Si este último sondeo se llegara a realizar sería preciso efectuar previamente a su ubicación definitiva una geofísica. La situación de los tres sondeos que se muestran en las figuras es aproximada por lo que previamente a su realización se precisaría ubicarlos en campo por técnicos especializados.



**Figura 17-1-a. Mapa geológico de la zona de estudio. En la zona marcada en rojo se presenta la propuesta de actuación que se detalla en la figura 17-1-b**



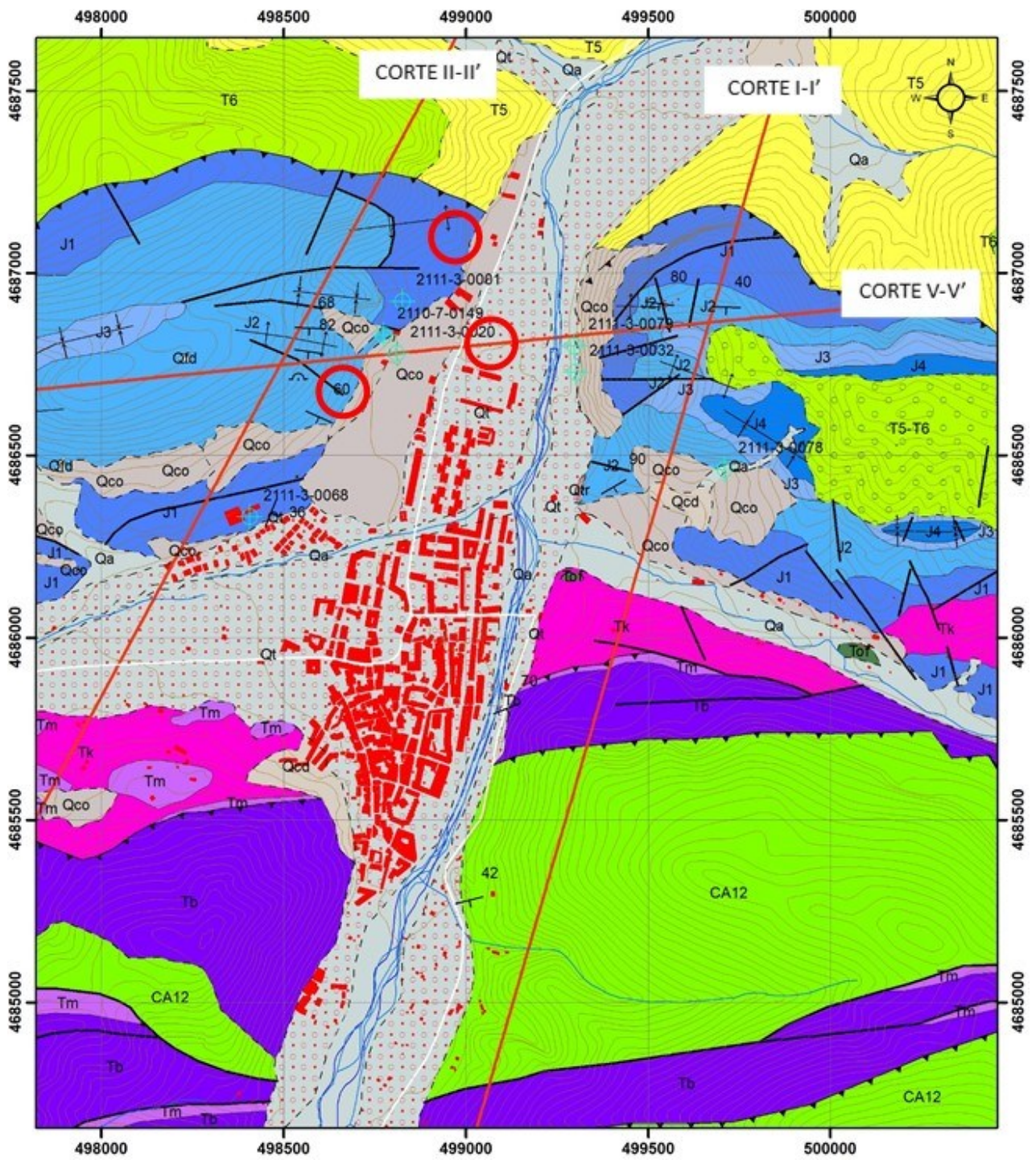


Figura 17-1-b. Propuesta de actuación: los círculos en rojo indican la situación de las áreas favorables para la realización de sondeos.

**18. ANÁLISIS DETALLADO DE  
RESULTADOS Y PROPUESTA DE  
ACTUACIONES FUTURAS.**



## **18. ANÁLISI DETALLADO DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE ACTUACIONES FUTURAS.**

En el capítulo 16 se presentan una serie de conclusiones y recomendaciones que sintetizan perfectamente los resultados del estudio. A continuación, se exponen las mismas:

No existe ningún criterio objetivo que ponga en duda los resultados proporcionados por el modelo unicelular realizado en el acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo, salvo las incertidumbres inherentes a este tipo de modelos, que se han expuesto con suficiente rigor y claridad en el apartado titulado “Fundamentos matemáticos de los modelos unicelulares de acuíferos” y en el capítulo denominado “Resumen”.

Los resultados que ha proporcionado el modelo unicelular sobre la explotación a la que se ha sometido al acuífero durante el año hidrológico de 2016-2017 han puesto de manifiesto que su aprovechamiento se ha situado por debajo de la potencialidad hídrica que presenta el acuífero, ya que el grado de explotación al que se ha sometido al mismo ha sido de tan solo el 34 por ciento. Este hecho no tendría ninguna importancia si el caudal que se ha bombeado correspondiera a la demanda que realmente se precisa en la zona.

A partir de las diferentes series de recarga natural que se han determinado a lo largo del presente proyecto y de la cuantía de la demanda futura que ha estimado el Gobierno de la Rioja en los diferentes estudios, que ha realizado al respecto para la zona objeto del presente análisis, cabe indicar que es factible incrementar sustancialmente el agua que se ha bombeado desde el acuífero durante el año hidrológico 2016-2017, ya que de acuerdo al modelo matemático realizado en el presente estudio es posible adaptar la potencialidad hídrica del acuífero a la futura demanda de agua que será preciso satisfacer. Esto será posible siempre que se haga uso de la técnica de utilización conjunta entre aguas superficiales y subterráneas.

El esquema de gestión hídrica que se propone operara se expone y explicita a continuación:

- 6) Durante los meses de invierno y primavera la demanda se satisfará a partir de recursos superficiales captados directamente en el río Oja, aguas arriba de la población de Ezcaray, bien mediante un azud que derive agua desde su cauce o bien mediante la construcción de zanjas subterráneas transversales o perpendiculares al lecho del río.

Los diferentes estudios realizados hasta la fecha por el Gobierno de La Rioja, así como el análisis de los recursos superficiales realizado en el presente estudio, ponen de manifiesto la existencia de un caudal circulante por el río Oja de suficiente entidad para satisfacer la demanda que precisa el abastecimiento urbano de la zona durante la época reseñada.

- 7) En los meses de verano y otoño, probablemente hasta bien entrado noviembre e incluso hasta principios de diciembre, la demanda de agua se solventará mediante bombeo de agua subterránea en los diferentes sondeos



perforados hasta la fecha en el acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo. Probablemente no será preciso realizar ningún sondeo complementario a los ya existentes, pero la confirmación de la anterior aseveración dependerá bien de la realización de estudios complementarios de un mayor detalle o bien de la experiencia que se derive del propio funcionamiento de las instalaciones.

La explotación que se propone realizar en el acuífero precisará de un caudal continuo de bombeo de 200 l/s a 250 l/s durante aproximadamente 5 meses. Esta cuantía equivale a un volumen de agua anual que puede estar comprendido entre 2,6 hm<sup>3</sup> y 3,2 hm<sup>3</sup>. De acuerdo a dichos volúmenes de explotación el grado de aprovechamiento del acuífero se localizaría entre un 42 y 61 por ciento.

La secuencia de bombeo propuesta no constituye una actuación rígida e inamovible, por lo que si las circunstancias lo requieren podría iniciarse antes o finalizarse con posterioridad a las fechas indicadas. Así mismo en determinadas épocas punta, como Semana Santa o determinadas festividades, los recursos superficiales procedentes del río Oja podrían cumplimentarse puntualmente con recursos subterráneos.

Dado que el bombeo que se propone realizar es relativamente intenso y concentrado en el tiempo, ya que, como se ha comentado, se limitará a un periodo de tiempo en torno a cinco meses, se precisará hacer uso de la técnica que se denomina utilización esporádica de reservas, que consiste en bombear durante los años secos un volumen de agua superior a la recarga natural y en los húmedos uno inferior. La misma filosofía se puede aplicar dentro de un mismo año hidrológico a los meses lluviosos y secos.

Esta forma de actuar, que tiene como finalidad potenciar la capacidad natural de autoregulación que presentan los acuíferos, tiene como objeto compensar el déficit de agua que se produce en los años secos con el superávit que tiene lugar en los húmedos, por lo que el balance hídrico en el acuífero entre recarga y bombeo, al final de un ciclo hiperanual, suficientemente largo y representativo de todas las tipologías climáticas que pueden tener lugar, sea siempre positivo en mayor o en menor medida.

El adecuado manejo en determinados momentos de los volúmenes almacenados en el acuífero por debajo de la cota de desagüe, constituye la clave para lograr una adecuada gestión sostenible de los recursos hídricos del acuífero. Es importante significar que se trata de un acuífero con importantes variaciones interanuales e intermensuales, tanto en el volumen de agua que se descarga como en el que se almacena. Dicha irregularidad temporal, que se encuentra ligada a las especiales características hidrodinámicas que presenta el acuífero, dificulta enormemente la gestión del mismo dentro de un marco de sostenibilidad, aunque esto no imposibilita que se pueda adecuar el volumen recargado de forma natural a un determinado valor de la demanda con un índice de garantía total.

De acuerdo a las simulaciones realizadas el uso de reservas se compensa siempre en un plazo inferior a doce meses. Por lo que en ningún caso se ha

detectado un balance hídrico negativo superior a dicho plazo. En los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre generalmente se hará uso del agua almacenada por debajo de la cota de desagüe del acuífero, pero en cuanto se produzcan los primeros episodios de recarga las cotas piezométricas volverán a situarse por encima del nivel de descarga a la red hidrográfica superficial.

- 8) La anterior forma de actuar, dado que se trata de acuífero rápido con un periodo de semiagotamiento de 66 días, puede dar origen, durante un cierto tiempo, al secado de alguna o todas las descargas de agua subterránea, que de forma difusa o puntual alimentan a la red fluvial, por lo que debe preverse alguna forma de amortiguación o compensación de las posibles consecuencias que se pudieran derivar, que se puede llevar a efecto vertiendo en los cauces, que potencialmente pudieran verse implicados, una parte del caudal bombeado durante el tiempo que dura la afección.

El grado de afección a la red hidrográfica superficial se cuantifica, para el volumen de explotación que se propone, en un porcentaje comprendido entre el 44 % y el 51% de la descarga que tiene lugar en régimen natural. No obstante, aunque dicho valor es de tipo medio-bajo, el hidrodinamismo que presenta el acuífero provoca que las descargas naturales se sequen entre el 23 % y 32 % del total de meses analizados.

En dichos meses será preciso aportar un caudal compensatorio a la red hidrográfica superficial que estará comprendido entre 9 l/s y 25 l/s, si se considera que dicho caudal debe ser del orden del 20% del descargado de forma natural a la red hidrográfica. La disminución que experimentará volumen medio bombeado en el acuífero por causa de este caudal compensatorio será relativamente pequeña y estará comprendida entre 0,19 hm<sup>3</sup> y 0,23 hm<sup>3</sup>.

- 9) En relación con lo expuesto es importante hacer hincapié en el hecho de no confundir sobreexplotación y uso esporádico de reservas, ya que la diferencia entre ambos conceptos es sustancial, puesto que el primero no asegura a largo plazo ni el aprovechamiento ni la sostenibilidad del recurso hídrico, mientras que el segundo sí lo hace. La propuesta de gestión que se propone corresponde a este último supuesto.
- 10) En esencia, la filosofía que debe presidir en todo momento la gestión hídrica que se propone realizar en el acuífero es la de mantener la sostenibilidad de su aprovechamiento hídrico y la de conservar y mantener los sistemas naturales y restantes usos ligados al mismo, actuando con flexibilidad en función de las necesidades que se presenten, pero siempre teniendo en cuenta que al final de un ciclo hiperanual suficiente largo y representativo debe existir superávit, y que es preciso compensar en un cierto porcentaje de la recarga natural las posibles afección que se produzca al sistema hídrico superficial.

Dado que el modelo unicelular que se ha realizado para el acuífero Jurásico comprendido entre los ríos Tirón y Santurdejo no clarifica la distribución espacial de

las acciones y reacciones que sobre el nivel piezométrico del acuífero y sus descargas naturales pueden comportar las diferentes hipótesis de bombeo que se han simulado, se considera necesario realizar un modelo matemático de flujo de parámetros distribuidos que permita simular aspectos esenciales del funcionamiento hídrico del acuífero, como es su interrelación hídrica con el río Oja y su aluvial bajo la influencia de los bombeos propuestos, ya que el efecto al que puede dar lugar dicha interrelación hídrica puede modificar significativamente el resultado proporcionado por el modelo unicelular. Se estima que dicha modificación contribuirá positivamente a mejorar la gestión que se propone realizar en el acuífero, pero también se considera esencial que la misma se concrete espacialmente y se cuantifique volumétrica y temporalmente.

Para poder proceder a realizar dicho modelo matemático es preciso mejorar el conocimiento hidrogeológico del acuífero en lo que respecta a su geometría, relaciones hídricas y transferencias subterráneas con el acuífero aluvial del río Oja, piezometría de este último acuífero, cuantía y evolución de las descargas del acuífero Jurásico a los ríos Tirón, Santurdejo y Ciloría, y evolución hidroquímica de agua que se bombea en el acuífero jurásico en relación al tiempo de bombeo y a la profundidad a la que se sitúa el nivel dinámico. Este último aspecto es esencial, pues la viabilidad de aprovechamiento del acuífero se ha determinado en relación con la cuantía de sus recursos, pero no respecto a la calidad de los mismos.

Otro aspecto que es necesario conocer con precisión, antes de fijar un caudal definitivo de bombeo, es determinar el potencial impacto ambiental al que podría dar lugar el mismo sobre cualquiera de las descargas de agua que tienen lugar en el acuífero, así como identificar y evaluar las medidas que es preciso adoptar en caso de que este se produzca. Dicho estudio debe contemplar tanto la utilización de métodos hidrológico-hidráulicos como de hábitat.

## **19. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**





Ábalos, B. (2001). Nuevos datos microestructurales sobre la existencia de deformaciones precámbricas en la Sierra de la Demanda (Cordillera Ibérica). *Geogaceta*, 30: 3-6.

Ábalos, B., Puelles, P., Fernández-Armas, S., Sarrionandia, F. (2011). EBSD microfabric study of pre-Cambrian deformations recorded in quartz pebbles from the Sierra de la Demanda (N Spain). *Journal of Structural Geology*, 33 (4): 500-518.

Aguas de la Cuenca del Ebro S.A. (2005). Abastecimiento de agua a diversos municipios de la Comunidad Autónoma de la Rioja (Sistema Oja-Tirón)

ACUAES S.A, el Gobierno de La Rioja y el Consorcio de Aguas y Residuos de La Rioja (2017). Convenio suscrito entre ACUAES S.A, el Gobierno de La Rioja y el Consorcio de Aguas y Residuos de La Rioja para la operación y mantenimiento de las obras del proyecto de abastecimiento de los municipios de la zona del río Oja de 13 de enero de 2017.

ACUAES-Z-Amaltea (2014). Afecciones al acuífero Jurásico por el bombeo desde el pozo San Torcuato-2, Ezcaray. La Rioja. Enero 2014).

ACUAES-Z-Amaltea. (2014 bis). Afecciones al acuífero Jurásico por el bombeo desde el pozo San Torcuato-2, Ezcaray. La Rioja. Mayo 2014-octubre 2014).

Andreo, B., Vías, J., López-Geta, J. A., Carrasco, F., Durán, J.J. y Jiménez, P., 2004. Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. *Boletín Geológico y Minero*, 115(2), 177-186.

Andreo, B., Vías, J., Durán, J. J., Jiménez P., López-Geta J.A., Carrasco, F., 2008. Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal* 16: 911-925.

Angulo, A. (2001). Análisis sedimentario de procesos tectónicos y climáticos en la zona de enlace de las cuencas terciarias del Ebro y del Duero (Sector noroccidental de La Rioja y comarca de La Bureba, Burgos), *Zubia*, 19: 177-185.

Arnal, I., Calvet, F., Márquez, L., Márquez-Aliaga, A., Solé de Porta, N. (2002). La plataforma carbonatada epeírica (formaciones Imón e Isábena) del Triásico superior del Noreste de la Península Ibérica. *Acta Geológica Hispánica*, 4: 299–328

Azambre, B., Rossy, M., Lago, M. (1987). Caracteristiques petrologiques des dolerites tholeiitiques d'age triasique (ophites) du domaine pyreneen. *Bulletin de minéralogie*, 110(4): 379-396.

Boquera, J.; Gil Serrano, G. y Zubieta, J. M. (1978). Mapa geológico y Memoria de la Hoja nº 240 (Ezcaray). Mapa Geológico de España E. 1:50.000 IGME, 2ª serie MAGNA, 51 pp. Depósito legal: M-28.337.

Colchen, M. (1974). *Géologie de la Sierra de la Demanda: Burgos-Logroño (Espagne)*. Memoria del Instituto Geológico y Minero de España, 84, 415 p. 2 vol.

Confederación Hidrográfica del Ebro (2010) PLAN HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL EBRO 2010-2015. ANEJO V ESTUDIOS PREVIOS PARA LA APROXIMACIÓN TÉCNICA A LOS CAUDALES ECOLÓGICOS DE LA CUENCA DEL EBRO. Zaragoza, España

Confederación Hidrográfica del Ebro (2015) PLAN HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL EBRO 2015-2021. Zaragoza, España

Consortio de Aguas y Residuos de La Rioja-Z Amaltea (2012). Trabajos realizados durante el estudio de afecciones del bombeo en el pozo Ezcaray-2. Diciembre 2012.)

Consortio de Aguas y Residuos de La Rioja-ZAmaltea (2013a). Informe de perforación de un sondeo de investigación en Zorraquin (La Rioja). Marzo 2013.

Consortio de Aguas y Residuos de La Rioja-ZAmaltea (2013b). Informe de perforación del pozo de Zorraquin (La Rioja). Noviembre 2013.

CSIC. Instituto Nacional de Edafología y Agrobiología. Patronatos "Alonso de Herrera" y "José M<sup>a</sup> Quadrado", 1970. Mapas de suelos de las provincias de Zaragoza, Huesca y Logroño. Escala 1/250.000. 2 vols. Madrid. 68 pp + 3 mapas.

Durán, J.J., Andreo, B., Vías, J., López-Geta, J. A., Carrasco, F. y Jiménez, P. 2004. Clasificación de acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética según la tasa de recarga. *Boletín Geológico y Minero*, 115(2), 199-210.

García, A. (coord.), 1988. Mapa de suelos de Castilla y León. Escala 1:500.000. Dirección General de Medio Ambiente y Urbanismo. Servicio de Ordenación del Territorio y Cartografía. Junta de Castilla y León. Valladolid. 98 pp + mapa.

García-Frank, A. (2007). *Evolución biosedimentaria y secuencial del Jurásico Medio inferior en la Cuenca Ibérica (Sector NO)*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 529 p.

Gómez, J.J., Goy, A. (1979). Las unidades litoestratigráficas del Jurásico Medio y Superior en facies carbonatadas del Sector Levantino de la Cordillera Ibérica. *Estudios Geológicos*, 35: 17-57.

Gómez, J.J., Goy, A. (1998). Las unidades litoestratigráficas del tránsito Triásico-Jurásico en la región de Lécera (Zaragoza). *Geogaceta*, 23: 63–66.

Goy, A., Gómez, J.J., Yébenes, A. (1976). El Jurásico de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica (Mitad Norte). Unidades litoestratigráficas. *Estudios Geológicos*, 32: 391-423.

Heredia, J. y Murillo J. M. (2002) Balance hídrico y estimación de la recarga mediante modelación numérica en pequeñas cuencas del sector sudoriental de la isla de gran canaria. XI Congreso Internacional de Industria, Minería y Metalurgia: Desarrollo sostenible en el Siglo XXI. Un reto para la ingeniería. Zaragoza, España

Heredia, J., García Aróstegui J.L., Murillo J.M., Rubio J.C., González A., López Geta J.A. (2005) A model-based preliminary analysis of the influence of the Rules dam on the hydrologic regime of the Motril-Salobreña aquifer. Monitoring, modeling and management of coastal aquifers. Ed. Eds.: J. Benavente, A. Larabi & K. El Mabrouki. ISBN 84-699-7903-5

Heredia, J. y Meléndez, M. (2016) Premodelo de parámetros agregados Precipitación-Escorrentía de las subcuencas media y alta del río Pas (Cantabria, España). Congreso Hispano-Luso sobre las aguas subterráneas en el segundo ciclo de planificación hidrológica. AIH-Grupo Español-AIH-Grupo Portugués. Madrid, España

IGME, 1985. Proyecto de Investigación Hidrogeológica del Cuaternario del río Glera L Comunidad Autónoma de La Rioja Código SID 34115

Instituto Geográfico Nacional, 2005. Mapa de Suelos de España 1:1.000.000.(Autor de la información temática, Vicente Gómez-Miguel). Madrid.

ITGE, 1987. Ensayo de bombeo en el sondeo EZ-2 N.2111-30032.EZCARAY (LA RIOJA). Código SID: 34139

ITGE, 1987 Estudio hidrogeológico para la mejora de los abastecimientos de las poblaciones de las cuencas del río Oja y media-alta del Arroyo Zamaca (LA RIOJA). Código SID: 34142

ITGE, 1988. Estudio para la determinación de la distribución espacial de los parámetros hidrogeológicos T Y S en el acuífero aluvial del río Oja (LA RIOJA). Código SID: 34145

ITGE, 1989. Informe sobre los bombeos de ensayo realizados en los sondeos de EZCARAY 2 (PEÑA SAN TORCUATO) Y EZCARAY 3 (CANTERA). LA RIOJA, Código SID:34179

ITGE, 1990 Proyecto de asesoramiento en materia de aguas subterráneas a la Comunidad Autónoma de La Rioja. Informe técnico para la propuesta de delimitación de un perímetro de protección en el sondeo EZCARAY-2 (LA RIOJA). Septiembre, 1.990. Código SID 34181

IUSS Working Group WRB, 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la

nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.

Jenson, S.K. & J.O. Domingue, 1988: Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 11, 1593–1600.

Lago, M. (1980). *Estudio geológico, petrológico, geoquímico y de aprovechamiento industrial de las rocas ofíticas del Norte de España*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 444 p.

Lago, M., Galé, C., Arranz, E., Vaquer, R., Gil-Imaz, A., Pocoví, A. (2000). Triassic tholeiitic dolerites («ophites») of the El Grado diapir (Pyrenees, Huesca, Spain): emplacement and composition. *Estudios Geológicos*, 56 (1-2): 3-8.

Liñán, E., Tejero, R. (1988). Las formaciones precámbricas del antiforme de Paracuellos (Cadenas Ibéricas). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geológica)*, 84 (1-2): 39-49.

López Olmedo, F., Palacio Suárez, J., P. Dávila Ruiz M.D.T., Luis López, F., Garcia Rojo E., Martínez Cano, M., Pérez Ruiz, J., García-Brazales Gómez, R., Monzón Lara, P. Mapa Geológico Digital continuo E. 1: 50.000, Zona Ibérica (Zona-1700), in GEODE. Mapa Geológico Digital continuo de España. [en línea]. [10-01-2018]. Disponible en: <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/geodezona.aspx?Id=Z1700>

Lotze, F. (1957). Zum Alter nordwestspanischer Quarzit-Sandstein Folgen. *Neues Jahrbuch für Geologie und Palaeontologie Monatshefte*, 10: 464-471.

Lotze, F. (1961). Das Kambrium Spanien. Teil 1: Stratigraphie. *Abhandlungen der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Klasse*, 6: 283-498.

Mancera Molero, E. (2013). Evaluación de la recarga en un acuífero carbonático sometido a explotación intensiva. El acuífero de Bedmar-Jódar (Jaén). Trabajo de fin de master Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Universidad de Málaga, 79 páginas. Málaga.

Marín, A., 2009. Los Sistemas de Información Geográfica aplicados a la evaluación de recursos hídricos y a la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos carbonatados. Caso de la Alta Cadena (Provincia de Málaga). Tesis de Licenciatura, Universidad de Málaga.

MIMAM (2005). Informe de viabilidad del proyecto de abastecimiento de agua a diversos municipios de la Comunidad Autónoma de La Rioja (Sistema Oja-Tirón). Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente.

Muñoz, A. (1992). *Análisis tectosedimentario del Terciario, sector occidental de la cuenca del Ebro (comunidad de La Rioja)*. Instituto de Estudios Riojanos, 348 p.

Palacios, T. (1982). *El Cámbrico entre Viniegra de Abajo y Mansilla*. Biblioteca de Temas Riojanos, 48, 86 p.

Pardo, G., Arenas, C., González, A., Luzón, A., Muñoz, A., Pérez, A., Pérez-Rivarés, F.J., Vázquez-Urbez, M., Villena, J. (2004). La Cuenca del Ebro. En: *Geología de España* (J.A. Vera, (Ed.), SGE-IGME, Madrid, 533-543.

Pardo-Igúzquiza E., Durán J.J. and Dowd P.A., 2013. Automatic detection and delineation of karst terrain depressions and its application in geomorphological mapping and morphometric analysis. *Acta Carsologica* 42/1, 17-24.

Pérez-Lorente, F., Pavía Santamaría, S., Pérez Gómez, A. (1988). Geología del borde norte de la Sierra de la Demanda entre los ríos Najerilla y Oja. *Zubía*, 6: 73-79.

Shergold, J. H., Liñán, E., Palacios, T. (1983). Late Cambrian trilobites from the Najerilla Formation, north-eastern Spain. *Palaeontology*, 26 (1): 71-92.

Samper, J., Huguet, L., Ares, J. y García-Vera, M.A. (2005): Manual del usuario del programa Visual BALAN v2.0. Editorial ENRESA. Madrid. 139 p.

Samper, J., M.A. García-Vera, B. Pisani, D. Alvares, A. Varela y J.A. Losada. (2005) Modelos hidrológicos y sistemas de información geográfica para la estimación de los recursos hídricos: aplicación de GIS-BALAN a varias cuencas españolas. VII Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'05, Coruña, España

Samper, J., Alvares, D., Pisani, B., García-Vera M.A. (2007) Evaluación del efecto del cambio climático en los recursos hídricos en la Cuenca Hidrográfica del Ebro con GIS-BALAN. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VIII. Eds. Giráldez Cervera y Jiménez Hornero

Sopeña, A. (editor) (2004). Cordillera Ibérica y Costero Catalana. En: *Geología de España* (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 587-634.

Valladares, M.I., Barba, P., Ugidos, J.M., Colmenero, J.R., Armenteros, I. (2000). Upper Neoproterozoic-Lower Cambrian sedimentary successions in the Central Iberian Zone (Spain): sequence stratigraphy petrology and chemostratigraphy. Implications for other European zones. *International Journal of Earth Sciences*, 89: 2–20.

Villena, J. y Pardo, G. (1983). El Carbonífero de la Cordillera Ibérica (sectores de Sierra de La Demanda, Montalbán y Puig Moreno). En: *Carbonífero y Pérmico de*



*España.* (Coord. C. Martínez Díaz.) Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp. 189-206.