

**ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA DESARROLLAR DIVERSOS TRABAJOS
RELACIONADOS CON EL INVENTARIO DE RECURSOS HÍDRICOS
SUBTERRÁNEOS Y CON LA CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS
COMPARTIDOS ENTRE DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS**



**DEFINICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
COMPARTIDAS ENTRE DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS**

Guadalquivir-Cuencas Mediterráneas Andaluzas

Informe nº 9 (SIERRA GORDA-POLJÉ DE ZAFARRAYA)

10. Sierra Gorda-Zafarraya

11. Sierra de Gibalto

12. Fuente Camacho

ÍNDICE GENERAL

MEMORIA

Pág.

PRESENTACIÓN

1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ENCUADRE ADMINISTRATIVO	1
2. ANTECEDENTES	4
3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	10
3.1. CONTEXTO GEOLÓGICO. FORMACIONES HIDROGEOLÓGICAS	10
3.2. ESTRUCTURA GEOLÓGICA. TECTÓNICA. INCIDENCIA HIDROGEOLÓGICA.....	12
3.3. GEOMORFOLOGÍA. FORMAS DE INFILTRACIÓN PREFERENCIAL	17
3.4. LÍMITES Y GEOMETRÍA DE LOS DIFERENTES ACUÍFEROS	18
3.5. HIDROMETRÍA Y PIEZOMETRÍA	19
3.6. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO	25
3.7. PARÁMETROS HIDRÁULICOS E HIDROGEOLÓGICOS	27
3.8. EXPLOTACIONES SUBTERRÁNEAS.....	28
4. CLIMATOLOGÍA	30
4.1. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA	30
4.2. ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL	31
5. RECARGA DE ACUÍFEROS.....	36
5.1. EL CÓDIGO RENATA.....	36
5.2. EL ACUÍFERO ALUVIAL DEL POLJE DE ZAFARRAYA.....	38
5.2.1. Diseño del modelo	39
5.2.2. Calibración	44
5.2.3. Balances y funcionamiento	46
5.3. MASCH SERRA GORDA-ZAFARRAYA, SIERRA GIBALTO Y FUENTE CAMACHO	48
5.3.1. Diseño del modelo	48
5.3.2. Calibración	56
5.3.3. Resultados	59
6. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN NO INFLUENCIADO	62
7. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN INFLUENCIADO	65
8. BALANCE HÍDRICO SEGÚN DIVISORIA HIDROGRÁFICA E HIDROGEOLÓGICA	68
9. RESUMEN Y CONCLUSIONES	73
REFERENCIAS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.1. Localización geográfica y encuadre administrativo de la MASCH Sierra Gorda-Zafarraya.....	2
Figura 1.2. Esquema hidrogeológico junto con las divisorias de las MASb y los límites definidos para el “Conjunto hidrogeológico”.....	3
Figura 3.1. Mapa hidrogeológico del área de estudio.....	13
Figura 3.2. Cortes hidrogeológicos representativos de la zona estudiada. La trayectoria de los cortes se puede ver en la figura 1.....	14
Figura 3.3. Esquema hidrogeológico de la masa de agua subterránea con continuidad hidrogeológica (MASCH) de Sierra Gorda-Zafarraya.....	15
Figura 3.4. Esquema de funcionamiento propuesto.....	16
Figura 3.5. Localización de los manantiales y sondeos de control piezométrico significativos.....	21
Figura 3.6. Hidrogramas de algunos manantiales representativos.....	22
Figura 3.7. Evolución de niveles piezométricos en algunos puntos de control significativos del área.....	24
Figura 3.8. Esquema simplificado del Arroyo de La Madre y su relación con el acuífero carbonatado de Sierra Gorda y el detrítico de Zafarraya.....	27
Figura 3.9. Explotaciones anuales estimadas en el polje de Zafarraya y en el resto de la MASCH de Sierra Gorda-Zafarraya.....	29
Figura 4.1. Estaciones climáticas utilizadas para la determinación de la recarga.....	31
Figura 4.2. Isoyetas para la precipitación media y para los años tipo seco y húmedo.....	33
Figura 4.3. Zonas de influencia de las estaciones pluviométricas determinadas por polígonos de Thiessen.....	33
Figura 4.4. Yetograma anual de la precipitación media.....	33
Figura 4.5. Distribución normal ajustada y años tipo.....	34
Figura 4.6. Diagrama ombrotérmico del año medio.....	34
Figura 4.7. Desviación acumulada de la precipitación anual respecto a la media.....	35
Figura 5.1. Diagrama de flujo del código RENATA.....	36
Figura 5.2. Diagrama de flujo del código RENATA detallando los datos que se tienen que aportar al programa.....	37
Figura 5.3. Aportaciones estimadas del arroyo de La Madre al acuífero carbonatado y al aluvial.....	39
Figura 5.4. Mallado y límites del modelo en el acuífero aluvial del polje de Zafarraya.....	40
Figura 5.5. A) Sectores climáticos calculados por polígonos de Thiessen ajustados al mallado aplicado en el código RENATA. B) Sector del suelo sobre el aluvial.....	41
Figura 5.6. Distribución mensual de las dotaciones de riego utilizadas en la simulación con RENATA.....	41
Figura 5.7. Aportaciones totales estimadas del arroyo de La Madre a la entrada del acuífero aluvial.....	42
Figura 5.8. A) Distribución de la recarga (4 áreas diferentes). B) Localización de las celdas de inyección de recarga autóctona a lo largo del arroyo de La Madre y de explotación.....	43
Figura 5.9. Condiciones en los límites del modelo de flujo.....	43
Figura 5.10. Parámetros hidráulicos tras el proceso de calibración y localización del piezómetro utilizado en el mismo.....	44

Figura 5.11. Evolución piezométrica e hidrométrica medida y simulada. Se representa sobre el plano de isopiezas de enero de 1997 en el que hubo unas fuertes precipitaciones.....	45
Figura 5.12. Valores anuales de los términos del balance hídrico en régimen influenciado	47
Figura 5.13. Mallado y límites del modelo para la determinación de la recarga y del funcionamiento hídrico.....	48
Figura 5.14. Sectores climáticos por polígonos de Thiessen ajustados al mallado aplicado en el código RENATA	49
Figura 5.15. Sectores de suelo aplicados en el código RENATA.....	50
Figura 5.16. Sectores de riego asignados	51
Figura 5.17. Distribución de la recarga en el modelo de flujo (23 zonas diferentes) con cuatro ejemplos.....	51
Figura 5.18. Condiciones en los límites del modelo de flujo.....	53
Figura 5.19. Aportaciones estimadas hacia los carbonatos de Sierra Gorda desde el sector del Polje de Zafarraya y arroyo de La Madre	54
Figura 5.20. Distribución de las explotaciones asignadas en el modelo	55
Figura 5.21. Localización y distribución de las explotaciones y de la recarga.....	55
Figura 5.22. Parámetros hidráulicos de las principales zonas tras el proceso de calibración y piezómetros representativos utilizados en el mismo	56
Figura 5.23. Evolución piezométrica medida (puntos) y simulada (línea continua) en piezómetros representativos.....	57
Figura 5.24. Hidrogramas de algunos manantiales significativos medidos (puntos) y simulados (línea continua)	58
Figura 5.25. Distribución de la recarga según el código RENATA junto con los datos y resultados en cuatro áreas diferentes.....	60
Figura 6.1. Funcionamiento hidrodinámico de las MASCH estudiadas en régimen natural. Las flechas indican el sentido del flujo subterráneo	64
Figura 7.1. Detalle de las isopiezas del acuífero carbonatado en el norte de sierra Gorda en régimen no influenciado y en régimen influenciado en el 09/2018	66

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 2.1. Cambios en la denominación administrativa dadas a las MASb implicadas en el presente documento	6
Tabla 2.2. Balances hidrogeológicos más significativos en régimen natural e influenciado realizados en la zona de estudio entre 1974 y 2001	9
Tabla 3.1. Principales manantiales identificados en el presente estudio en las MASCH	20
Tabla 3.2. Principales puntos con control piezométrico	23
Tabla 4.1. Estaciones climáticas utilizadas con sus principales características	30
Tabla 4.2. Análisis de los diferentes periodos climáticos acontecidos entre octubre de 1972 y septiembre de 2021	35
Tabla 5.1. Características de los sectores climáticos	40
Tabla 5.7. Áreas establecidas con diferente recarga	42
Tabla 5.8. Recarga en el acuífero aluvial del polje de Zafarraya calculada con RENATA para la DHCMA	45
Tabla 5.9. Balance hídrico en régimen NO INFLUENCIADO en el acuífero aluvial del polje de Zafarraya	46
Tabla 5.10. Balance hídrico en régimen INFLUENCIADO en el acuífero aluvial del polje de Zafarraya	46
Tabla 5.11. Características de los sectores climáticos	49
Tabla 5.12. Sectores de suelo: parámetros utilizados	50
Tabla 5.13. Áreas establecidas con diferente recarga	52
Tabla 5.14. Recarga por precipitación y retornos de riego en las 23 áreas diferenciadas	60
Tabla 5.15. Precipitación media, recarga media por precipitación y tasa de recarga en los sectores de suelo considerados en el modelo	60
Tabla 5.16. Recarga de las MASCH y por demarcaciones hidrográficas	61
Tabla 6.1. Balance hídrico en régimen natural en las MASCH	62
Tabla 6.2. Distribución de los recursos de cada MASCH en régimen natural	62
Tabla 6.3. Balance hídrico en régimen natural estacionario de las MASCH y por DH	63
Tabla 7.1. Balance hídrico en régimen influenciado en las MASCH	65
Tabla 7.2. Distribución de los recursos de cada MASCH en régimen influenciado	66
Tabla 7.3. Balance hídrico en régimen influenciado de las MASCH y por DH	67
Tabla 8.1. Comparativa de la distribución de los recursos hídricos subterráneos renovables en régimen natural en las tres MASCH según las divisorias hidrográfica e hidrogeológica correspondientes a las DHCMA y a la DHG	69

El presente documento técnico-científico se integra dentro de los estudios que la Dirección General del Agua ha encargado al CN-Instituto Geológico y Minero de España, a través de una Encomienda de Gestión para desarrollar diversos trabajos relacionados con el Inventario de Recursos Hídricos Subterráneos y con la Caracterización de Acuíferos Compartidos entre Demarcaciones Hidrográficas.

PRESENTACIÓN

Los Planes Hidrológicos de cuenca definen las masas de agua subterránea (MASb) dentro de los límites de su propia demarcación, por lo que formal y administrativamente no existen masas de agua subterránea compartidas. Sin embargo, la realidad física de los acuíferos no se ajusta a lo expuesto, ya que masas de agua subterránea contiguas, pero pertenecientes a demarcaciones hidrográficas diferentes, tienen acuíferos conectados hidráulicamente entre sí. En consecuencia, una de las medidas necesarias de coordinación de los Planes Hidrológicos de cuenca es la definición y delimitación de dichos acuíferos compartidos, así como la asignación de recursos de cada acuífero compartido entre las cuencas afectadas.

En cumplimiento del Artículo 9.2 del Reglamento de la Planificación Hidrológica, los planes hidrológicos realizan una propuesta de masas de agua subterránea compartidas con otras demarcaciones. Para la definición de dichas masas de agua y la asignación de sus recursos, se ha de tomar como referencia lo previsto en la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional (PHN), que establece en su Anexo 1 un listado de unidades hidrogeológicas compartidas y su correspondiente asignación de recursos a los distintos ámbitos de planificación.

Desde la aprobación del PHN se han aprobado los planes hidrológicos de cuenca de varios ciclos sucesivos de planificación. En estos planes se han delimitado y caracterizado masas de agua subterránea conforme a la Directiva Marco del Agua, hecho que progresivamente ha convertido al Anexo I del PHN antes mencionado en algo carente de utilidad por su evidente desactualización. El avance en el conocimiento de los acuíferos españoles que se pone en evidencia a través de los contenidos incorporados en los planes hidrológicos de cuenca ha sido notable, identificando casos de acuíferos compartidos no considerados en el vigente PHN y mejorando la definición y delimitación de los contemplados.

Con el objeto de disponer de un trabajo que sirva como referencia técnica a considerar para actualizar los contenidos coordinadores del Plan Hidrológico Nacional respecto a los acuíferos compartidos, la Dirección General del Agua encargó al Instituto Geológico y Minero de España un trabajo técnico armonizado y actualizado de caracterización, mejora del conocimiento y reducción de incertidumbres para estos acuíferos compartidos.

Este trabajo ha partido de la información recogida en los planes hidrológicos del segundo ciclo. A este respecto, el IGME ha analizado las propuestas incluidas en dichos planes y elaborado una metodología común que permite su aplicación a todas las masas de agua subterránea con continuidad hidrogeológica (MASCH). Esta metodología se ha justificado técnicamente, al igual que el empleo de otras sistemáticas necesarias para analizar situaciones o escenarios que precisen de un tratamiento excepcional o diferenciado.

En concordancia con los objetivos perseguidos, esta memoria contempla la identificación, caracterización y mejora del conocimiento de los acuíferos compartidos en las MASCH de Sierra Gorda-Zafarraya, integrada por las MASb ES060MSBT060.025, Sierra Gorda-Zafarraya, adscrita a la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (DHCMA), y la MASb ES050MSPF011009021 Sierra Gorda-Zafarraya, perteneciente administrativamente a la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (DHG); La MASCH de Sierra Gibalto, cuya mitad occidental está integrada por las MASb de Gibalto y Arroyo Marín (ES060MSBT060-028), en la DHCMA, y la mitad oriental está incluida en la MASb de Sierra Gorda-Zafarraya de la DHG (ES050MSBT000054000); Y, por último, la MASCH de Fuente Camacho, que aunque no está descrita como MASb en ninguna DH, constituye un acuífero claramente diferenciado del resto y localizado entre los ámbitos de planificación de la DHCMA y la DMHG.

Los resultados obtenidos servirán como referencia técnica en la tarea de actualización de los contenidos que a este respecto debe incluir el Plan Hidrológico Nacional a partir de las propuestas de los planes hidrológicos de cuenca.

1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ENCUADRE ADMINISTRATIVO

En el extremo occidental de la provincia de Granada se encuentra la Sierra Gorda de Loja, cuya continuación hacia el S es la sierra de Alhama, compartida con la provincia de Málaga. Constituyen un macizo montañoso con un rango de altitudes comprendido entre 450 m s.n.m y casi 1.700 m s.n.m. (altitud media próxima de 1.300 m s.n.m.) y una extensión total conjunta de 356 km². Entre ambas sierras y con dirección aproximada E-O se extiende la depresión endorreica del polje de Zafarraya, en la provincia de Granada, con cotas que varían entre 880 y 1.000 m s.n.m. y una superficie del orden de 25 km². La extensión de estas sierras comprende los municipios de Loja, Salar, Alhama de Granada y Zafarraya, en la provincia de Granada, y Alcaucín, Periana y Alfarnate, en la de Málaga. La vegetación predominante en la región es bosque relicto de tipo mediterráneo, aunque muy disperso, salvo en los bordes de los afloramientos calcáreos y en el interior de la depresión de Zafarraya, donde el terreno es mayoritariamente de uso agrícola.

Desde el punto de vista administrativo, sierra Gorda, sierra de Alhama y el polje de Zafarraya se integran en dos masas de agua subterránea (MASb), entre ambas el límite de separación es exclusivamente administrativo definido por la divisoria hidrográfica natural entre la DHCMA y la DHG, que, como se verá en este documento, no coincide con la divisoria hidrogeológica.

La primera de estas masas, cuyo código administrativo es ES060MSBT060-025, se denomina “Sierra Gorda-Zafarraya” y se encuentra adscrita a la DHCMA (Figura 1.1). Se distribuye en su mayor parte por la provincia de Granada y, en menor medida, por la de Málaga. Su superficie es de 160,8 km², aunque sus afloramientos permeables ocupan 141,9 km² (110,8 carbonáticos y 31,1 de otras litologías). En el documento elaborado por la DHCMA para los Planes Hidrológicos del segundo ciclo se hace constar una superficie oficial de afloramientos permeables de 138 km². Esta masa incluye la sierra de Alhama (salvo el extremo oriental de la misma), el polje de Zafarraya y parte de los afloramientos calizos de Sierra Gorda. Engloba, además, parte de la cuenca hidrográfica del arroyo de La Madre cuya escorrentía superficial termina infiltrándose en sumideros kársticos que se localizan en el extremo occidental del polje. Este es susceptible de sufrir inundaciones de hasta varios meses de duración en años muy húmedos (López-Chicano et al., 2002). Con el fin de mitigar los efectos negativos de las mismas, desde el año 1992, existe un azud y un túnel que trasvasa agua, solo en las épocas en que existe riesgo de inundación, desde el arroyo de la Madre a la cuenca del río Vélez. Este curso fluvial recibe las aportaciones del río Guaro, cuyo nacimiento es fruto del drenaje subterráneo de la sierra de Alhama.

La segunda MASb, cuyo código es ES050MSBT000054000, también recibe el nombre de “Sierra Gorda-Zafarraya”, administrativamente se encuentra anexada a la DHG (Figura 1.1). Su superficie, que está ocupada mayoritariamente por el resto de los afloramientos carbonáticos de Sierra Gorda, es de 339,2 km². Estos se extienden prácticamente en su totalidad por la provincia de Granada, abarcando desde la linde norte de la anterior MASb hasta el curso del río Genil, que constituye su borde septentrional, mientras que al E y al O sus límites son respectivamente los valles de dos de sus afluentes, el río Salar y el arroyo de las Mozas. Este último se llama Río Frío a partir de la Venta del Rayo.

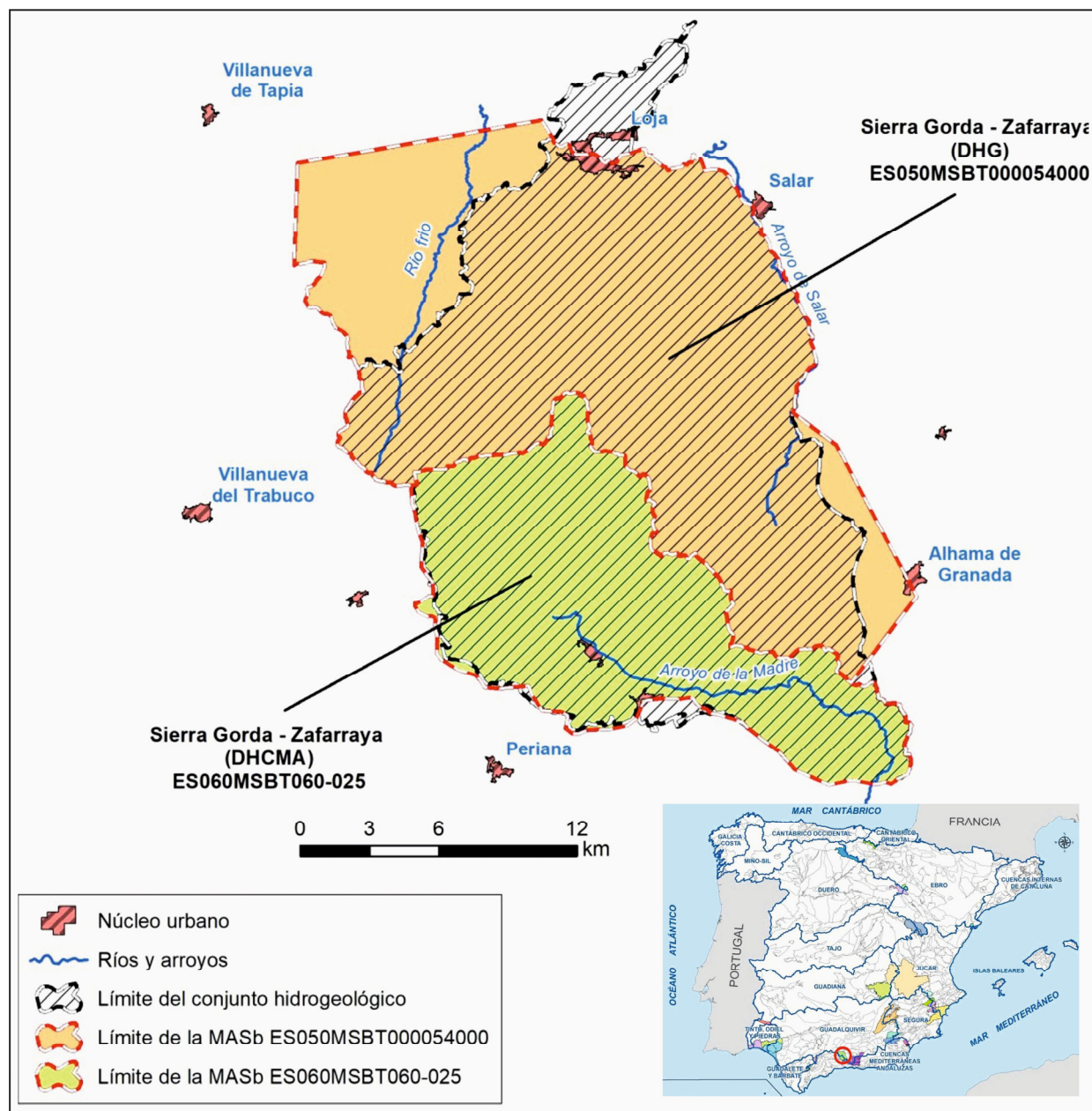


Figura 1.1. Localización geográfica y encuadre administrativo de la MASCH Sierra Gorda-Zafarraya

Aunque desde el punto administrativo de ambas demarcaciones se contempla el ámbito ocupado por las dos MASb identificadas con los códigos ES050MSBT000054000 y ES060MSBT060-025, atendiendo al funcionamiento hidrogeológico se va a considerar un “Conjunto hidrogeológico” que estaría constituido por estos dos ámbitos más el Hacho de Loja, la Sierra de Gibalto y el aluvial del Genil, dejando fuera el área oeste de la Alcaicería. En la figura 1.2 se recoge un esquema de la MASCH de Sierra Gorda-Zafarraya con los límites administrativos definidos para sus MASb y el establecido en este trabajo para realizar el estudio del “Conjunto hidrogeológico”. Dentro de este conjunto hidrogeológico hay que destacar que la Sierra de Gibalto y el acuífero terciario de Fuente Camacho tienen un comportamiento hidrogeológico muy diferenciado al de la MASCH Sierra Gorda-Zafarraya. Dado que ambos acuíferos también se localizan entre ambas DH, en este documento se van a considerar como unidades intercuenas (MASCH) diferentes.

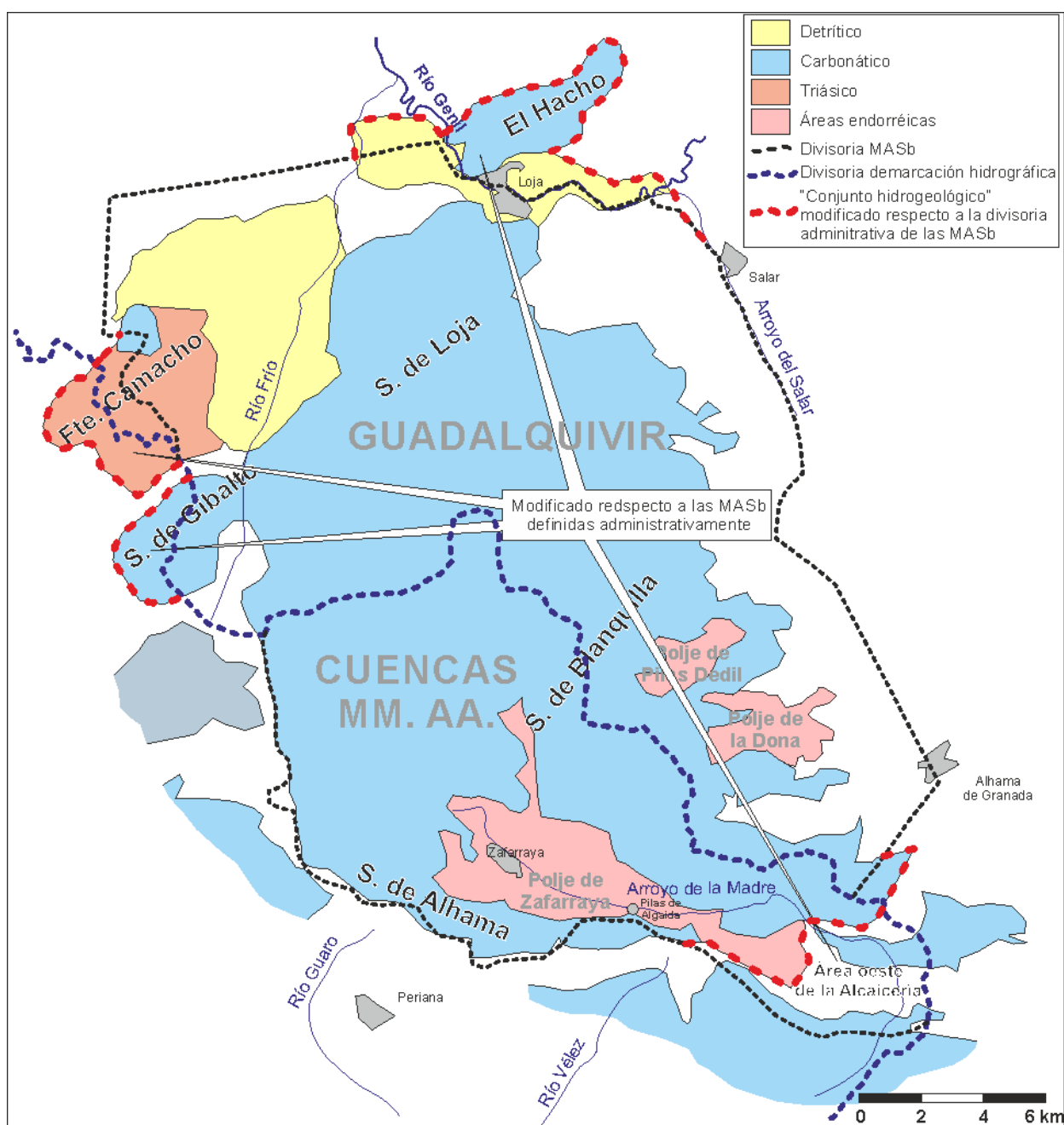


Figura 1.2. Esquema hidrogeológico junto con las divisoria de las MASb y los límites definidos para el "Conjunto hidrogeológico".

2. ANTECEDENTES

El primer estudio hidrogeológico conocido acerca del ámbito en el que se centra el presente informe corresponde a la memoria inédita de Anguita, F. et al. (1969), basada en los trabajos llevados a cabo por el SGOP en el polje de Zafarraya en la década de 1960. Años más tarde, en la década de 1970, ven la luz numerosos trabajos hidrogeológicos sobre el ámbito de estudio, dirigidos desde la Universidad de Granada. Delgado-Moya (1973) realizó un estudio general de carácter geomorfológico e hidrogeológico sobre el macizo de Sierra Gorda. Un año más tarde, Delgado-Moya et al. (1974) aportaron los primeros valores de parámetros hidráulicos y datos derivados de un balance hídrico en el acuífero de Sierra Gorda. En dicho documento asignaron entre 108-111 hm³/año de recursos hídricos medios al mencionado acuífero: 106 hm³/a drenados por manantiales y 2 hm³/año como trasferencias laterales subterráneas ocultas. En el cálculo de los recursos no se consideró la aportación alóctona procedente de la cuenca del arroyo de la Madre. Ese mismo año, Hidalgo (1974a y b) e Hidalgo y Fernández-Rubio (1974) realizaron varios estudios sobre la hidrogeología del polje de Zafarraya y del acuífero de Sierra Gorda en su conjunto, para lo que utilizaron buena parte de los datos generados por el SGOP durante los años 60. Según Hidalgo (1974a), el valor medio de la recarga total en el acuífero ascendía a 113 hm³/año (108 hm³/a de componente autóctona y 5 hm³/a alóctona), los cuales eran drenados de manera natural por manantiales. Casares (1978 y 1981) y Casares et al. (1979) estudiaron aspectos hidroquímicos e hidrodinámicos del Hacho de Loja, macizo que se ha sugerido -como se expone en otros párrafos del presente apartado- que tiene conexión hidráulica con Sierra Gorda.

En la década de 1980 continúa la investigación hidrogeológica de los acuíferos de la región, con el impulso del Instituto Geológico y Minero de España, en colaboración con otras instituciones. Moreno-Calvillo y Castillo (1982) realizaron una síntesis hidrogeológica del acuífero de Sierra Gorda basándose en estudios previos. Los trabajos de investigación del IGME (1983a), en el marco del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS), permitieron definir el sistema acuífero nº 40, denominado “Mesozoico calizo-dolomítico de las sierras del Torcal-Sierra Gorda” (Tabla 1.1, columna A), en el que se incluyó la zona considerada en el presente trabajo. El informe técnico nº 9 de dicho estudio estuvo dedicado a Sierra Gorda. A este macizo se le asignaron 104 hm³/a de recursos por recarga autóctona en una superficie de 288 km², a los que se añadió 7 hm³/a por infiltración de aguas superficiales procedentes de materiales adyacentes de baja permeabilidad. Las salidas por manantiales se evaluaron en 110 hm³/a (8 hm³/a por el borde meridional y 102 hm³/a hacia el río Genil) y se dedujo un caudal medio bombeado de 1 hm³/a. Dos años antes de la publicación de los resultados del PIAS, López-Geta et al. (1981) presentaron un estudio sobre las posibilidades de regulación artificial del manantial de Guaro, situado en la cabecera del río Vélez. La continuación de los trabajos del PIAS en la década de 1980 condujo a Rubio y Del Valle (1987) a una actualización del balance hídrico del acuífero de Sierra Gorda. En ese documento se asignaron 100 hm³/a de recarga media directa y 3 hm³/a de componente alóctona a la citada unidad hidrogeológica. De ellos, 100 hm³/a serían drenados por manantiales y 3 hm³/a por bombeo.

Previo a la ejecución del túnel de trasvase del arroyo de la Madre, la Diputación Provincial de Granada patrocinó trabajos hidrogeológicos y agronómicos en el polje de Zafarraya, cuyos resultados fueron recogidos en Ollero y García (1983, 1984a y b). También la antigua Confederación Hidrográfica del Sur realizó estudios en el sector oriental del polje (Guzmán del Pino, 1987). Por esa época (1986), IRYDA-IGME perforaron sondeos de investigación y explotación, que supusieron un avance en el conocimiento hidrogeológico de Sierra Gorda. Benavente et al. (1986) hacen referencia al acuífero de Sierra Gorda y a la importancia de sus puntos de descarga, analizando las respuestas hidrodinámicas de los manantiales de Riofrío y Guaro, a partir de datos de caudal medidos por el IGME. La relevancia de las aportaciones de este acuífero al caudal del río Genil fue resaltada por

Sánchez-Caballero et al. (1986), Castillo y López-Chicano (1988) y Castillo y Benavente (1988). Por otra parte, Garay et al. (1988) y Garay y Morell (1989) estimaron, de forma preliminar, la tasa de karstificación en el acuífero de Sierra Gorda a partir de datos hidroquímicos de algunas de las surgencias. Obartí et al. (1988) propusieron una clasificación de manantiales kársticos de España, entre los que incluyen el de Guaro.

A final de la década de 1980 se presentó el trabajo “Delimitaciones de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e islas baleares y síntesis de sus características”, realizado por el Servicio Geológico del MOPU y el ITGE (MOPU-ITGE, 1988), como respuesta a la entrada en vigor del reglamento de la “Ley de Aguas” en 1985. Este documento recoge la individualización de la Unidad Hidrogeológica (U.H.) 05.40 “Sierra Gorda-Polje de Zafarraya” (Tabla 1.1, columna B), dentro del ámbito de la DHG, y de la U.H. 06.25 “Sierra Gorda-Zafarraya”, en la DHCMA. La información procedente del PIAS (IGME, 1983a) y de trabajos posteriores fue sintetizada en el apartado correspondiente del Atlas Hidrogeológico de la provincia de Granada, publicado por la Diputación Provincial de Granada-ITGE (1990). En él se describieron los rasgos generales del acuífero de Sierra Gorda, conjuntamente con el polje de Zafarraya, y las sierras de Alhama, Gibalto y el Hacho de Loja, en el capítulo dedicado a las “Unidades Subbéticas del Sector Occidental”. Se asignaron 115 hm³/a de recursos hídricos medios a la citada unidad hidrogeológica: 112 hm³/a de componente autóctona y 3 hm³/a de alóctona. De la cifra total, 3,5 hm³/a serían las salidas que se producen mediante bombeo y 111 hm³/a las drenadas por manantiales. Al acuífero de la sierra de Gibalto se le asignó una recarga de 5 hm³/a y unas salidas medias por manantiales de 3 hm³/año y 2 hm³/año como transferencias laterales subterráneas hacia formaciones adyacentes más o menos permeables. Finalmente, 12 hm³/a corresponderían al drenaje visible del Hacho de Loja en aparente relación hídrica con el acuífero de Sierra Gorda.

Existen otros estudios puntuales o de síntesis elaborados por el IGME y centrados en aspectos locales de Sierra Gorda y alrededores, como propuestas y resultados de algún sondeo de investigación en la zona (IGME, 1983b; 1984; 1986a y b). También se han elaborado informes sobre la problemática hídrica en la comarca de Zafarraya (DGOH, 1988; IARA, 1989; Junta de Andalucía-DPG, 1995), en los que se plantearon soluciones técnicas para abastecimiento urbano y regadío. De entre todos los estudios destacan los centrados en la ladera sur de la sierra de Alhama, cuyo fin era cubrir la demanda hídrica de la zona con el manantial de Guaro y el embalse de La Viñuela. El IGME realizó estudios de regulación del manantial de Guaro consistentes en una galería de captación y una batería de sondeos al final de la misma, por encima de la cota del manantial (IGME, 1977; 1980; López Geta et al., 1981). Años más tarde fue la Confederación Hidrográfica del Sur la que volvió a plantear la posibilidad de regular el manantial mediante sondeos (CHSE, 1987). La primera captación se perforó en 1981 a cota 908 m s.n.m. y otro, en el mismo lugar, diez años después. En 1992, con el fin de abaratar los costes de explotación de las aguas subterráneas, el IARA ordenó ejecutar las obras de construcción de la galería horizontal propuesta varios años antes (IARA, 1994). Otro estudio de interés es el de Gavilán-Moreno et al. (1996), centrado en las direcciones principales de drenaje del acuífero en su borde norte.

Tabla 2.1. Diferentes denominaciones dadas a las masas de agua subterránea implicadas en el presente documento.

Demarcación Hidrográfica	A		B		C	D	E
	IGME (1983a)		MOPU-IGME (1988)		CHG-IGME (2001); CHS-IGME-GHUMA (2004)	IGME-DGA (2010); López-Chicano (2007)	Planes Hidrológicos del 2º ciclo
	Sistema Acuífero		Unidad Hidrogeológica		Unidad Hidrogeológica Redefinida [nº]	Masa de Agua Subterránea (M.A.S.) [nº]	Masa de Agua Subterránea (MASb) [código]
	nº		nº				
Guadalquivir	Mesozoico			05.40	Sierra Gorda-Polje	Sierra Gorda-	Sierra Gorda-Zafarraya
	calizo-			05.41	de Zafarraya	Zafarraya	[ES050MSBT000054000]
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	dolomítico		Sierra Gorda-		[Uh 05.40]	[051.040]	
	de la	40	Polje de				
	sierras del		Zafarraya	06.25	Sierra Gorda	Sierra Gorda-	Sierra Gorda-Zafarraya
	Torcal-			06.26	[Uh 06.25]	Zafarraya	[ES060MSBT060-025]
	Sierra					[060.025]	

La superposición de los depósitos detríticos del polje de Zafarraya sobre los carbonatos de Sierra Gorda y la relación hídrica entre ambas formaciones llevó a la redacción de un documento en el que se caracterizaron los principales aspectos hidrogeológicos y se propusieron las bases para su explotación (DGOH, 1991). En el estudio elaborado por la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas del Ministerio de Medio Ambiente (DGOHCA, 1998) se incluyó un inventario de puntos de agua, medidas de niveles piezométricos, estimación de flujos subterráneos, balance hidrogeológico y evaluación de la calidad química de las aguas subterráneas.

López-Chicano (1992), en el marco de su tesis doctoral, efectuó la caracterización del funcionamiento hidrogeológico del acuífero de Sierra Gorda (carbonático y detrítico). Para ello estudió de manera detallada los rasgos hidrológicos, estructurales, tectónicos y geomorfológicos del macizo, y examinó la variabilidad espacial y temporal de la composición química de las aguas subterráneas. También analizó la respuesta hidrodinámica de los principales manantiales (Guaro, Riofrío, Frontil, Plines, etc.). Dedujo que el acuífero presenta, en general, un comportamiento hidrogeológico más próximo al de un medio fisurado u homogéneamente karstificado, con elevada capacidad de regulación natural. También puso de manifiesto la compartimentación del acuífero en varios sectores con cierto grado de independencia en su funcionamiento hidrogeológico, definidos según criterios estructurales y piezométricos: sector occidental de Sierra Gorda, sector oriental de Sierra Gorda, sector de la sierra de Alhama, y sector Torrecilla-Los Revuelcos. Los resultados del balance hídrico al que llegó esta investigación, que no incluía Hacho de Loja, cifraba la recarga al acuífero en 138,5 hm³/a. La mayor parte de esta cuantía (120 hm³/a) correspondía al agua infiltrada en los afloramientos carbonáticos; 5 hm³/a a la procedente de aguas superficiales exteriores al sistema, especialmente a través del arroyo de la Madre; y el resto a la recarga en los depósitos que rellenan los poljes de Zafarraya, de la Dona y Pilas Dedil. Con respecto a las salidas, López-Chicano (1992) atribuyó 110 hm³/a a descargas visibles a través de los manantiales que vierten sus aguas al río Genil y afluentes, en el sector de Loja; 8 hm³/a al drenaje natural a la cuenca del río Vélez; 8 hm³/a a bombeo; y el resto hasta completar las entradas (12 hm³/a) a descargas ocultas hacia el río Genil o a transferencias subterráneas hacia el Hacho de Loja. Por lo que respecta al detrítico del

polje de Zafarraya, valoró en aproximadamente 11-12 hm³/a la recarga procedente de la infiltración de la lluvia y en 3 hm³/a, por término medio, la diferida desde el arroyo de la Madre. El resto de la escorrentía de este arroyo (2 hm³/a) recargaría directamente el acuífero carbonatado a través de los sumideros. Parte de los resultados de las investigaciones hidrogeológicas efectuadas por este autor en el macizo de Sierra Gorda y áreas adyacentes fueron presentados en varias publicaciones científicas (López-Chicano et al., 2001; 2002) y comunicaciones (López-Chicano y Pulido-Bosch, 1989; 2002, entre otras).

La U.H. Sierra Gorda fue reconocida como unidad “intercuenca” entre la DHG y la DHCMA por MOPT-ITGE en 1993 y se propusieron las correspondientes normas de explotación (DGOP-ITGE, 1993). Se le asignó el nº 00.09 y se definió de manera más precisa el ámbito administrativo de la misma. Se consideró que la superficie acuífera aflorante era de 305,5 km² (169 km² pertenecían a la DHG y 136,5 km² a la DHCMA, correspondiendo 119 km² a la cuenca endorreica del Polje de Zafarraya. Las entradas por infiltración se valoraron nuevamente en 131 hm³/a (73,75 hm³/a para la DHG y 57,25 hm³/a para la DHCMA) y los aportes externos al Polje de Zafarraya en 3 hm³/a. Las salidas se repartieron del siguiente modo: 103 hm³/a a la DHG y 17 hm³/a a la DHCMA. En 1995 se realizó una revisión de las carencias de información que presentaba la unidad, que incluyó una mejora del conocimiento hidrogeológico y una actualización de los datos (DGOH, 1995). A partir de todos los trabajos previos efectuados en la región, el IGME y la Junta de Andalucía publicaron el Atlas Hidrogeológico de Andalucía (ITGE-Junta de Andalucía, 1998), uno de cuyos apartados está dedicado al acuífero de Sierra Gorda y Polje de Zafarraya (unidades hidrogeológicas 05.40 y 06.25). Este documento cifraba los valores de recursos medios en 131 hm³/a de recarga autóctona en 315 km² de superficie permeable, más 5 hm³/a por aportes procedentes de la cuenca del arroyo de la Madre. Las salidas totales ascendían a 138 hm³/a: 127 hm³/a por manantiales y 9 hm³/a mediante bombeos.

Posteriormente, en el año 2000, se llevó a cabo una nueva evaluación de la recarga a los macizos de Sierra Gorda, sierra de Gibalto y Hacho de Loja, en el marco del “Plan de Integración de los recursos hídricos subterráneos en los sistemas de abastecimiento público de Andalucía”. Este trabajo fue encargado por la Consejería de Obras públicas y Transportes de la Junta de Andalucía al IGME, mediante convenio de colaboración (ITGE-Junta de Andalucía, 2000). En los documentos nº 26.6, 26.7 y 26.8 se presentaron, respectivamente, los resultados alcanzados en condiciones hidrometeorológicas medias para los acuíferos de la sierra de Gibalto, Sierra Gorda –incluida la sierra de Alhama y el polje de Zafarraya–, y el Hacho de Loja. La recarga evaluada para los 344,5 km² de afloramientos permeables (291,3 km² de carbonatos y 53,2 km² de materiales detríticos permeables) de lo que se ha denominado en el presente documento Conjunto hidrogeológico de Gorda-Gibalto-Hacho-Zafarraya fue de 131,6 hm³/a: 126,6 hm³/a de componente autóctona y 5 hm³/a de alóctona. Las salidas se desglosaron en: drenaje por manantiales (110,4 hm³/a), bombeos (11,7 hm³/a), y transferencias ocultas (9,6 hm³/a). Para la totalidad del acuífero de la sierra de Gibalto (11 km² de afloramientos permeables), la recarga a la que daba origen la lluvia útil se estimó en 4,5 hm³/a, mientras que las salidas se repartían entre bombeos (0,1 hm³/a), descargas ocultas no controladas (2,8 hm³/a) y descargas por manantiales (1,5 hm³/a). Finalmente, el estudio atribuyó al Hacho de Loja una superficie permeable de 11,5 km² y 2,26 hm³/a de recursos medios, mientras que las salidas a favor de manantiales se evaluaron en 11,4 hm³/a y otras descargas en 0,3 hm³/a. A partir de estos resultados se asumió que 9,4 hm³/a provenían de transferencias subterráneas del vecino acuífero de Sierra Gorda.

Con motivo de la revisión y actualización de las normas de explotación de las unidades hidrogeológicas de las cuencas del Guadalquivir y Guadalete-Barbate, efectuada por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y el IGME (CHG-IGME, 2001), se procedió a la

redefinición de la poligonal envolvente de la U.H 05.40 “Sierra Gorda – Polje de Zafarraya” (Tabla 2.1, columna C). Los nuevos límites administrativos incluían la sierra de Gibalto en su totalidad y la cuenca hidrográfica del arroyo de las Mozas o de Riofrío, además de 2/3 partes de la superficie del paraje de Los Hoyos. El balance hídrico mostrado en este documento se basó en los cálculos realizados en ITGE-Junta de Andalucía (2000), aunque se elevaron las salidas por bombeo a 12,3 hm³/a. Años más tarde, la Confederación Hidrogeográfica del Sur, con la colaboración del IGME y del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (GHUMA), efectuó una redefinición de las unidades hidrogeológicas de la DHCMA (CHS-IGME-GHUMA, 2004) en la que se modificaron las poligonales de las mismas (Tabla 1.1, columna C).

Con la entrada en vigor de la Directiva Marco Europea del Agua (DMA) en el año 2000, se procedió a la adaptación del marco legislativo español al comunitario. Se vuelven a redefinir los límites administrativos de las diferentes unidades de gestión, tanto las de la DHG como las de la antigua Confederación del Sur, aunque se consideraron las unidades hidrogeológicas redefinidas previamente. La información derivada de los trabajos anteriores fue recogida y sintetizada en una nueva y actualizada versión del Atlas Hidrogeológico de la provincia de Málaga (IGME-DPM-UMA, 2007), en la que se dedicó un capítulo a la masa de agua subterránea “Sierra Gorda–Polje de Zafarraya” (López-Chicano, 2007), referenciada como 060.025, y adscrita a la DHCMA (Tabla 1.1, columna D). No se consideró el resto del acuífero perteneciente a la DHG, incluido en la provincia de Granada. El balance hídrico para la masa de agua subterránea “mediterránea”, presentado en dicho documento, cifraba los recursos hídricos medios en 50 hm³/a (45 hm³/a por infiltración directa de agua de lluvia que cae sobre los afloramientos carbonatados y 5 hm³/a procedentes del arroyo de la Madre). De estos recursos, 12 hm³/a se drenarían por el manantial de Guaro y el resto de descarga natural de Sierra Gorda por las surgencias del sector septentrional (río Genil). El volumen medio de explotación por bombeo que se indicaba en dicho trabajo se evaluaba en 12 hm³/a.

El informe técnico más reciente realizado sobre la zona corresponde a la Actividad nº 4 de la “Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas” de la DHG, que fue realizado por el IGME a petición de la Dirección General del Agua (IGME-DGA, 2010). En la actividad mencionada se procedió a la identificación y caracterización de la interrelación que presentan las aguas superficiales y las aguas subterráneas en la MASb ES050MSBT000054000.

El conocimiento hidrogeológico del borde septentrional de Sierra Gorda experimentó un fuerte impulso con los estudios e investigaciones efectuadas por ADIF para determinar el trazado de la variante de la Línea de Alta Velocidad Antequera - Granada a la altura de Loja (INECO, 2011). Los trabajos se llevaron a cabo entre noviembre de 2009 y agosto de 2013, con el objetivo de prever las afecciones que pudiera ocasionar el medio hidrogeológico al trazado ferroviario y, de forma recíproca, los posibles impactos que su construcción y puesta en servicio pudieran generar sobre el medio hidrológico e hidrogeológico. Se efectuó una caracterización hidrogeológica detallada de la zona, no sólo desde el punto de vista espacial y de los parámetros hidráulicos, sino también en cuanto a la evolución temporal de las respuestas hidrodinámicas, ligadas a años de tipología húmeda. La síntesis de los resultados hidrogeológicos obtenidos en dicho estudio fueron presentados en sendas comunicaciones científicas (Álvarez-Díez et al., 2013; De Ávila et al., 2013).

González-Ramón et al. (2012; 2017) han presentado avances en la caracterización hidroquímica e isotópica de los manantiales de Sierra Gorda, a partir del análisis de los isótopos estables del sulfato disuelto en el agua subterránea ($\delta^{34}\text{S}$ y $\delta^{18}\text{O}$). Los autores dedujeron la compartimentación del acuífero en varios sectores con cierto grado de independencia y características geométricas

diferentes, dos de ellos (sector occidental y sector oriental) serían los más relevantes en el funcionamiento hidrogeológico general del acuífero.

En la tabla 2.2 se muestra una síntesis de los balances hídricos más significativos realizados por algunos de los principales organismos e investigadores que han trabajado en la zona. De acuerdo a las consideraciones que se realizan en ITGE-Junta de Andalucía (1998), las diferentes valoraciones que se presentan en los múltiples balances hídricos que se han realizado, se deben al empleo de distintos métodos de estimación de la lluvia útil; a cuantificaciones no coincidentes de la superficie sobre la que tiene lugar la recarga; a la falta de un control continuo de las descargas; a la no valoración o inclusión en la determinación de los balances hídricos de surgencias con un importante caudal de surgencia; o al empleo y utilización de series pluviométricas y termométricas de diferente amplitud y duración.

Tabla 2.2. Balances hidrogeológicos más significativos en régimen natural e influenciado realizados en la zona de estudio entre 1974 y 2001

Fuente	Área Km ²	Entradas (hm ³ /año)			Salidas (hm ³ /año)				Observaciones
		Autóctona	Alóctona	Total	Manantiales	Extracciones	Otras	DHG	
Delgado Moya et al. (1974)		108-111			106		2		
IGME (1974a)		108	5	113	113				
IGME (1983a)	288	104	7	111	110	1		102	8
Rubio y del Valle (1987)		100	3	103	100	3			
DP. Granada-IGME (1990)	309	112	5	115	111	3,5		99,9	14,6
López Chicano (1992)	325	133,5	5	138,5	118	8	12	122	16
ITGE-J. Andalucía (1998)	315	131	5	136	127	9			
ITGE-J. Andalucía (2000)	345	126,6	5	131,6	110,4	11,7	9,6		No incluye el Hacho de Loja
CHG-IGME (2001)	356	130	5	135	111,5	12,3	11,2		Incluye la sierra de Gíbalto

3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

3.1. Contexto geológico. Formaciones hidrogeológicas

Los materiales que conforman las sierras Gorda y de Alhama se asocian al dominio Subbético, dentro de la Zona Externa de la Cordillera Bética, aunque muy próximos al contacto tectónico con la Zona Interna (Dorsal Bética y complejos Maláguide y Alpujárride), y con implicaciones del Flysch del Campo de Gibraltar. Se distinguen dos unidades tectónicas y estratigráficas principales (Martín-Algarra, 1987): Unidad de Sierra Gorda y Unidad de Zafarraya. La primera aflora en los sectores septentrional, central, y oriental de Sierra Gorda, mientras que la segunda lo hace al S y SO del macizo, según una banda arqueada en planta que se prolonga desde La Alcaicería (en el extremo SE) hasta el puerto de Los Alazores (al O), con la concavidad hacia el NE. Ambas unidades se caracterizan por presentar una potente serie de materiales dolomíticos y calizos del Jurásico Inferior (Triásico Superior- Jurásico Inferior en el caso de la Unidad de Zafarraya), que descansan sobre materiales arcilloso-evaporíticos del Triásico. Encima de los materiales carbonáticos anteriores hay calizas con sílex y calizas nodulosas de edad Jurásico Medio y Superior, con un espesor muy reducido respecto a los infrayacentes. Se estima que el espesor máximo de la secuencia carbonática supera los 1.300 metros en los sectores oriental y meridional de Sierra Gorda y disminuye hacia el O y hacia el N (Pistre et al., 1999). La serie termina con una formación de margas y margocalizas del Cretácico-Terciario, cuyo espesor es sensiblemente mayor en la Unidad de Sierra Gorda.

La base impermeable del acuífero de Sierra Gorda debe estar constituida por materiales detrítico-evaporíticos del Triásico Superior. En el borde NO de Sierra Gorda, pero dentro del ámbito de la MASbES050MSBT000054000, afloran este tipo de rocas bajo la denominación de “Trías de Antequera”, como parte de los Complejos Caóticos Subbéticos (CCS) de la Zona Externa de la Cordillera Bética (Vera y Martín-Algarra, 2004). Dicha unidad geológica, de estructura interna desorganizada, está constituida por una gran variedad de rocas, pero con un amplio predominio de litologías arcilloso-evaporíticas de edad triásica. Esto le confiere un claro carácter acuitado al conjunto, por lo que constituye barreras hidrogeológicas que condicionan el movimiento del agua subterránea en este sector del acuífero.

Por su parte, el borde nororiental de Sierra Gorda está ocupado por un conjunto de materiales margosos y margocalizos que constituyen los términos superiores de la serie del Subbético en ese sector. Discordantes sobre ellos, pero también sobre las calizas jurásicas acuíferas y sobre los materiales del Complejo Alpujárride de Sierra Tejeda aparecen diversas formaciones postorogénicas (calcarenitas, lutitas, margas, etc.) que conforman el relleno sedimentario terciario de la depresión de Granada (Figura 3.1).

Desde La Sierrecilla de Salinas, en la esquina NO de la MACH Sierra Gorda-Zafarraya, hasta las inmediaciones de Sierra Tejeda, en el borde sur de la MACH, pasando por el puerto de Los Alazores y la localidad de Alfarnate, afloran materiales de edad Cretácico-Terciario pertenecientes al complejo del Flysch del Campo de Gibraltar (Figura 3.1). Se trata de arcillas en cuyo interior existen afloramientos rocosos de diferente tamaño y naturaleza, pero con predominio de areniscas. En general, estas formaciones recubren mediante contacto tectónico a las unidades subbéticas, aunque localmente pueden aparecer pinzadas entre unidades geológicas más antiguas, o incluso ser cabalgadas. En el sector de La Alcaicería, en el extremo SE de la MACH Sierra Gorda-Zafarraya, el Flysch aparece en una estrecha banda de dirección SO-NE que refleja el contacto tectónico de las zonas Externa e Interna de la Cordillera Bética. Desde esa zona hacia el E, SE y S, hacia Sierra Tejeda, aparecen filitas, esquistos y mármoles de diferentes unidades de los complejos Maláguide

y, sobre todo, Alpujárride de la Zona Interna (Martín-Algarra, 1987). La cabecera de la cuenca hidrográfica del arroyo de la Madre, en su totalidad dentro de la DHCMA, discurre sobre estas unidades geológicas (Figura 3.1).

En el polje de Zafarraya hay sedimentos neógeno-cuaternarios (postorogénicos), cuya serie estratigráfica está formada en la base por conglomerados cementados y calcarenitas bioclásticas, con una potencia que puede alcanzar varias decenas metros. Encima hay una sucesión, de hasta 150 m de espesor, de lutitas ocre y margas azuladas con algunos niveles de calcarenitas bioclásticas intercalados (López-Chicano, 1992). El relleno se completa con materiales aluviales arenosos y conglomeráticos sueltos, más o menos continuos y de escasa potencia, que se intercalan entre formaciones arcillosas de origen variado. Las arenas y conglomerados constituyen los niveles productivos de un acuífero poroso. En el sector oriental del polje de Zafarraya, las formaciones detríticas terciarias se superponen directamente sobre los materiales carbonáticos jurásicos. En los sectores central y occidental, entre los materiales con características acuíferas se intercalan otras formaciones de baja permeabilidad de edades Cretácico a Mioceno, que pueden alcanzar espesores máximos del orden de 200 m. Por su parte, el relleno cuaternario se coloca encima de los materiales miocenos en el sector central del polje, mientras que en los extremos occidental y oriental descansa directamente sobre los materiales carbonáticos del acuífero de Sierra Gorda. No obstante, en los bordes del polje, los materiales detríticos contactan con los carbonatos y puede existir conexión hídrica entre ambos.

Los materiales detríticos coluviales y aluviales, que se encuentran en su mayor parte ligados a los cauces fluviales, representan otra de las formaciones permeables de la zona. Destacan por su extensión los depósitos de edad Pliocuatnario que ocupan buena parte de la cuenca hidrográfica del arroyo de Riofrío (Figura 3.1), dispuestos de manera discordante sobre los materiales infrayacentes. También son dignas de mencionar las terrazas aluviales formadas a distintas alturas que dan lugar a un relieve escalonado y simétrico en ambas márgenes del río Genil a su paso por Loja, donde es posible reconocer igualmente depósitos travertínicos de hasta 30 m de espesor relacionados con las aguas drenadas por los manantiales del borde septentrional de Sierra Gorda. Son especialmente llamativas en los parajes “Infiernos Altos” e “Infiernos Bajos”, situados aguas arriba y aguas abajo de Loja. Completan la secuencia de los materiales cuaternarios las arcillas de descalcificación visibles en las depresiones kársticas de Llanos de la Dona y Pilas Dedil, donde alcanzan 9,2 km² de superficie (Figura 3.1).

De forma esquemática el conjunto hidrogeológico objeto de este informe está constituido por:

- Un sustrato arcilloso-evaporítico, de baja permeabilidad y edad Triásico Superior, con un funcionamiento general de acuitardo. Aunque el afloramiento localizado en el borde NO (Fuente Camacho) constituye un acuífero debido a la permeabilidad por disolución y karstificación de las masas evaporíticas (López-Chicano, 1992).
- Una formación acuífera principal de naturaleza carbonática (dolomías y calizas), en esencia de edad Jurásico, fisurada y karstificada, con espesores comprendidos entre 500 y 1.300 m,
- Materiales margosos y margocalizos, de baja permeabilidad y de edad Cretácico-Terciario, a techo y en los bordes de los afloramientos de la formación acuífera principal,
- Arcillas y areniscas (Flysch), de baja permeabilidad, dispuestas tectónicamente (cabalgando e imbricadas) sobre las anteriores formaciones,
- Rocas metamórficas paleozoicas de baja permeabilidad (filitas, esquistos y pizarras) de los complejos Maláguide y, sobre todo, Alpujárride, existentes en el extremo SE,

- Una formación con comportamiento acuífero asociada a los mármoles triásicos del Complejo Alpujárride que afloran en la cabecera del arroyo de la Madre,
- Materiales postorogénicos con diferente grado de permeabilidad por porosidad primaria (lutitas, calcarenitas y conglomerados) del Mioceno superior cuya importancia hidrogeológica depende de su espesor y de su disposición geométrica con respecto a las formaciones acuíferas principales y
- Depósitos cuaternarios de diversa naturaleza y disposición geomorfológica, que pueden constituir acuíferos con distinto interés hidrogeológico, según su eventual relación hidrogeológica con las formaciones permeables jurásicas y terciarias.

3.2. Estructura geológica. Tectónica. Incidencia hidrogeológica

Sierra Gorda y áreas adyacentes presentan una estructura geológica compleja de la que forman parte varias unidades tectónicas pertenecientes al Subbético Interno (unidades de Sierra Gorda, Zafarraya, Sierra de Enmedio y Hacho de Loja) y Medio (Alta Cadena y sierra de Gibalto); al “Trías de Antequera”, al Flysch del Campo de Gibraltar y, además, a los complejos Maláguide y Alpujárride (Figuras 3.1 y 3.2). La colisión oblicua de la Zona Interna con la Zona Externa durante la traslación de la primera hacia el O produjo arrastres importantes en el Subbético, además de formar fallas de desgarre dextrorsas al N y al S del ámbito de estudio (Martín-Algarra, 1987). El resultado de la transpresión fue la rotación, arqueamiento y apilamiento de diversas unidades tectónicas, unas sobre otras, con vergencia general S-SO. La Unidad de Sierra Gorda ocupó una posición tectónica elevada con respecto a la de Zafarraya y esta, a su vez, cabalgó sobre el Flysch del Campo de Gibraltar, que quedó imbricado entre la segunda y las unidades que forman los relieves de la sierra de Enmedio, Alta Cadena y sierra de Gibalto.

En detalle, la unidad de Sierra Gorda presenta una estructura en domo anticlinal alargado en dirección N-S, producto de la interferencia de dos sistemas distintos de pliegues (N150E y N30-50E), y roto por fallas inversas con la misma dirección y vergentes hacia el O (Lupiani y Soria, 1988; Pistre et al., 1999; Crespo-Blanc, 2007). Los cabalgamientos, unidos a los buzamientos generales hacia el E del flanco oriental del domo, provocan que las dolomías basales afloren en el sector central y septentrional de Sierra Gorda y, al mismo tiempo, que las formaciones acuíferas jurásicas se hundan bajo las margas cretácico-terciarias en esa dirección (Figuras 3.1 y corte 1–1' en Figura 3.2). Por su parte, la estructura geológica de la Unidad de Zafarraya responde a un anticlinorio vergente hacia el SO, con su flanco sur invertido y afectado por una falla inversa de gran ángulo, que recorre el borde occidental y meridional del área de estudio, desde la sierra de Gibalto hasta el límite con Sierra Tejeda. Esta falla inversa involucra a las formaciones permeables jurásicas y a las arcillas y areniscas del Flysch, localmente a margas y margocalizas cretácicas (Figuras 3.1 y corte 2–2' en Figura 3.2), que actúan como materiales de baja permeabilidad e impiden la conexión hidrogeológica con los vecinos acuíferos de la sierra de Enmedio y la Alta Cadena. También con la sierra de Gibalto, aunque la prolongación cartográfica de los carbonatos del extremo NE de esta última y los de Sierra Gorda podría indicar continuidad hidrogeológica entre ambos macizos, especialmente en condiciones de aguas altas. El anticlinorio que define la estructura geológica de la Unidad de Zafarraya también está afectado por una falla normal con componente en dirección, situada en el borde S del polje de Zafarraya.

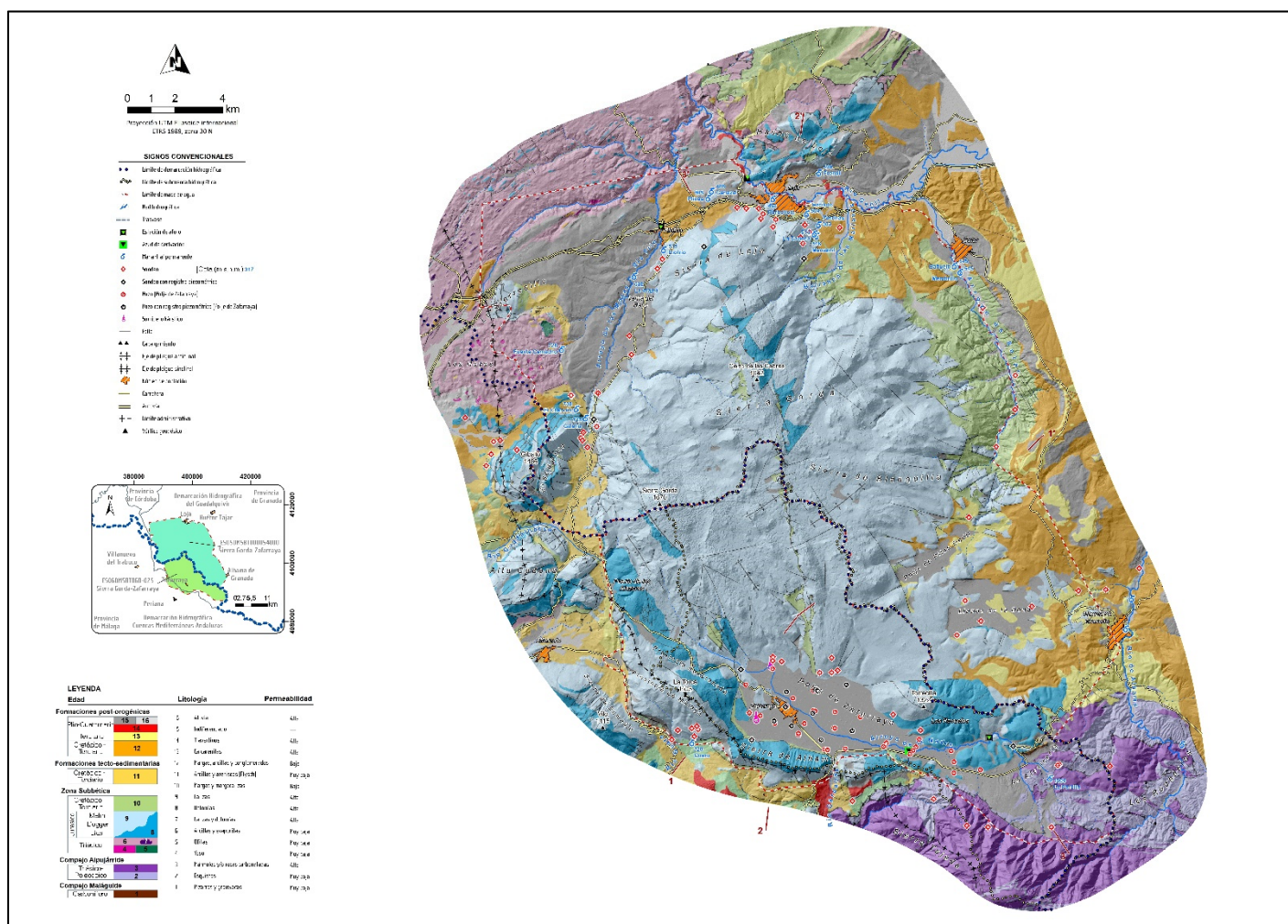
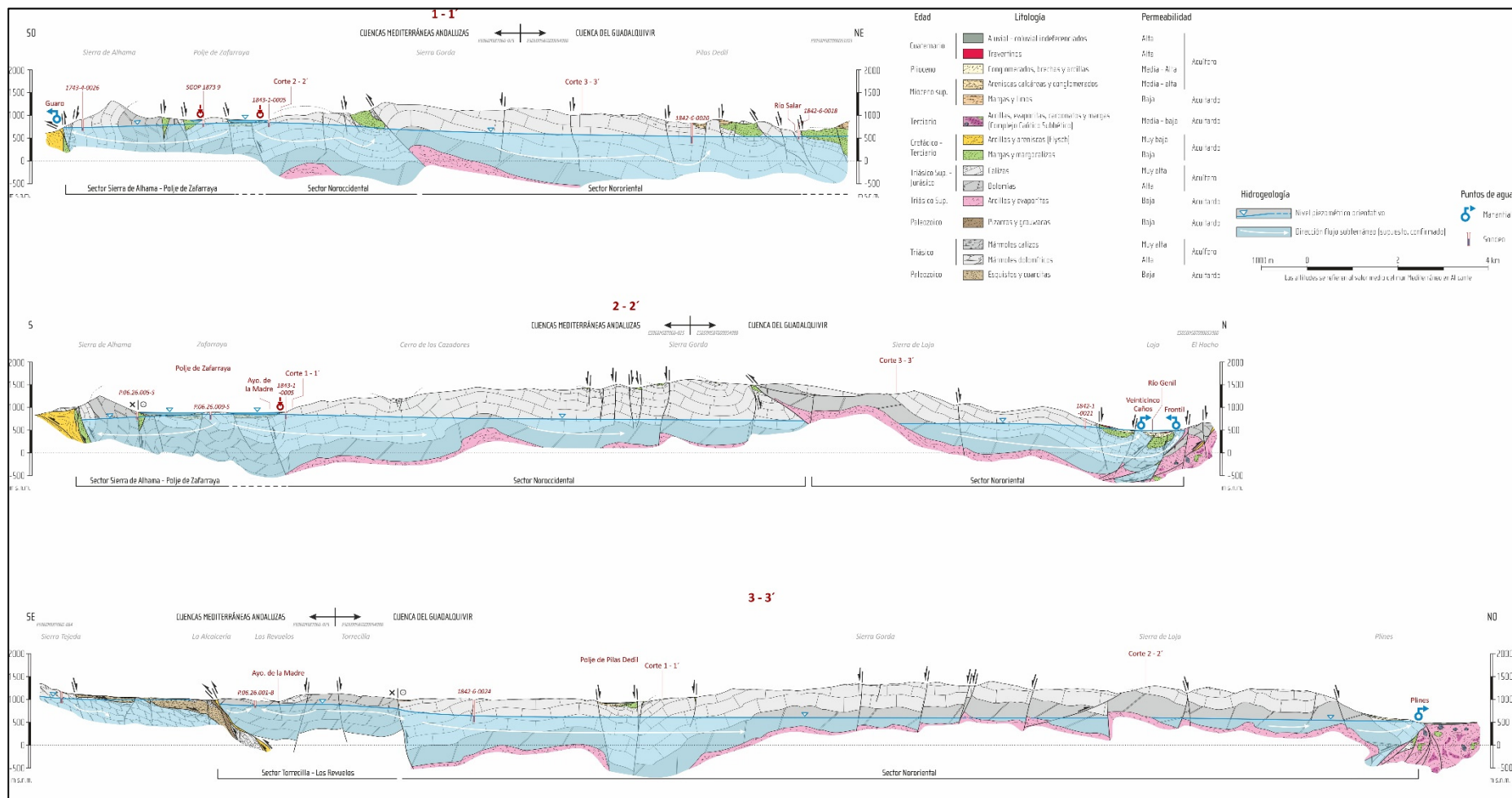


Figura 3.1. Mapa hidrogeológico del área de estudio.



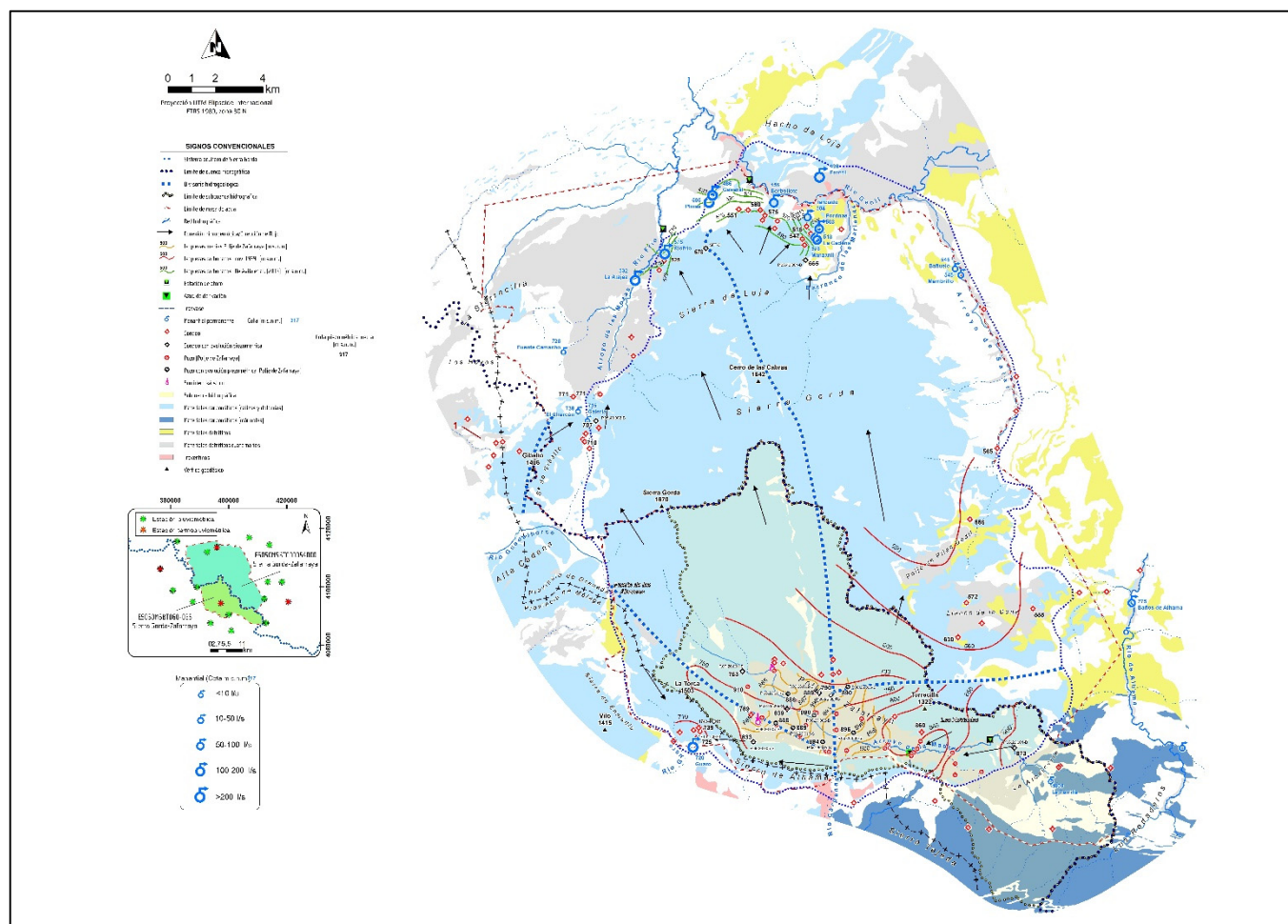


Figura 3.3. Esquema hidrogeológico de la masa de agua subterránea con continuidad hidrogeológica (MASCH) de Sierra Gorda-Zafarraya. Líneas isopiezas tomadas de IGME (1993-a), López Chicano (1992) y De Ávila et al. (2013).

3.3. Geomorfología. Formas de infiltración preferencial

La coexistencia de litologías solubles, como es el caso de los carbonatos, con importantes espesores, la estructura en domo anticlinal abovedado -con una disposición subhorizontal de los estratos en la zona somital de Sierra Gorda-, la intensa fracturación, y la precipitación del área (800 mm/año de valor medio, López-Chicano, 1992), han dado lugar a un gran desarrollo del modelado kárstico. En las sierras Gorda y de Alhama es posible observar formas exokársticas de todos los tipos y tamaños, desde sumideros a poljes, pasando por campos de lapiaz y dolinas, en un contexto montañoso desprovisto de vegetación y suelos, donde alternan áreas aplanadas y relieves relativamente cónicos residuales. El proceso de dolinización ocupa un papel destacado en la geomorfología de estas sierras hasta el punto de que las dolinas constituyen las manifestaciones kársticas más características y mejor desarrolladas (Pezzi, 1977; López-Chicano, 1995).

En Sierra Gorda existen al menos 7 depresiones que pueden ser consideradas como poljes, si bien presentan diferencias entre sí. El polje de mayor entidad es el de Zafarraya, situado en el extremo meridional y con un origen ligado a la tectónica. Es una de las depresiones kársticas funcionales más importantes de la Península Ibérica, con una extensión de 25 km², una altitud media de 900 m s.n.m., una longitud máxima de 10 km de O a E y una anchura de 3,5 km de N a S, con el fondo plano ligeramente inclinado hacia el O y con una pendiente media de 0,4 % (Durán, 1996; Lhénaff, 1999; López-Chicano et al., 2002). En la parte occidental de la depresión hay colinas calizas residuales, rodeadas de depósitos detríticos, en una de las cuales se asienta el pueblo de Zafarraya. El polje es la zona más deprimida y llana de una cuenca endorreica de 151 km² de superficie por la que discurre el arroyo de la Madre, que a lo largo de sus 15 km de longitud, moviliza -de E a O- la mayor parte de la escorrentía superficial de la cuenca. Aproximadamente 98 km² (65 %) del área total de la cuenca endorreica se desarrolla sobre carbonatos jurásicos pertenecientes al acuífero de Sierra Gorda, 28 km² (18 %) son depósitos aluviales en conexión hidráulica con el acuífero kárstico infrayacente, y los 25 km² restantes (17 %) corresponden a materiales metapelíticos y carbonáticos de Sierra Tejeda y Los Rodaderos (Figura 3.1), que forman un acuífero independiente de la DHG (Tejeda-Almijara-Las Guájaras, ES050MSBT000054200). No obstante, hacia el arroyo de la Madre vierten sus aguas pequeños manantiales que drenan el acuífero de Sierra Tejeda septentrional. De entre todos ellos, destaca el manantial de La Parrilla, situado a 1.010 m s.n.m., en la zona de La Alcaicería (Figura 3.1). Se trata de una surgencia permanente que experimenta crecidas significativas durante periodos húmedos.

Al NE del polje de Zafarraya, cerca de Alhama de Granada, existen otras dos depresiones de menor entidad conocidas como Llanos de la Dona y polje de Pilas Dedil (Figura 3.1). Son depresiones abiertas con drenaje exorreico limitado (López-Chicano, 1995) y cuyo fondo está cubierto por sedimentos detríticos cuaternarios, apoyados sobre materiales acuíferos jurásicos, pero también sobre formaciones del relleno de la depresión de Granada con permeabilidades diversas.

Junto a los poljes de Zafarraya y Llanos de la Dona y Pilas-Dedil se pueden identificar otros cuatro poljes (Majada de Quejigo, Los Pajonales, Llano de los Morrillos y Llanos del Puerto). A los tres primeros López Chicano (1995) los designó con la terminología de periféricos, mientras que a los cuatro segundos los agrupa bajo la denominación de internos. Según Hidalgo (1974-a) se trata de paleopoljes que se encuentran colgados a cientos de metros sobre el nivel freático.

El encajamiento de la red fluvial principal que se observa en la periferia del macizo de Sierra Gorda-Sierra Alhama ha originado valles estrechos con laderas empinadas, lo que favorece, a su vez, el desarrollo frecuente de movimientos gravitacionales. Según las litologías, los movimientos se resuelven en forma de deslizamientos rotacionales, flujos de tierra o desprendimientos rocosos, cuya recurrencia es mayor en el borde meridional del acuífero (cara sur de la sierra de Alhama). Los

fondos de valle presentan acumulaciones aluviales sin un sistema de terrazas bien conservado debido a la misma inestabilidad de las laderas. En la mayoría de los casos, queda preservada la terraza baja y/o el lecho de inundación actual. El sistema de terrazas de mayor entidad es el asociado al río Genil, donde se han distinguido hasta cinco niveles escalonados en el entorno de Loja, si bien son difíciles de apreciar debido a acciones antrópicas (Lupiani y Soria, 1988). Sobre las terrazas afloran depósitos de travertinos asociadas a la descarga de los manantiales.

Fuera de los macizos de Sierra Gorda y sierra de Alhama, en el borde NO, se encuentra el paraje de Los Hoyos (Figura 3.1). Se trata de una estructura diapírica asociada a los materiales del “Trías de Antequera” sobre la que se ha desarrollado un singular paisaje kárstico, caracterizado por abundantes dolinas (de diferentes tipologías), pequeñas zonas endorreicas y humedales. En la parte central del diapiro, donde los procesos de elevación del terreno han sido más activos, aparecen pequeñas dolinas con paredes verticalizadas, generadas por colapsos. Hacia los bordes de la estructura diapírica, las dolinas son de mayor tamaño, presentan un fondo plano y han sido originadas por el hundimiento del terreno. En algunos casos, el nivel piezométrico local alcanza el fondo de las cubetas y, en consecuencia, éstas se inundan.

3.4. Límites y geometría de los diferentes acuíferos

La MASCH de Sierra Gorda-Zafarraya ocupa una superficie permeable próxima a 325 km² que se extiende por el macizo montañoso homónimo, el polje de Zafarraya y la sierra de Alhama (Figura 3.3). Los materiales que lo conforman son dolomías y calizas jurásicas, permeables por fisuración y karstificación, que constituyen una potente formación acuífera de más de 1.000 m de espesor, en cuya base debe haber arcillas con evaporitas de edad Triásico. Sobre los carbonatos se apoyan las formaciones neógenas y cuaternarias, con distinto grado de permeabilidad, que recubren el fondo de los poljes y que alcanzan una superficie conjunta próxima a 40 km². Los sedimentos cuaternarios constituyen acuíferos detríticos de hasta 60 m de espesor, como en el sector central del polje de Zafarraya, colgados respecto al acuífero carbonático principal, aunque hidráulicamente conectados con él en los bordes de las depresiones y en el sector oriental del polje de Zafarraya (cortes 1-1' y 2-2' en Figura 3.2). Al S, SO y O, la MASCH está limitada por el contacto mecánico (fallas inversas muy verticalizadas) de los carbonatos de la Zona Externa con el Flysch del Campo de Gibraltar y, localmente, con margas y margocalizas cretácicas (Figura 3.1, cortes 1-1' y 2-2' en Figura 3.2). El límite SE (zona de La Alcaicería) es similar al anterior. En este caso, los materiales impermeables del Flysch y del Complejo Maláguide actúan de barrera impermeable que asegura la desconexión hidrogeológica del acuífero de Sierra Gorda con los mármoles de Sierra Tejeda-Los Rodaderos (corte 3-3' en Figura 3.2). Entre esta zona y las proximidades de Alhama de Granada, el acuífero se encuentra recubierto por materiales postorogénicos de la depresión de Granada que no permiten observar la disposición geométrica de las unidades de Zafarraya y Sierra Gorda con respecto a la Unidad de los Baños de Alhama (Martín-Algarra, 1987; López-Chicano, 1992). Los afloramientos permeables del borde oriental están limitados por el contacto estratigráfico concordante entre las calizas jurásicas y los materiales margosos y margocalizos cretácico-terciarios, aunque también están cubiertos por sedimentos detríticos miocenos de la depresión de Granada. Desde el río Genil, donde se encuentran la mayoría de los manantiales que permiten la descarga natural del acuífero, hasta la sierra de Gíbalto, los carbonatos jurásicos del borde NO del acuífero están cubiertos de manera discordante por sedimentos pliocuaternarios (de diversa naturaleza y grado de permeabilidad, aunque con un predominio de conglomerados y brechas calcáreas. Presumiblemente, en profundidad, los materiales del Flysch y/o los del “Trías de Antequera” actúen de barrera impermeable en esta zona (López-Chicano y Pulido-Bosch, 2002).

La geometría del contacto mecánico entre la Unidad de Zafarraya y la de Sierra Gorda, la estructura el domo antiformal de esta última, y las fallas inversas con dirección NNO-SSE y vergentes hacia el O condicionan, junto con la intensa fracturación, el comportamiento hidrodinámico general del acuífero y su posible sectorización en varios compartimentos (López-Chicano, 1992). Se conoce por resultados de ensayos con trazadores artificiales la conexión hidrogeológica de los sumideros del polje de Zafarraya con el manantial de Guaro, mientras que la relación de estos con las surgencias del borde septentrional de Sierra Gorda no está tan clara (Hidalgo, 1974; IGME, 1983a). No obstante, estas pruebas con colorantes evidenciaron la conexión hidráulica entre los materiales carbonáticos de las dos principales unidades geológicas, al menos en el sector occidental del polje. En cambio, en el oriental, parece que existe algún tipo de condicionante geológico / hidrogeológico que dificulta el flujo subterráneo entre ambas unidades (López-Chicano, 1989; Guzmán del Pino et al., 1991). López-Chicano (1992) atribuyó este hecho a un cambio brusco en la profundidad del sustrato impermeable a ambos lados del contacto mecánico (vertical y con dirección E-O en este sector) que separa los dos bloques carbonáticos (corte 3-3' en Figura 3.2.1). En el centro del macizo, como consecuencia directa de la estructura en domo antiformal de Sierra Gorda y las fallas inversas asociadas, la cota del sustrato triásico de baja permeabilidad debe crear un umbral hidrogeológico alargado en la dirección N-S, que recorra buena parte del acuífero, con capacidad para influir en la dirección preferente de los flujos subterráneos que se dirigen hacia el río Genil (Figura 3.3) e incluso para individualizar sectores en situaciones de aguas bajas.

Los rasgos estructurales mencionados, junto con las cotas de la superficie piezométrica, además de la posición de los manantiales, han permitido diferenciar cuatro compartimentos hidrogeológicos con cierto grado de independencia entre sí (López-Chicano, 1992; López-Chicano y Pulido-Bosch, 2002): sector nororiental, sector noroccidental, sector sierra de Alhama-polje de Zafarraya y sector Torrecilla-Los Revuelos. El mapa de la figura 4.3 muestra la situación orientativa de las divisorias de los posibles compartimentos hidrogeológicos existentes en la MASCH de Sierra Gorda-Zafarraya. Estas divisorias son, en cualquier caso, aproximadas pues cambiarán de posición y de forma según las condiciones hidrometeorológicas y de explotación de los acuíferos.

Además de la MASCH Sierra Gorda-Zafarraya, en el área de estudio se van a diferenciar dos MASCH intercuenas con un comportamiento claramente diferenciado de la anterior.

Una de ellos sería la MASCH Sierra de Gibalto dividida entre dos ámbitos de planificación hidrológica, puesto que la mitad occidental conforma, junto con los depósitos cuaternarios aluviales aledaños, la MASb de la DHCMA Sierra de Gibalto y Arroyo Marín (ES060MSBT060-028) y la mitad oriental estaría incluida en la MASb Sierra Gorda-Zafarraya de la DHG (ES050MSBT000054000)

La otra es la MASCH Fuente Camacho también dividida entre los dos ámbitos de planificación hidrológica de la DHG y DHCMA.

3.5. Hidrometría y piezometría

La descarga natural de la principal MASCH Sierra Gorda-Zafarraya, se produce en su mayor parte por su borde N, condicionado por el nivel de base que representa el río Genil, zona donde se encuentra la mayoría de los manantiales. Estos se hallan situados entre las cotas 470 y 545 m s.n.m. mientras que el manantial de Guaro, ubicado en el extremo sur, surge a 720 m s.n.m.

La descarga de la MASCH Sierra Gibalto se produce por dos manantiales de La Lana, situado en la DHCMA, y El Charcón, en la DHG.

La principal salida de la MASCH Fuente Camacho se produce por el manantial de Salinas de Fuente Camacho.

La tabla 3.1 muestra las características básicas de los principales manantiales, cuya ubicación puede observarse en la figura 3.4. De los principales manantiales, 13 descargan agua subterránea procedente de la MASCH Sierra Gorda-Zafarraya, de los que 12 se localizan en la DHG y uno en la DHCMA. De los dos de la MASCH Sierra Gibalto uno descarga hacia la DHG y otro a la DHCMA. Las descargas de la MASCH Fuente Camacho se produce exclusivamente hacia la DHG.

Tabla 3.1. Principales manantiales identificados en el presente estudio en las MASCH.

MASCH	DH	Denominación	Ref. Informe	Cota m s.n.m.	Periodo Control	Caudal (l/s)			Coordenadas UTM	
						Máx	Mín	Medio	X	Y
Sierra Gorda-Zafarraya	DHG	El Frontil	GE.1	520	74/75 - 19/20	631,4	166,2	356,0	399459	4115143
	DHG	Plines	GE.2	505	74/75 - 19/20	770,5	111,6	369,4	395100	4114369
	DHG	Genazal	GE.3	486	75/76 - 19/20	96,0	741,8	342,2	395308	4114602
	DHG	La Cadena	GE.4	513	74/75 - 94/95	383,2	42,1	233,0	399278	4112592
	DHG	Manzanil	GE.5	516	74/75 - 19/20	383,0	9,3	144,0	399343	4112241
	DHG	Porrinas	GE.6	501	74/75 - 00/01	179,6	9,1	95,7	399439	4112963
	DHG	Borbollote	GE.7	455	74/75 - 19/20	431,0	0,0	124,4	397520	4114071
	DHG	El Terciado	GE.8	500	74/75 - 95/96	144,4	0,2	66,8	398940	4113430
	DHG	Ríofrío	RF.1	510	74/75 - 19/20	2248,0	326,9	969,4	392940	4111915
	DHG	La Atajea	RF.2	550	74/75 - 94/95	1449,0	21,7	261,1	391680	4110794
	DHCMA	Guaro	GU.1	723	74/75 - 83/84	2468,0	0,0	228,0	394131	4091177
	DHG	Membrillo	SA.1	545	82/83 - 00/01	91,3	6,3	41,8	405153	4111248
	DHG	Bañuelo	SA.2	545	82/83 - 19/20	173,8	4,4	38,4	405017	4111353
Sierra Gibalto	DHCMA	Lana	GI.1	790	75/76 - 19/20	111,8	0,0	26,9	385536	4103558
	DHG	Charcón	GI.2	738	78/79 - 00/01	216,3	0,0	15,8	389376	4105168
Fuente Camacho	DHG	Salinas de F. Camacho	FC.1	705	Visual			1 a 10	388778	4107969

En este trabajo se han recogido los principales manantiales de las MASCH estudiadas, no obstante, en la Base de Datos del IGME se han inventariado un total de 48 manantiales y 5 galerías pertenecientes a la MASb de Sierra Gorda-Zafarraya adscrita a la DHG. Algunos de ellos drenan materiales pliocuaternarios de las cuencas del arroyo de las Mozas y río Frío y el Mioceno conglomerático del borde oriental de la MASCH de Sierra Gorda-Zafarraya. Aunque localmente los manantiales no contemplados en la selección realizada en este informe pueden tener cierto interés, su descarga resulta muy poco significativa frente al volumen de caudales de los seleccionados y de la recarga conjunta de las MASCH. En la figura 3.5 se recoge la localización de los manantiales de la tabla 3.1 sobre un esquema del área estudiada.

22

Camacho. Como se verá más adelante, estas descargas corresponderán casi a más del 70 % de la recarga contabilizada en las MASCH analizadas.

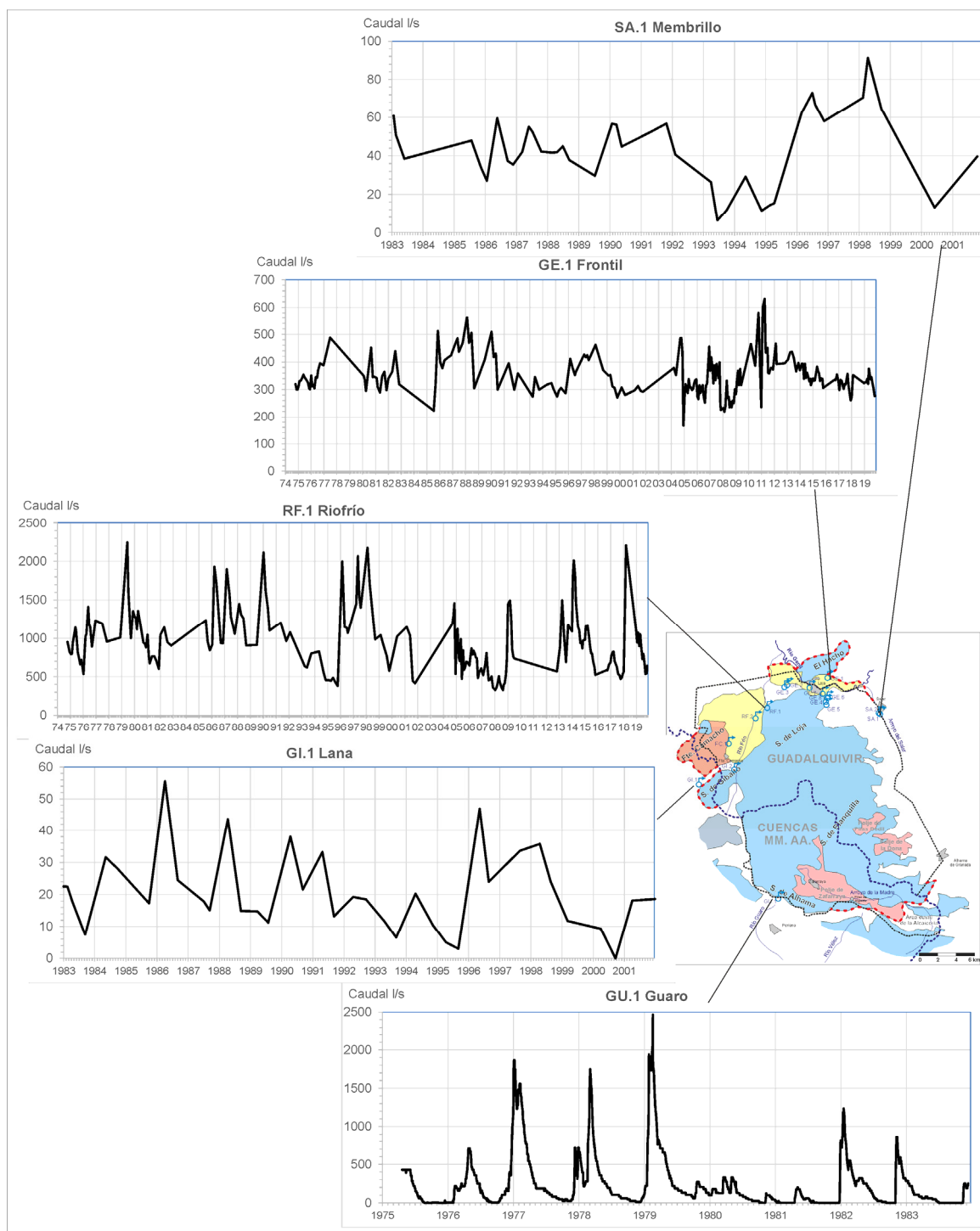


Figura 3.6. Hidrogramas de algunos manantiales representativos.

En la tesis doctoral de López-Chicano (1992) se recogía un total de 87 sondeos relacionados con el acuífero carbonático de Sierra Gorda. También se menciona la existencia de 400 pozos excavados en el acuífero detrítico que rellena el polje de Zafarraya. Este inventario fue realizado hace casi tres décadas, por lo que el número actual de puntos es diferente, como recoge la base de datos del IGME (<http://info.igme.es/BDAguas/>). En la misma se hace referencia a 405 pozos, 141 sondeos y 13 pozos con galerías para la masa de agua subterránea de Sierra Gorda-Zafarraya

adscrita la DHCMA y a 24 pozos, 42 sondeos y 7 pozos con galerías para la masa homónima gestionada desde la DHG. El total de puntos acuíferos inventariados en la masa de agua subterránea con continuidad hidrogeológica (MASCH) de Sierra Gorda-Zafarraya, excluyendo manantiales y tomas de agua superficial, asciende a 632, que se distribuyen de acuerdo a 429 pozos, 183 sondeos y 20 pozos con galerías. La mayoría de los sondeos inventariados se concentran en los bordes del acuífero de Sierra Gorda y en el polje de Zafarraya, por lo que existe una amplia extensión (la parte central y más alta del macizo) donde se tiene muy poca información sobre la profundidad a la que se encuentra la zona saturada.

Aunque el inventario existente es muy extenso, para los objetivos perseguidos en el estudio, en este documento sólo se van recoger aquellos sondeos de los que se dispone de datos de control piezométrico. En la tabla 3.2 se recogen un listado de los puntos con control piezométrico utilizados en este informe. Su localización se muestra en la figura 3.6 junto con los principales manantiales. En la figura 3.7 se recoge la evolución piezométrica de algunos puntos representativos del área.

Tabla 3.2. Principales puntos con control piezométrico

Denominación	Código IGME	Nº Informe	Profundidad m	Cota media Piezométrica m s.n.m.	Cota	Coordenadas UTM		Localización
						X	Y	
05.40.002-B		1	250	707	793	389997	4104791	Gibalto
05.40.001-B	1842-1-0013	2	300	556	650	398825	4111542	Norte S. Gorda
SFT-3	1842-1-0029	3		589	599	392664	4111125	Riofrío
06.26.001-B		4	150	878	981	407613	4091044	P. Zafarraya oriental
06.26.002-B		5	13	890	894	399188	4092419	P. Zafarraya
P.06.26.001-S (S-39)		6		752	911	396172	4094265	P. Zafarraya occidental
P.06.26.002-S (P-33-a)		7		885	889	399309	4093418	P. Zafarraya
P.06.26.003-S (P-31)		8		909	910	396392	4093621	P. Zafarraya occidental
P.06.26.004-S (P-33-b)		9		790	893	399404	4093357	P. Zafarraya
P.06.26.005-S (S-40)		10		831	939	396628	4091300	Sierra Alhama
P.06.26.006-S (P-545)		11		890	896	400608	4093613	P. Zafarraya
P.06.26.007-S (P-586)		12		888	891	397577	4092090	P. Zafarraya
P.06.26.008-S (P-535)		13		896	903	400850	4091682	P. Zafarraya
P.06.26.009-S (S-41)		14		840	914	398046	4092687	P. Zafarraya
P.06.26.011-S (P-640)		15		886	891	398087	4093321	P. Zafarraya
P.06.26.013-S (P-593)		16		888	892	398300	4091892	P. Zafarraya
P.06.26.015-S (P-544)		17		894	897	399548	4091300	P. Zafarraya
SGOP 1873 9. El Calar		18		783	887	396530	4092442	P. Zafarraya
Sondeo Guaro	1743-4-0018	19	250	739	921	394220	4091461	Sierra Alhama

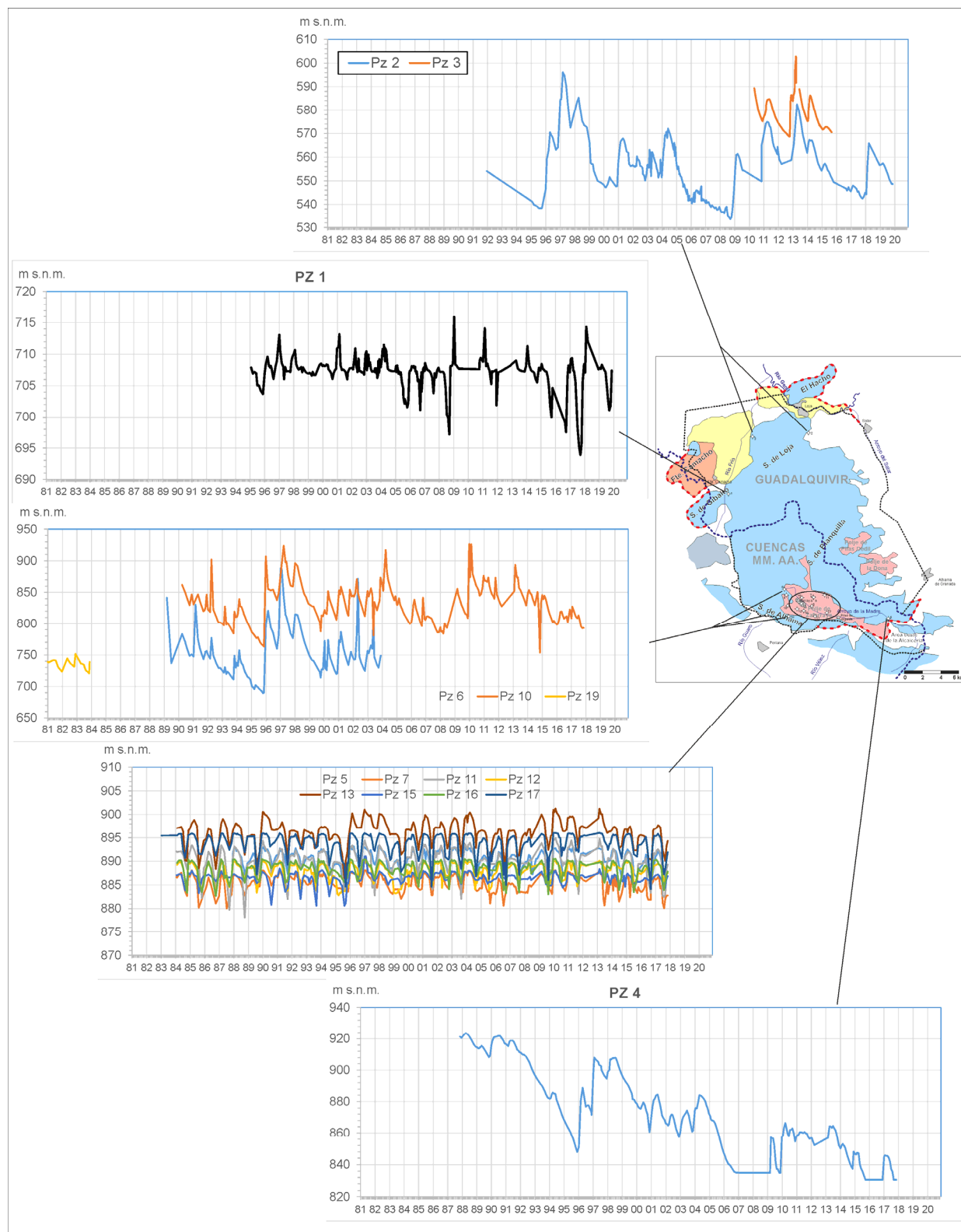


Figura 3.7. Evolución de niveles piezométricos en algunos puntos de control significativos del área.

Aunque no se dispone de puntos de control piezométrico en la parte central de la MASCH de Sierra Gorda-Zafarraya, parece evidente que el flujo subterráneo principal se dirige hacia el S, hacia las surgencias de Riofrío y las localizadas en el río Genil, a cotas comprendidas entre 480 y 520 m s.n.m. Es en este sector donde se producen las mayores oscilaciones piezométricas, de más de 60 m, entre 540 y 600 m s.n.m. Los niveles piezométricos del punto de control, Pz 1, localizado a unos

600 m al E del manantial del Charcón, Gl.2, descarga de la MASCH Sierra de Gibalto hacia la DHG, tienen una cota que oscila entre 695 y 715 m s.n.m. Estos niveles son bastante inferiores a los del manantial del Charcón, 738 m.s.n., esta circunstancia puede ser indicativa de la deficiente conexión hidráulica entre las MASCH de Sierra Gibalto y Sierra Gorda-Zafarraya aunque puede existir una transferencia significativa.

Un comportamiento hidrogeológico claramente diferente dentro de la MASCH Sierra Gorda-Zafarraya lo constituye el polje de Zafarraya. Al constituir un acuífero detrítico colgado y parcialmente desconectado del acuífero carbonatado, su nivel piezométrico se localiza a una cota mucho más alta (entre 880 y 900 m s.n.m.) y evoluciona de forma muy diferente a la del resto de la MASCH. Como muestra la figura 3.7, en el Polje las oscilaciones de nivel son claramente estacionales: en función de las explotaciones de verano y de la mayor recarga en el invierno.

En el borde occidental del polje de Zafarraya el comportamiento piezométrico de algunos puntos de control difiere de los del detrítico. Es el caso, por ejemplo, de los puntos Pz 6, Pz 10 y Pz 19, con oscilaciones más acentuadas que las del detrítico debido a que captan el acuífero carbonático de Sierra Gorda. En el caso del Pz 19 estas oscilaciones no son pronunciadas debido a que se localiza en las proximidades del manantial de Guaro en sierra Alhama. En este sector existe una componente del flujo hacia el N que descarga por el mencionado manantial, a cota mucho más alta que en su extremo meridional, 723 m s.n.m.

De las evoluciones piezométricas disponibles, destaca la del punto Pz 4 situado en el extremo oriental del polje de Zafarraya y que capta el acuífero carbonático. Entre 1988 y 2018 los niveles descienden casi 90 m, entre 920 y 830 m s.n.m. Este descenso paulatino no se registra en ninguno de los puntos de control disponibles. Pueden ser debidos al aumento de las explotaciones en el sector del polje de Zafarraya y/o a la ejecución del túnel del trasvase del arroyo de La Madre que reduciría las transferencias de agua hacia Sierra Gorda.

3.6. Hidrología superficial y relación río-acuífero

En este apartado se analiza la relación hídrica que mantienen los cauces de aguas superficiales con los acuíferos.

Río Genil. Constituye el principal eje de drenaje de la región. Discurre con dirección E-O por el borde septentrional de Sierra Gorda, entre las cotas 467 m s.n.m. (unión con el arroyo de Salar) y 420 m s.n.m. (confluencia con el arroyo de Riofrío). Hacia el río Genil vierten sus aguas los principales manantiales de Sierra Gorda, situados en las inmediaciones del núcleo urbano de Loja, así como el manantial de El Frontil, situado en la falda meridional del Hacho de Loja. Se trata, pues, de un río ganador en términos generales, por los significativos aportes de aguas subterráneas que recibe. A partir de diversos aforos diferenciales efectuados en un tramo de río comprendido entre Huétor-Tájar e Iznájar, López-Chicano (1992) estimó unas aportaciones netas subterráneas de 146,7 hm³/a. En IGME-DGA (2010) se estima que, a partir de los manantiales controlados por la red hidrométrica, la descarga media que estos aportan al río Genil es de 1285 l/s (40,52 hm³/año), aunque se advierte que en dicha cuantía no se tienen en cuenta todas las descargas que se producen, sino solo las controladas por la red hidrométrica, por lo que al volumen que se deduce de esta última también habría que sumarle las descargas visibles de menor entidad que carecen de control foronómico y las que se producen desde el acuífero al cauce de río Genil, bien de forma directa o difusa.

Arroyo de Riofrío. Se trata de un afluente del río Genil por su margen izquierda que en su cabecera se le conoce como arroyo de Las Mozas. Drena la escorrentía superficial generada en los terrenos de baja permeabilidad (“Trías de Antequera” y materiales pliocuaternarios indiferenciados) situados entre el borde occidental y noroccidental de Sierra Gorda. A estas aportaciones hay que añadir las procedentes de la MASCH Sierra de Gibalto y las de la MASCH Fuente Camacho. El cauce de este arroyo discurre en un tramo de 500 metros sobre calizas jurásicas de las sierras Gorda y Gibalto, de este segundo macizo, principalmente a través del manantial de El Charcón. La cota más baja de dicho tramo es 650 m s.n.m. Aguas abajo se encaja en una garganta excavada en otro afloramiento de brechas calcáreas, que está conectado hidráulicamente con el acuífero de Sierra Gorda. Prueba de esta conexión es la descarga significativa del manantial de La Atajea a 530 m s.n.m. Dos kilómetros río abajo recibe los aportes del grupo de manantiales de Riofrío, situados a 510 m s.n.m. Se trata, pues, de un cauce ganador en términos generales.

En IGME-DGA (2010), de acuerdo a los datos aportados por López Chicano (1990) en su tesis doctoral, cuantifica la aportación subterránea al cauce del río Frío a partir de los manantiales en 1189 l/s (37,50 hm³/año). Para el arroyo de las Mozas se estima en 8,8 hm³/año, procedente del acuífero de Sierra Gorda y 1,4 hm³/año de Sierra de Gibalto. Estas cuantías suponen un aporte subterráneo de 322 l/s del arroyo de las Mozas a río Frío. En total se cuantifica la aportación subterránea a la cuenca en 1511 l/s (47,65 hm³/año), de los que 46,30 hm³/año procederían de la MASCH de Sierra Gorda y el resto, 1,35 de la MASCH de Gibalto.

Arroyo de Salar. Este curso fluvial recorre, de S a N, el borde oriental de Sierra Gorda. Su cuenca hidrográfica está constituida por materiales de baja permeabilidad y por los afloramientos calizos de Sierra Gorda. Recoge el agua de escorrentía que pueda drenarse de los poljes de Llano de la Dona de Pilas Dedil. Aguas abajo de ambos poljes, discurre sobre calizas jurásicas de Sierra Gorda. La cota más baja de dicho tramo es 675 m s.n.m. A la altura del núcleo urbano del Salar, a una cota en torno a 545 m s.n.m., recibe aportes Sierra Gorda (manantiales de Bañuelo y Membrillo), indicando su papel de río ganador aguas abajo de dicha localidad. En el tramo de cabecera, formado por materiales carbonáticos, existen evidencias de río perdedor (López-Chicano, 1992). En IGME-DGA (2010) se estima la descarga por manantiales a este arroyo en 79 l/s (2,5 hm³/año).

Río Guaro, afluente del río Vélez en la DHCMA, nace en el manantial de igual nombre, situado a 720 m s.n.m., en el borde meridional de Sierra Gorda. De acuerdo a los datos de aforo tomados entre 1974/73 al 1983/84 la descarga al río Guaro sería de 228 l/s (7,19 hm³/año).

Arroyo de la Madre. Este curso de agua discurre de E a O por el polje de Zafarraya y es el principal cauce que transita por dicha cuenca endorreica, que tiene 151 km² de superficie, excluyendo la falda septentrional de Sierra Tejeda. La relación río-acuífero de este arroyo es muy compleja y ha sido objeto de numerosas campañas de medidas foronómicas y de publicaciones al respecto (Hidalgo, 1974; Ollero y García, 1983, 1984a y b; López-Chicano, 1992; López Chicano et al., 1996; etc). El análisis en detalles de esta relación se sale fuera de los objetivos de este estudio, por lo que nos remitimos a las referencias indicadas. No obstante, a continuación se describe de forma simplificada.

Las aportaciones totales del Arroyo de la Madre se han estimado entre 11 y 14 hm³/a, entre 10,8 y 14,4 hm³/a (Ollero y García, 1983) y 11,22 hm³/a en una campaña de aforos. De esta cantidad, en condiciones medias, parte se infiltra en la cabecera del arroyo hacia el acuífero carbonatado, entre 4 y 5 hm³/a, y del resto parte en el acuífero detrítico y parte, en muy altas avenidas, otra vez en el acuífero carbonatado, bien a través de los sumideros o bien infiltrándose lateralmente cuando el nivel piezométrico se eleva por encima del topográfico del Llano de Zafarraya.

No se conoce con precisión el volumen que se infiltra del arroyo de la Madre hacia el acuífero carbonatado y al detrítico, a pesar de que se han realizado varias campañas de aforos diferenciales en el cauce, entre otros motivos, porque la infiltración en uno u otro acuífero depende de la cantidad de escorrentía de arroyo y, en consecuencia, de la precipitación. En el apartado correspondiente de este documento destinado a calcular la recarga del acuífero de Zafarraya se realiza una estimación de cómo se podría distribuir la escorrentía del arroyo de La Madre hacia ambos acuíferos. No obstante, hay que señalar que, en ausencia de explotaciones, al ser una cuenca endorreica, la totalidad de la escorrentía del arroyo se infiltraría en el acuífero carbonatado de Sierra Gorda, bien en la cabecera, bien lateralmente pasando por el aluvial o bien por los sumideros.

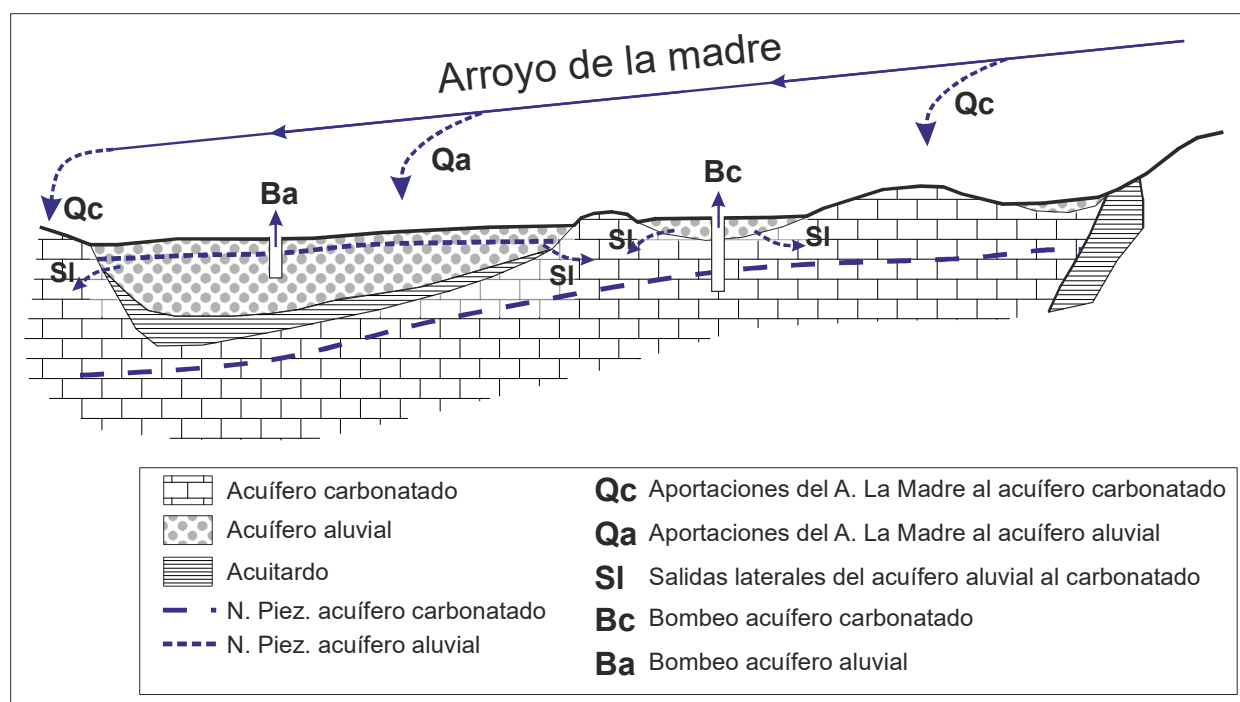


Figura 3.8. Esquema simplificado del Arroyo de La Madre y su relación con el acuífero carbonatado de Sierra Gorda y el detrítico de Zafarraya. Modificado de Ollero y García (1983).

3.7. Parámetros hidráulicos e hidrogeológicos

La heterogeneidad y anisotropía de la conductividad hidráulica (12-260 m/d) es la característica principal del acuífero carbonatado de Sierra Gorda (López-Chicano, 1992). El coeficiente de almacenamiento medio está alrededor del 2 %, mientras que la transmisividad varía entre 12 y 13.000 m²/d. En el Atlas de Andalucía (ITGE-Junta de Andalucía, 1998) se citan valores de hasta 16.400 m²/d. Uno de los sectores más transmisivo se localiza en las proximidades del manantial de Guaro (13.600 m²/d). Ensayos de bombeo efectuados en sondeos productivos situados en el sector suroriental del acuífero (extremo E del polje de Zafarraya) han arrojado valores de transmisividad comprendidos entre 40 y 1.100 m²/d. Otro ensayo efectuado en el borde oriental de la sierra de Gibalto reveló una transmisividad de 1.763 m²/d (ITGE, 1997). Hidalgo (1974) proporciona para el acuífero carbonático un coeficiente medio de almacenamiento del 1,5 %.

Por su parte, en el acuífero detrítico del polje de Zafarraya se han obtenido valores del 13 % para el coeficiente de almacenamiento y entre 20 y 200 m²/d para la transmisividad (Hidalgo, 1974; Ollero y García, 1984).

3.8. Explotaciones subterráneas

El uso preferente que se hace del agua subterránea contenida en el acuífero, tanto carbonático como detrítico, de Sierra Gorda, en su entorno más inmediato es el regadío. Este se localiza en parcelas agrícolas limítrofes con el macizo, en las márgenes de los ríos, aguas abajo de los manantiales y, sobre todo, en el campo de Zafarraya y en los Llanos de la Dona y de Pilas Dedil. El agua para estos fines se capta ó deriva directamente de manantiales o es bombeada a través de sondeos. Destacan las extracciones mediante bombeo que se concentran en el extremo oriental del polje de Zafarraya, las cuales sustentan buena parte de las actividades agrícolas desarrolladas en el interior del mismo. Existen bastante incertidumbre sobre los bombeos en las distintas MASCH objeto de este documento, por lo que los datos que se suministran a continuación son muy aproximados.

Estudios realizados por el IGME y la Junta de Andalucía en el año 1998 cuantificaban la explotación de la masa de agua subterránea en $9 \text{ hm}^3/\text{año}$. Dos años más tarde se estimaban un volumen de bombeo para agricultura en el polje de Zafarraya superior a los $10 \text{ hm}^3/\text{año}$ (IGME-Junta de Andalucía, 2000). En el interior de dicho polje también existen captaciones destinadas al abastecimiento de explotaciones ganaderas de diverso tamaño.

Aunque existen explotaciones subterráneas en el borde del macizo carbonatado, muchas de ellas tienen como objetivo la regulación de los manantiales, como los de Guaro, Charcón o Riofrío, por lo que, en conjunto, van a tener muy poca influencia para la estimación de la recarga de las MASCH objeto de este documento y en su funcionamiento hidrogeológico. No así, el grueso de las numerosas extracciones localizadas en los poljes del interior de Sierra Gorda de Zafarraya, la Dona y Pilas Dedil. Las explotaciones actuales según los PH en el conjunto de la MASCH de Sierra Gorda-Zafarraya se han estimado en $14 \text{ hm}^3/\text{a}$ de los cuales en la DHG se extraen $5,5 \text{ hm}^3/\text{a}$ y en la DHCMA $8,5 \text{ hm}^3/\text{a}$. Es decir, considerando insignificantes las explotaciones fuera de los poljes del interior de sierra Gorda, $8,5 \text{ hm}^3/\text{a}$ corresponderían al Polje de Zafarraya y el resto a las extracciones en los poljes de La Dona y Dedil.

El estudio de la Diputación de 1982 (Ollero y García, 1983) estimó las explotaciones en el Polje de Zafarraya en $2 \text{ hm}^3/\text{a}$, un año después, en 1983, el estudio de DGOH (1983), las estimó en $3 \text{ hm}^3/\text{a}$. Siguiendo una proporcionalidad en el tiempo de la superficie puesta en regadío en los poljes, se han estimado sus explotaciones anuales.

Hay que indicar que en el polje de Zafarraya, los sondeos localizados en su parte oriental, al este de Pilas de Algaida, captan los carbonatos de Sierra Gorda, mientras que los situados al oeste captan en su mayoría el acuífero aluvial. No se dispone de información suficiente para cuantificar que cantidad corresponden a las extracciones de uno u otro acuífero. No obstante, esta información es necesaria en este informe porque se va abordar el análisis de la recarga por separado en ambos acuíferos. Aunque somos conscientes de la incertidumbre de la aproximación, esta estimación se ha realizado en función del número de sondeos localizados en uno u otro sector del polje de Zafarraya. Como resultado se obtiene que el 25% captarían el acuífero carbonatado y el resto el aluvial.

Las explotaciones anuales para el periodo hidrológico comprendido entre 1985/86 y 2017/18 se recoge en la figura 3.9. En el periodo analizado han sido de $11,13 \text{ hm}^3/\text{a}$, siendo en los últimos 10 años (2008/09-2017/18) de $13,52 \text{ hm}^3/\text{a}$.

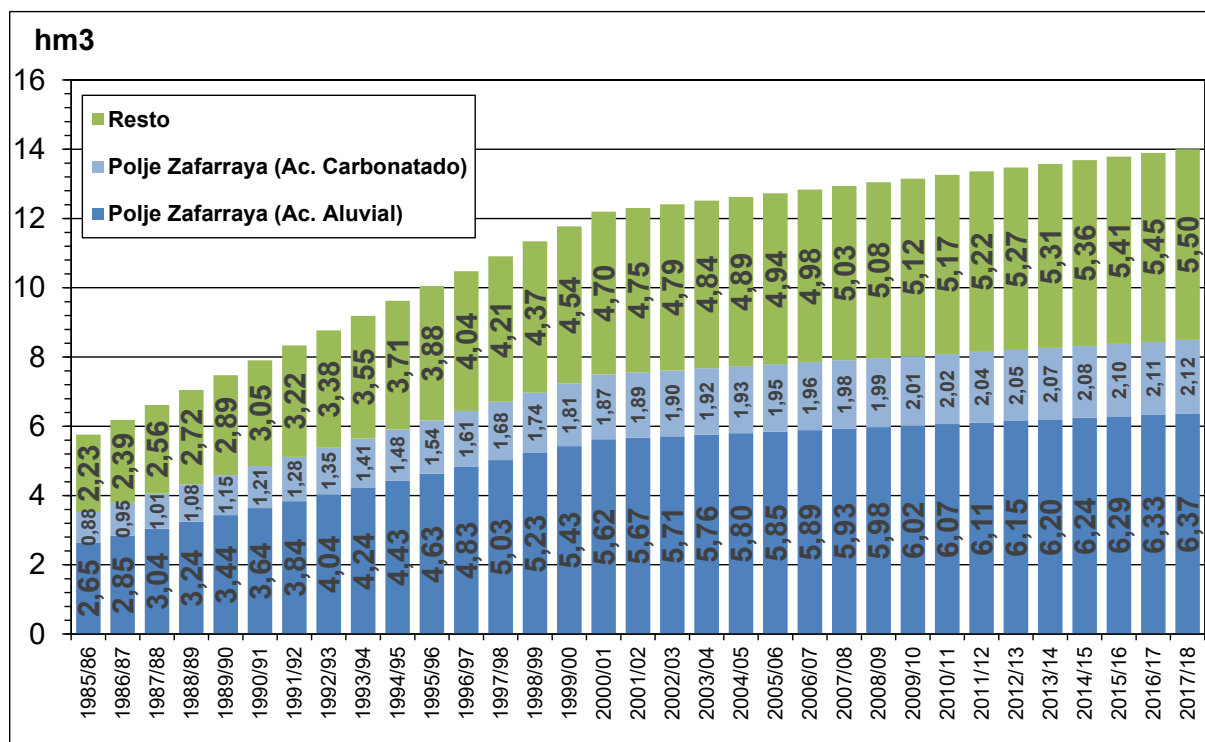


Figura 3.9. Explotaciones anuales estimadas en el polje de Zafarraya y en el resto de la MASCH de Sierra Gorda-Zafarraya.

4. CLIMATOLOGÍA

Las MASCH analizadas de Sierra Gorda-Zafarraya, Gibalto y Fuente Camacho se encuentran bajo la influencia del clima mediterráneo con matices continentales (Pezzi, 1977), en el que los inviernos son suaves y los veranos secos y prolongados. La distribución de la pluviometría está marcada por una notable estacionalidad; los valores más elevados se registran durante las estaciones de otoño, invierno y primavera, y son casi inexistentes durante los meses de verano. La orografía constituye un factor fundamental en la distribución de las precipitaciones y las temperaturas en esta región. En las zonas altas, el régimen pluviométrico es más elevado (con nevadas frecuentes durante el invierno) y las temperaturas considerablemente más inferiores que en las zonas bajas.

4.1. Información meteorológica

El estudio climático para el cálculo de las aportaciones por la infiltración directa procedente de la precipitación atmosférica se ha realizado a partir de datos diarios del periodo comprendido entre octubre de 1985 y septiembre de 2018. Con este fin, se ha contado con 16 estaciones: 4 pluviométricas, 4 termométricas asociadas y 8 termopluviométricas (Tabla 4.1 y Figura 4.1).

Tabla 4.1. Estaciones climáticas utilizadas con sus principales características (Datum ETRS89)

Estación	Coordenadas UTM y m s.n.m.	Observaciones	Valores
5572 P. Bermejales	X: 420481 Y: 4094850 Z: 802	Termométrica	T media: 15.41 °C
5576 Alhama de Granada	X: 412285 Y: 4095950 Z: 839	Pluviométrica. Superficie de influencia: 47,00 km ² Asociada a la termométrica 5572	P media: 404,9 mm/a P max: 750,9 mm P min: 171,9 mm
5577 S.C del Comercio	X: 413465 Y: 4101740 Z: 769	Pluviométrica Superficie de influencia: 31,00 km ² Asociada a la termométrica 5572	P media: 335,6 mm/a P max: 572,8 mm P min: 102,5 mm
5580 Huétor Tájar	X: 407034 Y: 4116900 Z: 485	Pluviométrica Superficie de influencia: 19,75 km ² Asociada a la termométrica 5582A	P media: 434,4 mm/a P max: 876,1 mm P min: 167,1 mm
5582A Loja Ayuntamiento	X: 395959 Y: 4113490 Z: 656	Termopluviométrica Superficie de influencia: 92,75 km ²	P media: 435,3 mm/a P max: 859 mm P min: 212,3 mm T media: 16,56 °C
5584 Loja Riofrío	X: 392671 Y: 4111990 Z: 504	Pluviométrica Superficie de influencia: 93 km ² Asociada a la termométrica 5582A	P media: 441,5 mm/a P max: 835 mm P min: 162,5 mm
6090 Pto. de los Alazores	X: 389187 Y: 4099900 Z: 956	Pluviométrica Superficie de influencia: 73,25 km ² Asociada a la termométrica 6097E	P media: 817,1 mm/a P max: 1674,5 mm P min: 296 mm
6097E Archidona	X: 376540 Y: 4106110 Z: 707	Termométrica	T media: 16,78 °C
6179 Alfarnate	X: 387750 Y: 4094860 Z: 895	Termopluviométrica Superficie de influencia: 5,50 km ²	P media: 939,6 mm/a P max: 1829,3 mm P min: 392,0 mm T media: 13,65 °C
6377 Ventas de Zafarraya	X: 400064 Y: 4090480 Z: 905	Pluviométrica Superficie de influencia: 41,75 km ² Asociada a la AGRO	P media: 775,7 mm/a P max: 1414,1 mm P min: 383,2 mm
6378 Alhama Alcaicería	X: 412893 Y: 4087630 Z: 1026	Pluviométrica Superficie de influencia: 4,50 km ² Asociada a la 5572	P media: 686,7 mm/a P max: 1754 mm P min: 237,6 mm
AGRO Zafarraya agro	X: 397313 Y: 4094340 Z: 889	Termopluviométrica Superficie de influencia: 108,50 km ²	P media: 956,7 mm/a P max: 2451,7 mm P min: 357,9 mm T media: 12,55 °C

Las lagunas de información se han completado mediante regresión simple a partir de valores de otras estaciones cercanas de similares características y con buen coeficiente de correlación.

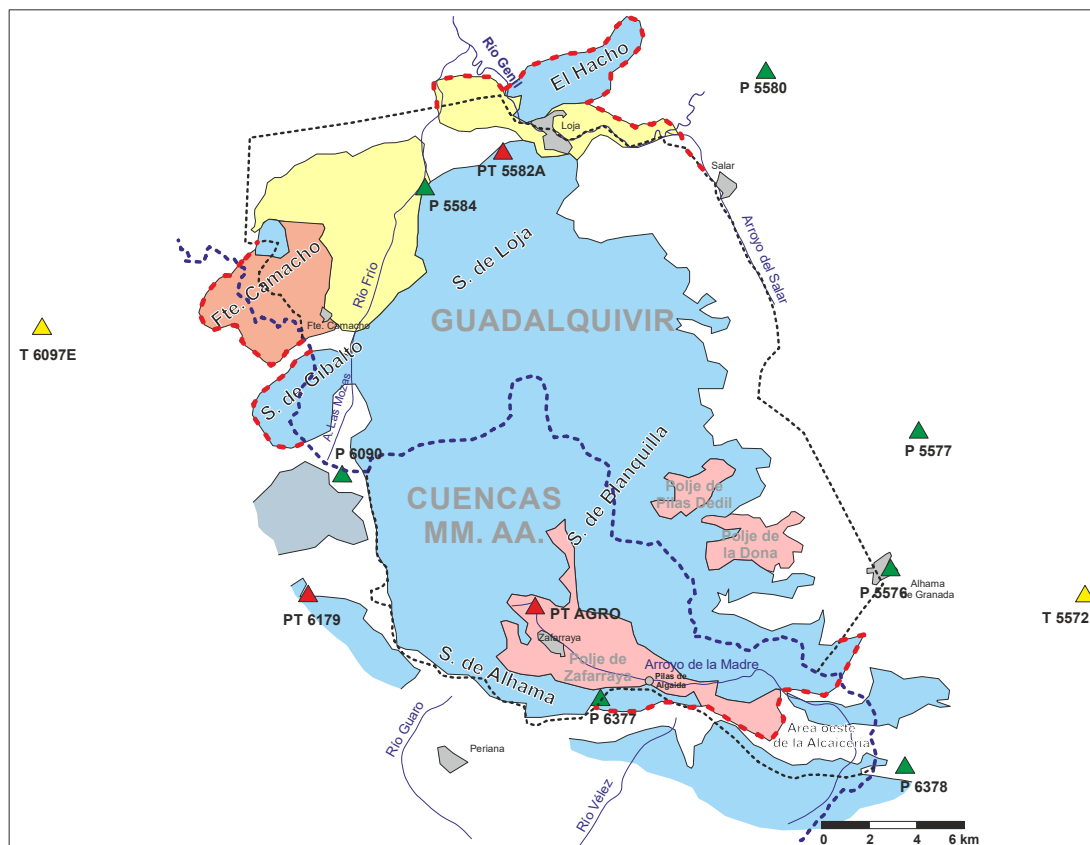


Figura 4.1. Estaciones climáticas utilizadas para la determinación de la recarga.

4.2. Análisis espacial y temporal

Análisis espacial

A partir de los datos de las estaciones seleccionadas, y de la tendencia regional, se han elaborado los mapas de isoyetas (Figura 4.2) para el año medio del periodo (1985/86-1916/17), y para los de tipo húmedo (2012/13) y seco (1978/79). Estos dos últimos obtenidos según la distribución normal ajustada (Figura 4.5).

Análisis temporal

La precipitación global en la MASb se ha calculado por ponderación de las 10 estaciones pluviométricas mediante polígonos de Thiessen (Figura 4.3). La precipitación media obtenida es de 626,2 mm/a, con una desviación típica de 204,7 mm. Del yetograma anual (Figura 4.4) y de la distribución normal ajustada (Figura 4.5) se han obtenido los valores representativos de la serie. El año *tipo medio* (más cercano a la precipitación media: 626 mm/a) es 2002/03, con 621 mm, el de *tipo seco* (más cercano a la precipitación con el 12,5% de probabilidad de ser menor) es 1916/17, con 440 mm, y el de *tipo húmedo* (más cercano a la precipitación con el 87,5% de probabilidad de ser menor) es 2017/18, con 797 mm. El diagrama ombrotérmico para la precipitación y temperatura media mensual (Figura 4.6) muestra que el periodo seco ocupa los 3 meses de verano (junio-agosto).

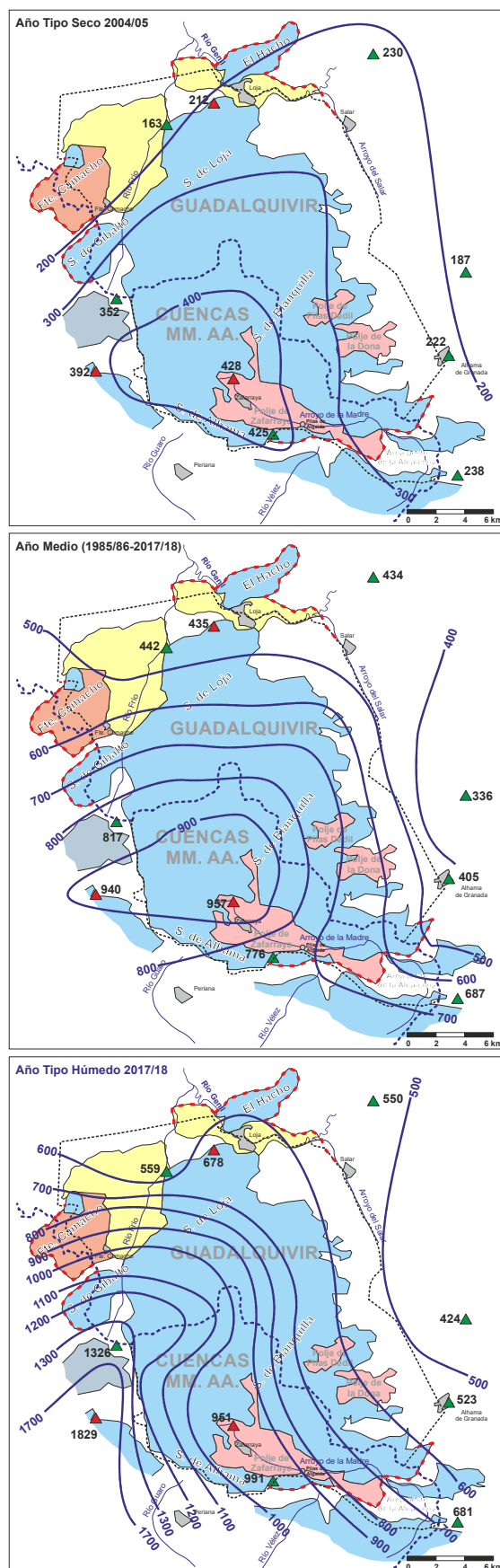


Figura 4.2. Isoyetas para la precipitación media y para los años tipo seco y húmedo

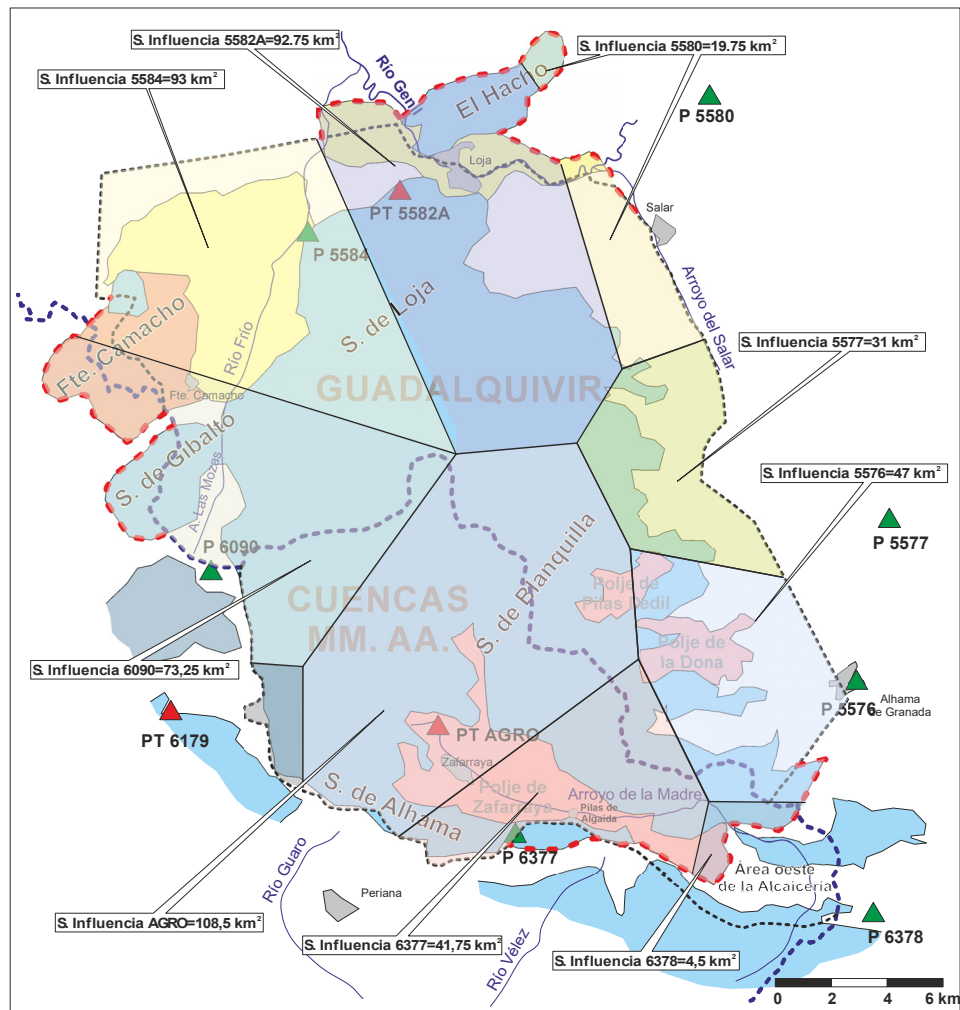


Figura 4.3. Zonas de influencia de las estaciones pluviométricas determinadas por polígonos de Thiessen

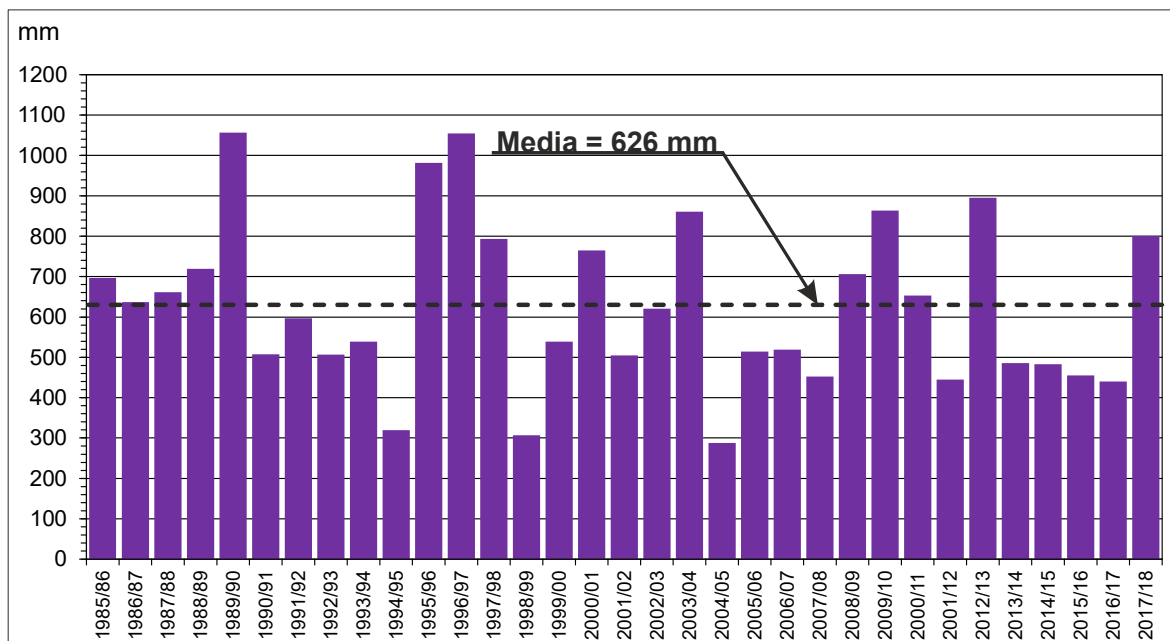


Figura 4.4. Yetograma anual de la precipitación media

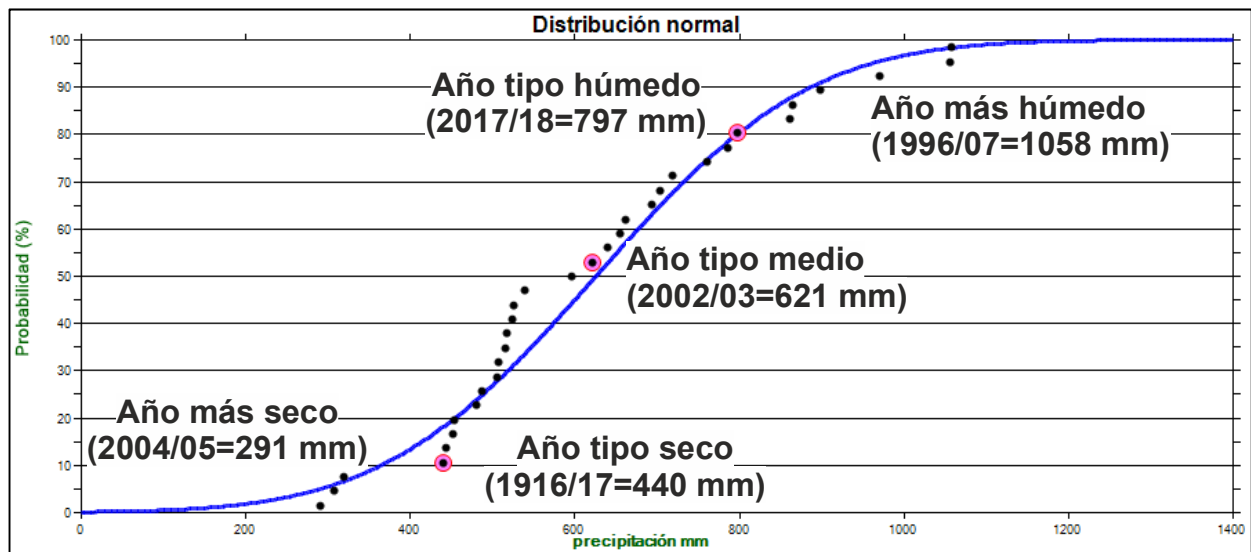


Figura 4.5. Distribución normal ajustada y años tipo

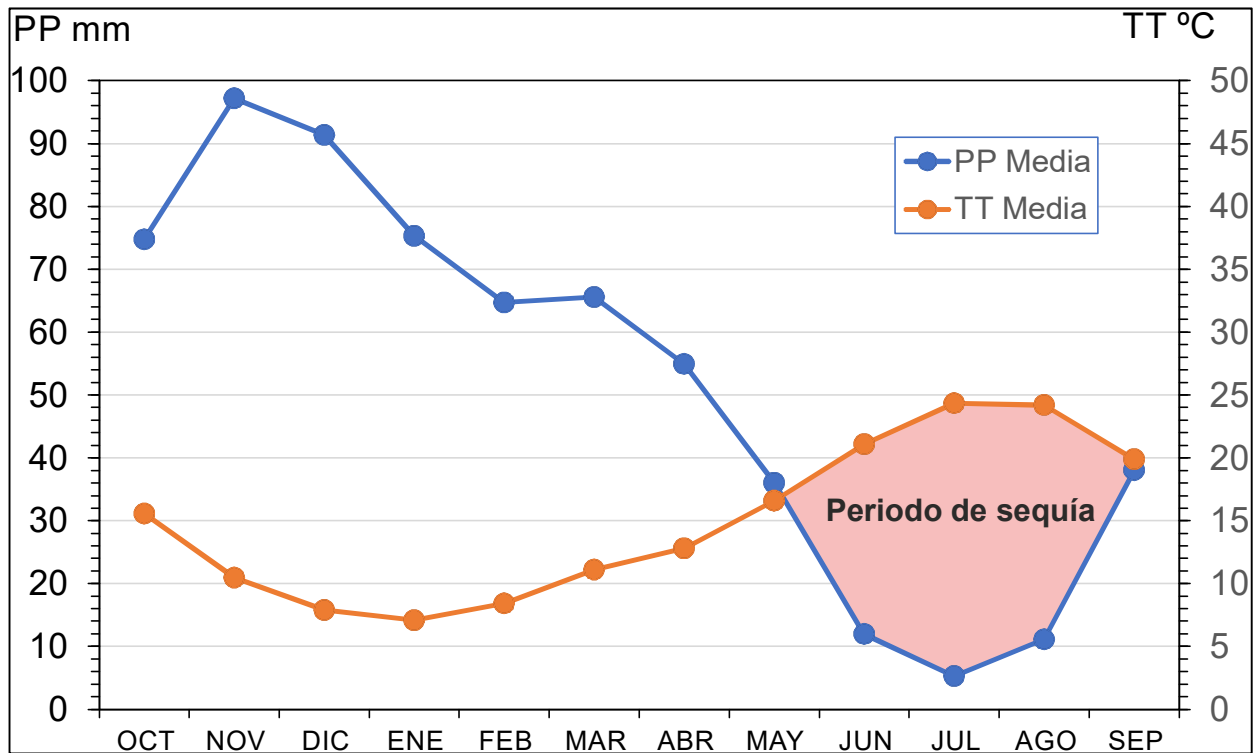


Figura 4.6. Diagrama ombrotérmico del año medio

Para distinguir los periodos secos de los húmedos se han representado las desviaciones acumuladas anualmente respecto a la media (Figura 3.7). En los primeros el valor desciende (en rojo) y en los segundos asciende (en azul), mientras que en los considerados medios se sigue una tendencia horizontal (en verde). Aunque en los períodos diferenciados se intercalan algunos pocos años más húmedos o secos, en general, a lo largo de los 33 años analizados, se podrían distinguir siete tendencias climáticas las cuales se identifican en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Análisis de los diferentes periodos climáticos acontecidos entre octubre de 1972 y septiembre de 2021

Periodo	Tipología climática	Duración (años)	Porcentaje de precipitación con respecto a la media
1985/86 a 1990/91	Húmedo	5	25 % superior
1991/92 a 1994/95	Seco	5	21 % inferior
1995/96 a 1997/98	Húmedo	3	51 % superior
1998/99 a 2003/04	Medio	6	
2004/05 a 2007/08	Seco	4	19 % inferior
2008/09 a 2012/13	Húmedo	5	14 % superior
2013/14 a 2016/17	Seco	4	15 % inferior

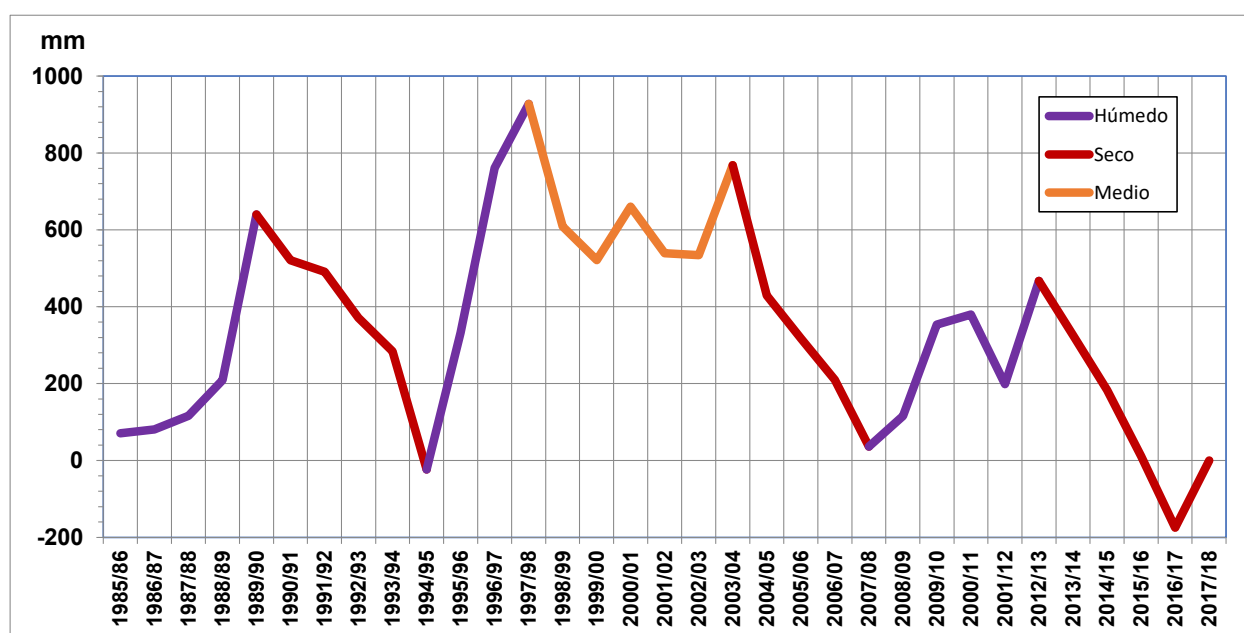


Figura 3.7. Desviación acumulada de la precipitación anual respecto a la media

5. RECARGA DE ACUÍFEROS

Como se ha comentado en el apartado de funcionamiento hidrogeológico, en la MASCH de Sierra Gorda-Zafarraya el polje de Zafarraya constituye un importante acuífero aluvial con un comportamiento hidrogeológico muy diferente al principal acuífero carbonatado. Por este motivo, en este estudio se va a calcular la recarga en el polje de Zafarraya independientemente del resto de las MASCH. No obstante, al constituir una cuenca endorréica, en régimen no influenciado sus salidas subterráneas van íntegramente hacia el acuífero carbonatado.

5.1. El código RENATA

RENATA (REcarga NATural a los Acuíferos) es un código de evaluación de la recarga a los acuíferos que combina dos metodologías tradicionales de estimación de este parámetro a través de un único proceso de cálculo iterativo (Figura 5.1). Dichos métodos son: el balance de agua en el suelo y la estimación de la recarga a los acuíferos mediante un modelo numérico de flujo en diferencias finitas. El enfoque conjunto y coordinado del empleo de ambas metodologías al unísono pretende garantizar una mejor coherencia entre los resultados que ofrece el balance de agua en el suelo -que proporciona la magnitud de la recarga potencial- y las fluctuaciones del nivel freático -que refleja los efectos de la recarga real- en el acuífero.

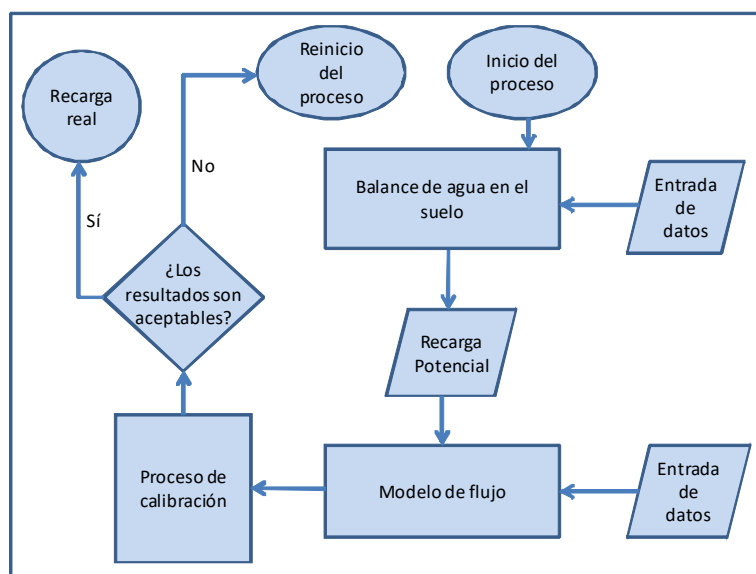


Figura 5.1. Diagrama de flujo del código RENATA

Los resultados que proporciona un balance de humedad en el suelo se vienen utilizando, desde hace algún tiempo, como datos de entrada a un modelo numérico de flujo, para que este valide la bondad de la estimación realizada, pero sin que ambos procesos de cálculo se interrelacionen automáticamente entre sí mediante una única sistemática de procesamiento de datos. Esta era la forma en que operaba la primera versión de RENATA (DPA-IGME, 2012).

La nueva versión de RENATA, que es la que se emplea en el presente documento, se caracteriza por presentar un procedimiento de cálculo y calibración continuo que lo hacen novedoso, versátil y sencillo de manejar, aunque su utilización exige disponer de un modelo conceptual del acuífero robusto y plausible.

La nueva versión de RENATA, que es la que se emplea en el presente documento, se caracteriza por presentar un procedimiento de cálculo y calibración continuo que lo hacen novedoso, versátil y sencillo de manejar, aunque su utilización exige disponer de un modelo conceptual del acuífero robusto y plausible.

El código opera el balance de agua en el suelo de manera distribuida a partir de dividir la superficie permeable del terreno sobre la que se puede infiltrar agua en tres tipos de sectores: climáticos, suelo y riego. El proceso de cálculo permite definir y calibrar de forma distribuida un parámetro tan incierto y difícil de determinar como la reserva de agua en el suelo. RENATA, una vez calibrado, también se puede utilizar como una herramienta complementaria de apoyo a la predicción y a la simulación de hipótesis de gestión, siempre que no sea recomendable o preciso realizar una modelación de flujo más específico o de mayor detalle.

La aplicación de este código ofrece una serie de ventajas frente a otras metodologías de estimación de la recarga a los acuíferos como son:

- Utiliza parámetros distribuidos y tiene en cuenta el valor de la precipitación y de la temperatura en el tiempo y en el espacio.
- Calcula la recarga a nivel diario y proporciona series temporales de la misma en toda la superficie del acuífero para cada una de las celdas de la malla en las que se subdivide su superficie.
- Permite la simulación del flujo subterráneo, por lo que los valores de recarga son ajustados y calibrados con series de niveles piezométricos e hidrogramas de las descargas.
- En el ajuste y calibración también se pueden incluir las series de extracciones históricas.

La estimación de la recarga mediante la aplicación del código RENATA contempla los pasos que se sintetizan en la figura 5.2.

En el documento elaborado por DPA-IGME (2012) titulado “RENATA (Recarga Natural de Acuíferos). Manual del Usuario” se detallan con precisión todos los métodos de los que dispone el programa para calcular la evapotranspiración potencial, evapotranspiración real, lluvia útil, infiltración y escorrentía superficial.

El balance de agua en el suelo se ha obtenido aplicando la siguiente metodología:

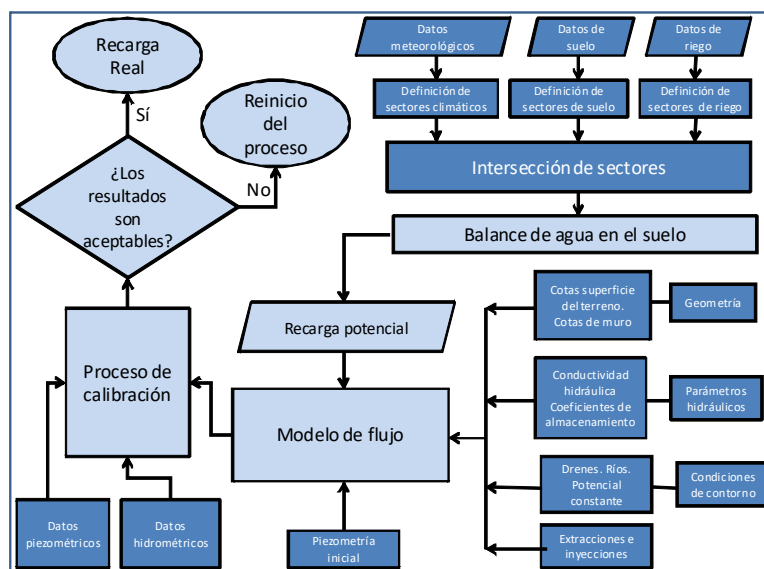


Figura 5.2. Diagrama de flujo del código RENATA detallando los datos que se tienen que aportar al programa

- Cálculo de la Evapotranspiración potencial (ETP) mediante el método la expresión de Hargreaves y Samani (1985) aplicado a los datos de las estaciones termométrica.
- Determinación de la lluvia útil (LL_U) mediante el método del balance de agua en el suelo de Thornthwaite modificado por G. Girard (1981)
- Descomposición de la lluvia útil (LL_U) en escorrentía (ESC) e infiltración (INF) mediante el método del Soil Conservation Service de los EEUU (in Témez, 1978).

5.2. Acuífero aluvial del polje de Zafarraya

Debido al diferente comportamiento hídrico del Polje de Zafarraya y a su importancia en el resto de las MASCH objeto de este documento, la cuantificación de su recarga y balance hídrico se va a estimar independientemente del resto.

Además de la infiltración directa del agua de lluvia en el aluvial, la principal fuente de recarga del Polje procede de la escorrentía superficial del arroyo de La Madre.

Aunque puntualmente, y dependiendo del nivel en el acuífero aluvial, el arroyo de La Madre pueda ser ganador en alguno de sus tramos, como se ha indicado en el apartado 3.6, en general, y en su totalidad, es perdedor hacia el acuífero carbonatado y hacia el acuífero aluvial. Por este motivo, para alcanzar los objetivos de este estudio, serán necesario estimar la escorrentía superficial y la infiltración en cada uno de los dos acuíferos implicados.

Los criterios seguidos para calcular y descomponer la infiltración del arroyo de La Madre han sido los siguientes:

- De la diferente bibliografía consultada se estima que las aportaciones superficiales medias del arroyo de La Madre están comprendidas entre 11 y 14 hm³/a
- La recarga por infiltración en el acuífero carbonatado bien directamente o bien a través de los afloramientos aluviales existentes antes de llegar a Pilas de Algaida se ha estimado entre 4 y 5 hm³/a.
- El resto de escorrentía llegaría al aluvial para infiltrarse en su totalidad. Según se recoge en el informe de Ollero y García de 1983, esto ocurriría cuando la precipitación diaria es muy elevada. Esta aportación al acuífero aluvial la estima en 4,6 hm³/a.
- Cuando la escorrentía del arroyo es intensa, se acaba infiltrándose hacia el acuífero carbonatado por los sumideros del polje y, en ocasiones, cuando el nivel piezométrico es muy alto produciendo inundaciones en el polje, lateralmente. También, por comunicación verbal, la infiltración por los sumideros ocurre cuando la precipitación es superior a los 100 mm/24h.

Para las estimaciones se han utilizado los datos diarios de precipitación de la estación pluviométrica de Ventas de Zafarraya (nº 6377), en el periodo comprendido entre 1985/86 y 2017/18, sobre una superficie de cuenca vertiente del arroyo de La Madre de 151 km².

La escorrentía superficial se ha estimado por el método del número de curva (NC) del Soil Conservation Service de los EEUU aplicado directamente a la precipitación. Para obtener una escorrentía media similar a la indicada por las referencias bibliográficas se ha utilizado un valor de umbral de escorrentía (Po) de 13 mm, NC=80. La precipitación eficaz resultante ha sido de 86,3 mm/a, equivalente a 13,0 hm³/a, corresponde a un 11,1% de la precipitación media 775,2 mm/a.

Para obtener unos valores de infiltración en el acuífero carbonatado en la cabecera del arroyo entre 4 y 5 hm³/a, se ha considerado que cuando la escorrentía sea inferior a 3 mm/día se infiltra en su totalidad y cuando sea superior la diferencia escurre para infiltrarse en el acuífero aluvial. Con este procedimiento se ha estimado una infiltración media en el acuífero carbonatado de 4,4 hm³/a, pasando el resto, 8,6 hm³/a, hacia el aluvial.

Por último, cuando la escorrentía es muy elevada alcanzaría los sumideros para recargar el acuífero carbonatado o se infiltraría lateralmente hacia el mismo cuando el nivel alcanzado fuera muy alto. Sobre la base de los valores medios indicados en los estudios precedentes, se ha considerado que esta segunda infiltración en el acuífero carbonatado se produciría cuando la escorrentía que circula por el arroyo es superior a 10 mm/día, a partir de esta cantidad el aluvial no tendría capacidad para

infiltrar toda el agua circulante. Los resultados medios obtenidos tras la simulación en estas condiciones han sido de 5,3 hm³/a de infiltración en el aluvial y de 3,40 hm³/a que se infiltrarían por los sumideros y lateralmente durante los episodios extremadamente lluviosos.

Las estimaciones se han realizado a nivel diario para poder ser incorporados en el modelo de simulación RENATA. Los resultados a nivel anual se recogen en las gráficas de la figura 5.3. Cabe destacar las elevadas aportaciones en el año 1996/97, que superaron los 40 hm³, debido a las fuertes precipitaciones caídas durante esa época

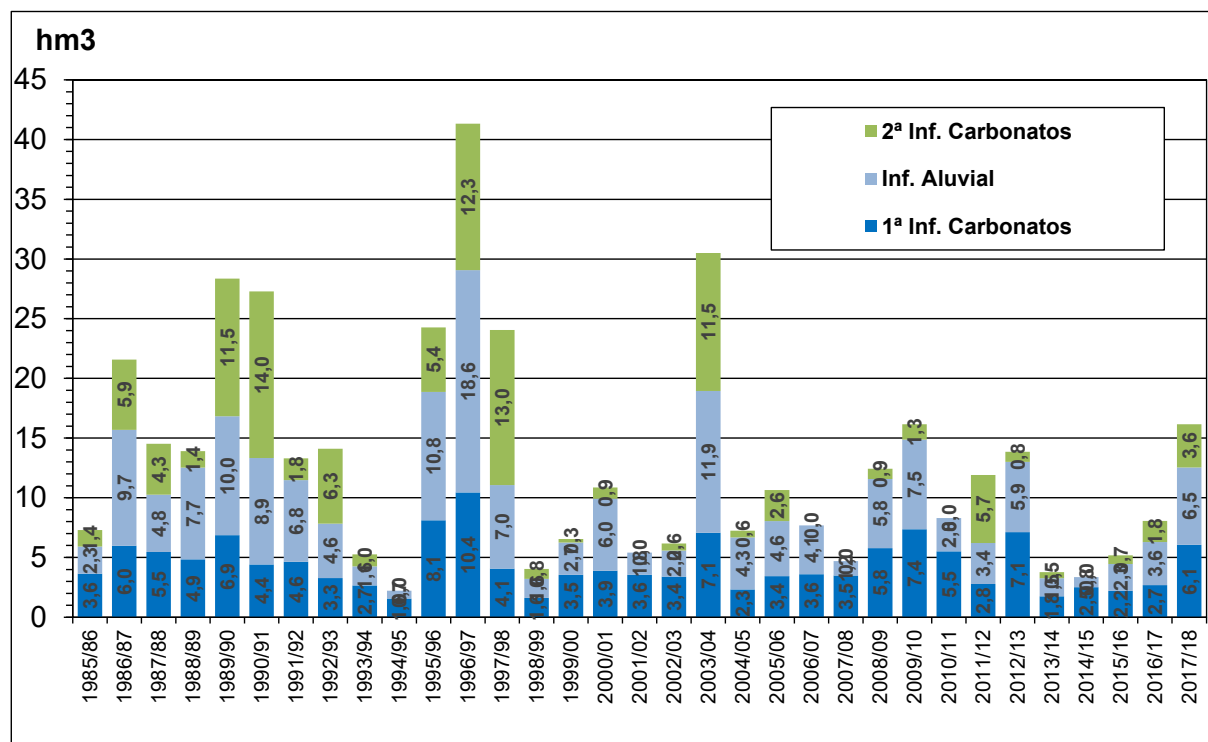


Figura 5.3. Aportaciones estimadas del arroyo de La Madre al acuífero carbonatado y al aluvial.

5.2.1 Diseño del modelo

Generación de la malla

Para la aplicación del código RENATA en el acuífero aluvial del polje de Zafarraya se ha definido un mallado rectangular de coordenadas UTM X: 395000-403000 e Y: 4090000-4096000 en la que queda enmarcada la superficie sujeta al proceso de cálculo y estimación de la recarga (Figura 5.22). El acuífero simulado se extiende desde el núcleo de Pilas de Algaida hasta ocupar todo el afloramiento aluvial situado al O. La malla definida consta de 24 filas y 32 columnas con un tamaño de celdas de 0,25x0,25 km. Las de tipo activo ocupan una extensión de 19,31 km².

El cálculo de la recarga se ha realizado a nivel diario en cada una de las celdas con superficie aflorante permeable (aluvial) para un periodo de 33 años comprendidos entre 1985/86 y 2017/18.

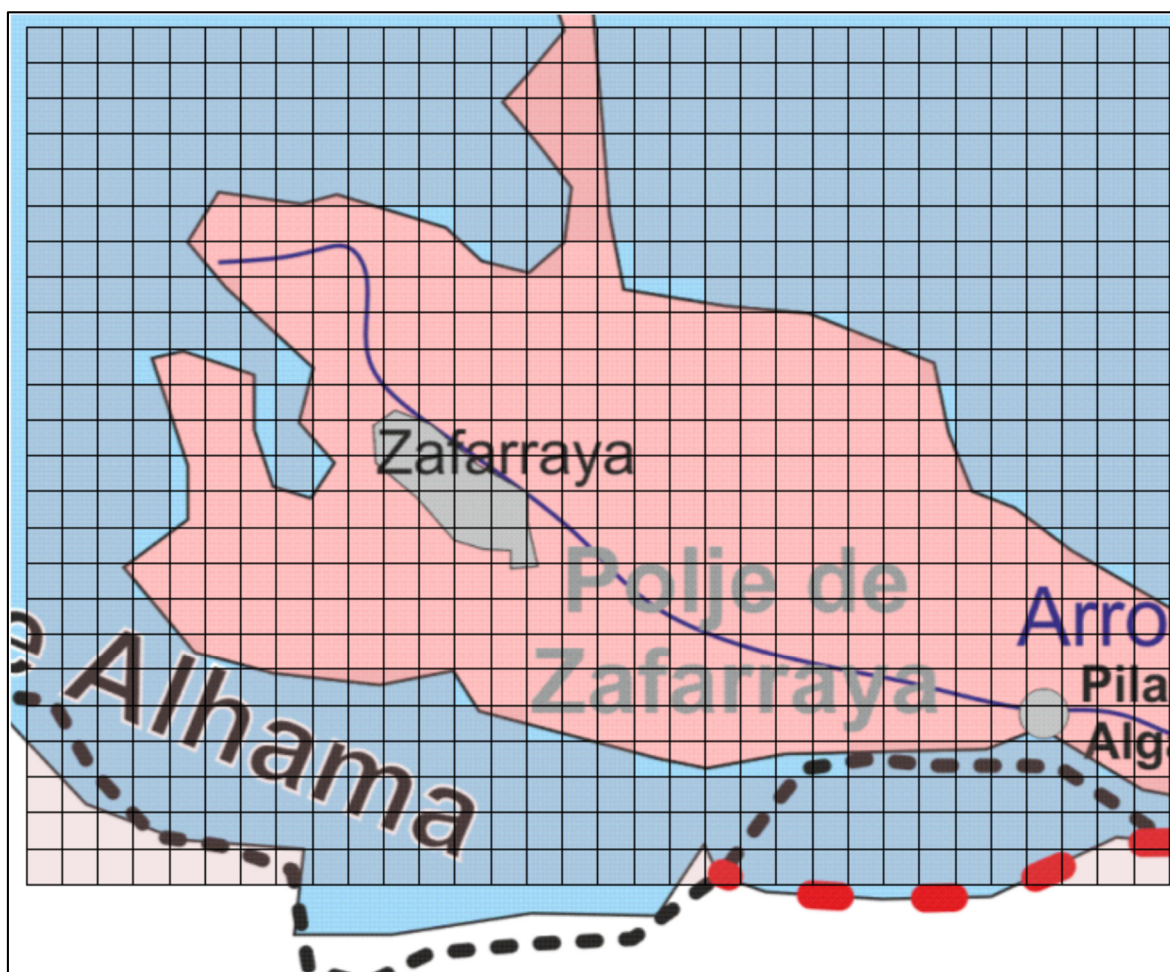


Figura 5.4. Mallado y límites del modelo en el acuífero aluvial del polje de Zafarraya.

Sectores climáticos

Para la definición de los sectores climáticos (Tabla 5.1) se han utilizado las 2 estaciones pluviométricas más cercanas: la agronómica de Zafarraya (AGRO) y la 6377. El cálculo de la ETP se ha realizado por el método de Hargreaves y Samani con los datos de la estación termométrica de AGRO.

Tabla 5.1. Características de los sectores climáticos

Sector climático Est. Pluviométrica	Estación Termométrica	Superficie (km ²)	Precipitación media (mm/a)	ETP media (mm/a)
AGRO	AGRO	9,50	957	1.259
6377	AGRO	9,81	776	1.259

Los sectores climáticos que se han determinado por el método de los *polígonos de Thiessen* quedan caracterizados por su correspondiente estación pluviométrica y serie de ETP común a todos. Dichos sectores se han adaptado al mallado definido para poder aplicar el código RENATA (Figura 5.23 A).

Sectores de suelo

Se ha definido un solo sector de suelo correspondiente al afloramiento aluvial del polje (Figura 5.23 B). Para asignar un valor a los parámetros del suelo, además de criterios hidrogeológicos y de conocimiento experto de la zona, se han utilizado como referencia previa los estimados previamente en otros trabajos. Además, se ha tenido en cuenta que el balance hídrico sea congruente con

resultados obtenidos en trabajos previos. Para la determinación de la recarga con la aplicación RENATA los parámetros utilizados han sido modificados a lo largo del proceso de calibración en función de los resultados arrojados hasta alcanzar un ajuste aceptable entre las evoluciones piezométricas calculadas y observadas. Los valores finalmente obtenidos se muestran en la tabla 5.2. No se ha considerado la posibilidad de escorrentía superficial en el aluvial debido a su carácter endorreico por lo que toda la lluvia útil se transformará en infiltración.

Tabla 5.2. Sector de suelo: parámetros utilizados

Sector de suelo	Superficie (km ²)	Parámetros
Aluvial	19,31	RU _{min} =40 mm RU _{max} =60 mm

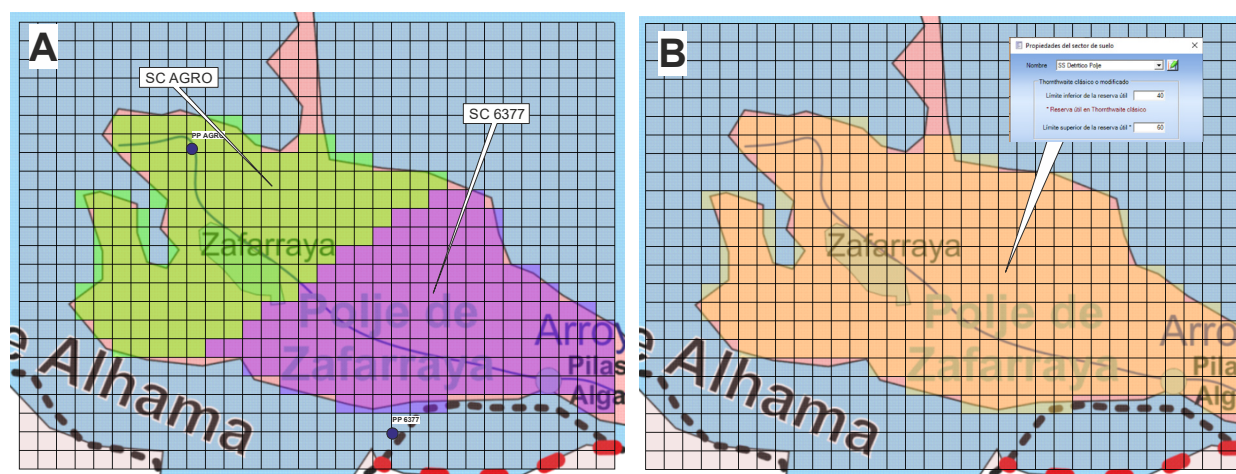


Figura 5.5. A) Sectores climáticos calculados por polígonos de Thiessen ajustados al mallado aplicado en el código RENATA. B) Sector del suelo sobre el aluvial.

Sectores de riego

Se ha tomado como base las explotaciones de los últimos años, estimadas en 8,5 hm³/a, con una dotación media de 6000 m³/ha/a para los tomates, lechuga y huerta en general, equivaldría a una superficie de riego de 1.400 ha. El aumento progresivo desde 1985 de las superficie regada se contempla en la simulación modificando la dotación en la misma proporción que las explotaciones estimadas (ver figura 3.8). Para la distribución mensual de las dotaciones se han seguido los porcentajes de riego indicados para estos cultivos (Ollero y García, 1983) que se distribuirían entre mayo y octubre (Figura 5.6).

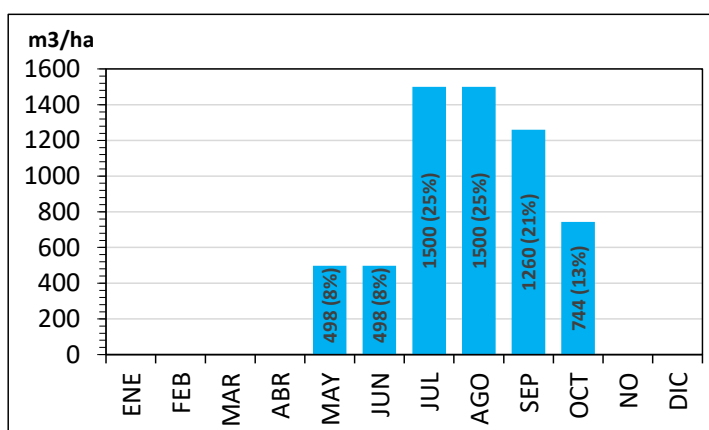


Figura 5.6. Distribución mensual de las dotaciones de riego utilizadas en la simulación con RENATA.

Intersección de sectores y definición de áreas de recarga

Las intersecciones resultantes corresponden a las de los sectores de suelo, riego y climáticas, definidas por los polígonos de Thiessen. En total se han diferenciado 4 áreas con diferente tasa de recarga (tabla 5.7). En la figura 5.8A se muestran los sectores diferenciados con las mismas condiciones de recarga.

Tabla 5.7. Áreas establecidas con diferente recarga

Área	Superficie (km ²)	Sector climático	Sector riego
1	3,62	AGRO	No
2	5,88	AGRO	Si
3	8,12	6377	Si
4	1,69	6377	No
Total	19,31		

Recarga Alóctona

La recarga alóctona procedente del río de La Madre que se infiltran principalmente en el aluvial y, durante los intensos aguaceros, por los sumideros del polje o lateralmente hacia el acuífero carbonatado se ha incluido en el modelo como entradas por el cauce. Su estimación en el periodo simulado se ha realizado en el marco de este estudio, al inicio de este apartado, y corresponde a la diferencia entre la escorrentía en el cauce menos la que se infiltra hacia los carbonatos de sierra Gorda antes de entrar en el aluvial del polje. Como ya se ha indicado, esta estimación se ha realizado a nivel diario, pero en la aplicación se incluye mensualmente. Los valores agrupados anualmente se recogen gráficamente en la figura 5.7.

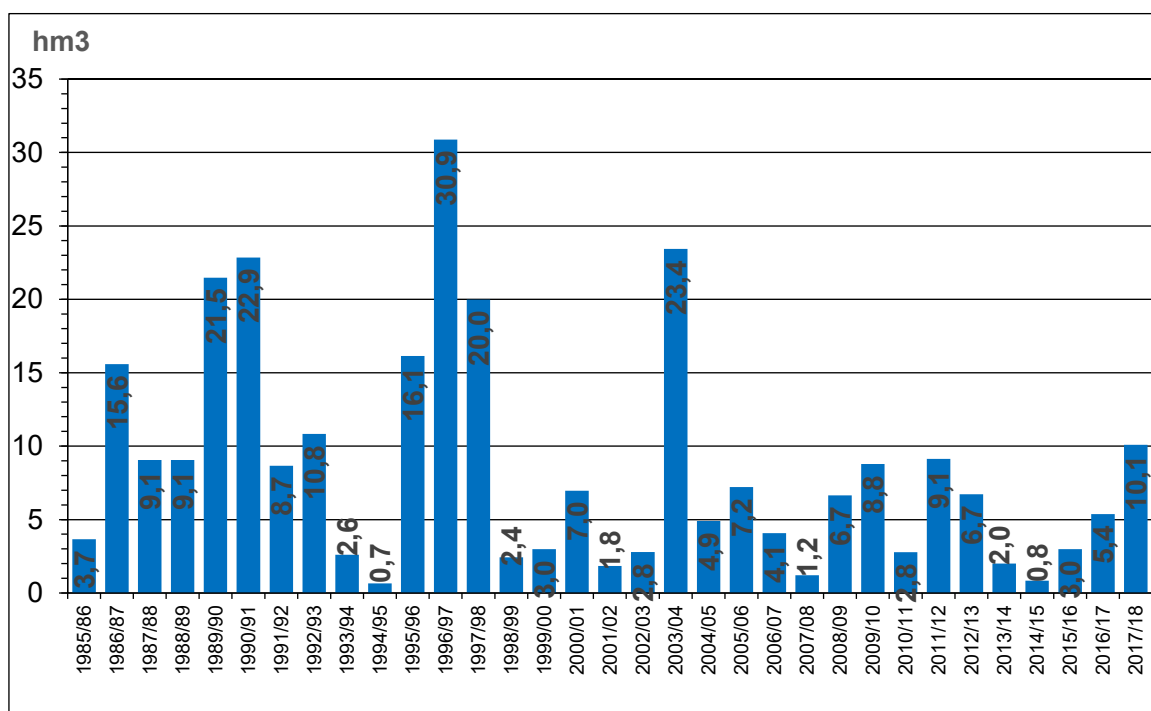


Figura 5.7. Aportaciones totales estimadas del arroyo de La Madre a la entrada del acuífero aluvial.

Explotaciones

La asignación de extracciones en el modelo se han asignado mensualmente en función de las estimaciones realizadas en el aluvial del polje de Zafarraya que se recogen en el apartado 5.8. Dada la enorme cantidad de sondeos y pozos existentes, no ha sido posible incluirlas puntualmente, por lo que se han distribuido por la superficie donde se localizan la mayor densidad de ellas (Figura 5.8 B).

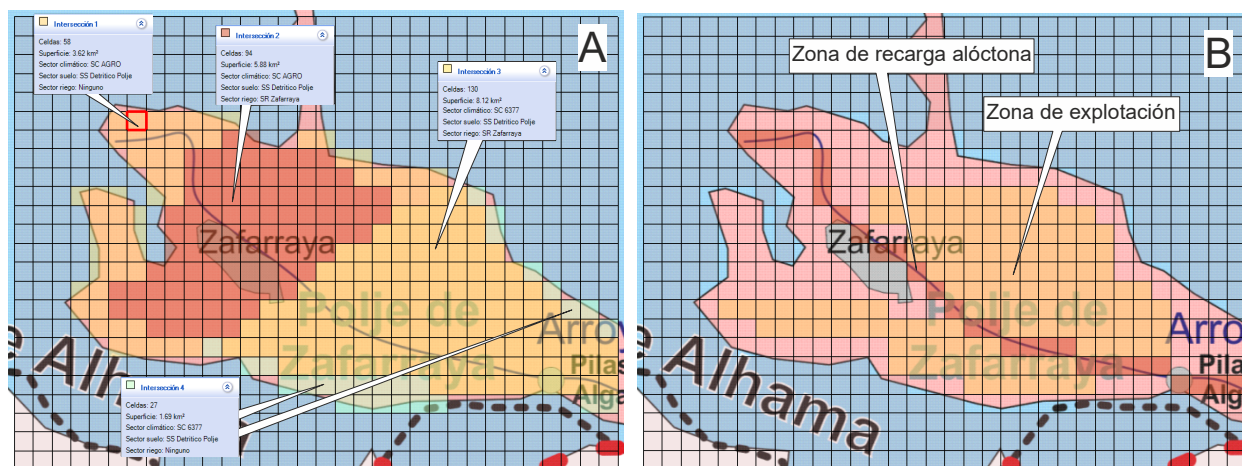


Figura 5.8. A) Distribución de la recarga (4 áreas diferentes). B) Localización de las celdas de inyección de recarga alóctona a lo largo del arroyo de La Madre y de explotación.

Condiciones de contorno

Todas las celdas exteriores al acuífero se han definido como de flujo nulo. Con el objeto de simular las transferencias subterráneas hacia el acuífero carbonatado, bien a través de los sumideros del polje bien lateralmente, se han definido dos áreas de drenaje, una localizada en el extremo occidental del polje a la cota de estos sumideros, 885 m s.n.m. y otras en el borde N del aluvial a cotas algo superiores, de E a O entre 895 y 895 m s.n.m. (Figura 5.9). Aunque estas cotas de drenaje hacia el acuífero carbonatado no se conocen con precisión, en el modelo se han asignado en función de la calibración alcanzada en los niveles de los piezómetros situados en este borde.

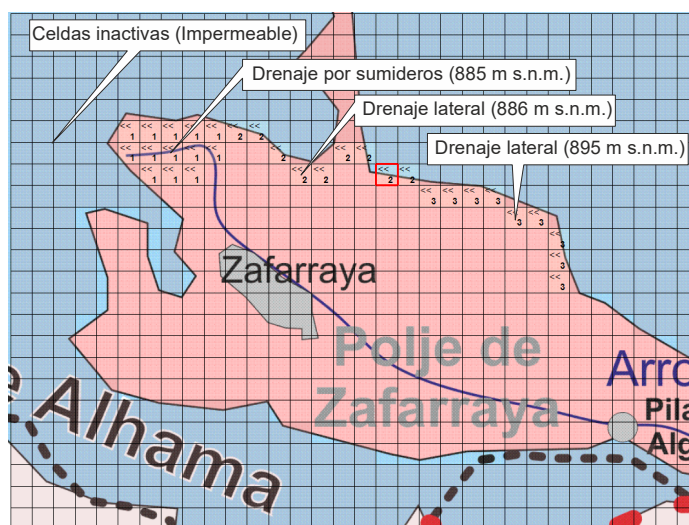


Figura 5.9. Condiciones en los límites del modelo de flujo.

Geometría

Tanto la profundidad como el espesor del aluvial varían mucho en el dominio simulado. No obstante, para los objetivos perseguidos en este trabajo se ha simplificado la geometría a una sola capa limitada por la superficie topográfica como techo de la formación y un espesor constante de 100. Las diferencias de espesor entre los sectores se han podido simular mediante diferentes coeficientes de almacenamiento y permeabilidad. La topografía se ha importado del modelo digital del terreno de 200 m referido a ETRS89 tomado del IGN.

Parámetros hidráulicos

La asignación espacial de los parámetros hidráulicos se ha realizado sobre la base del conocimiento hidrogeológico y se han modificados en función del ajuste alcanzado entre los niveles medidos y simulados y la coherencia del funcionamiento hidráulico simulado con el de estudios precedentes.

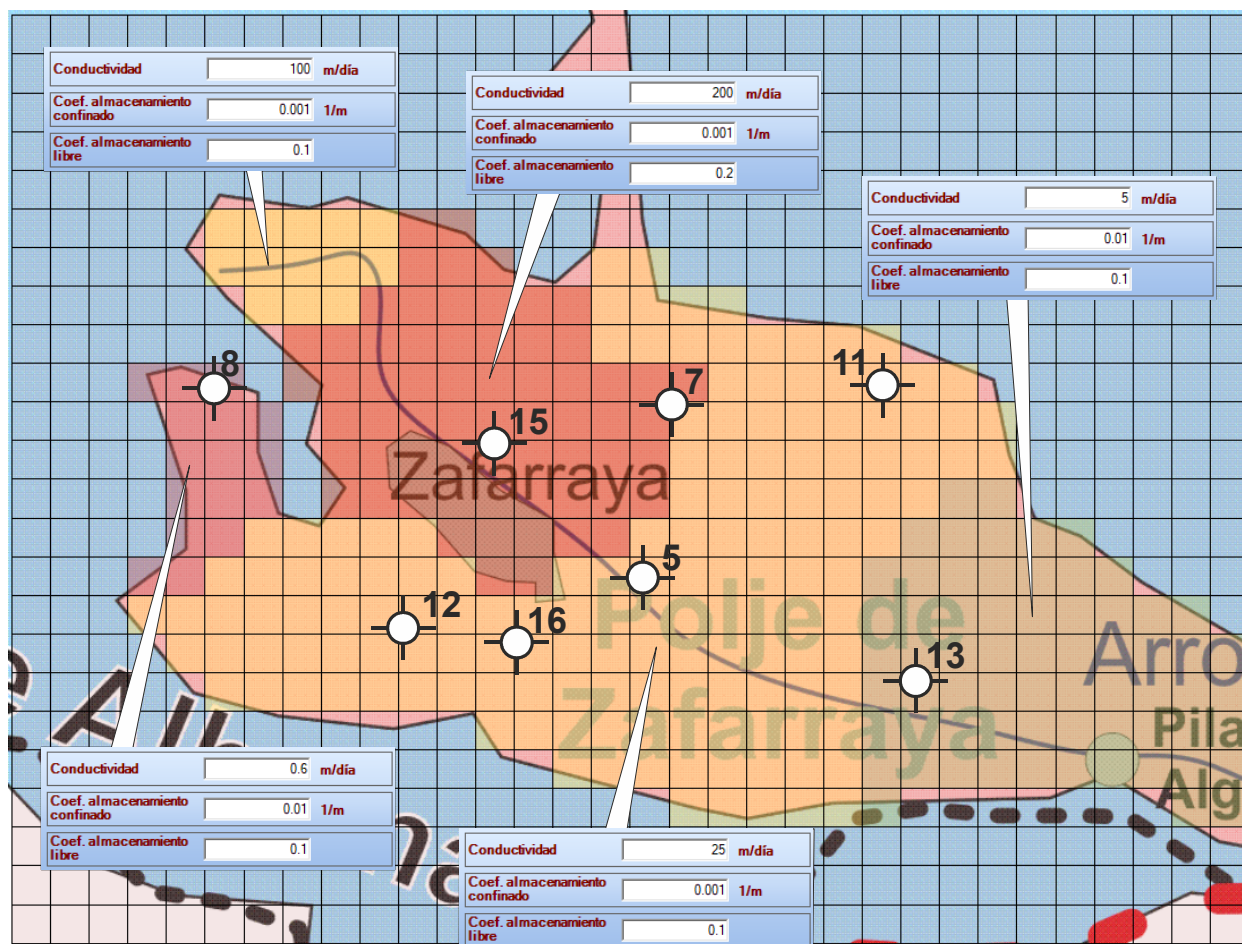


Figura 5.10. Parámetros hidráulicos tras el proceso de calibración y localización del piezómetro utilizado en el mismo.

5.2.2. Calibración

La calibración se ha realizado en régimen transitorio influenciado. Se parte de los niveles iniciales obtenidos en régimen permanente, considerando como entradas la media de la recarga obtenida en el periodo entre 1985/86-2017/18. A lo largo del proceso de calibración en régimen transitorio se han modificado los valores de la reserva de agua en el suelo y el umbral de escorrentía. Así mismo, se han modificado los parámetros hidráulicos hasta alcanzar un funcionamiento aceptable. Para ello, se ha utilizado como criterio subjetivo la coherencia del funcionamiento hidrológico con el conocimiento del acuífero y, como criterios objetivos, el ajuste piezométrico de varios sondeos representativos del acuífero aluvial. El ajuste finalmente alcanzado se representa en la figura 5.11.

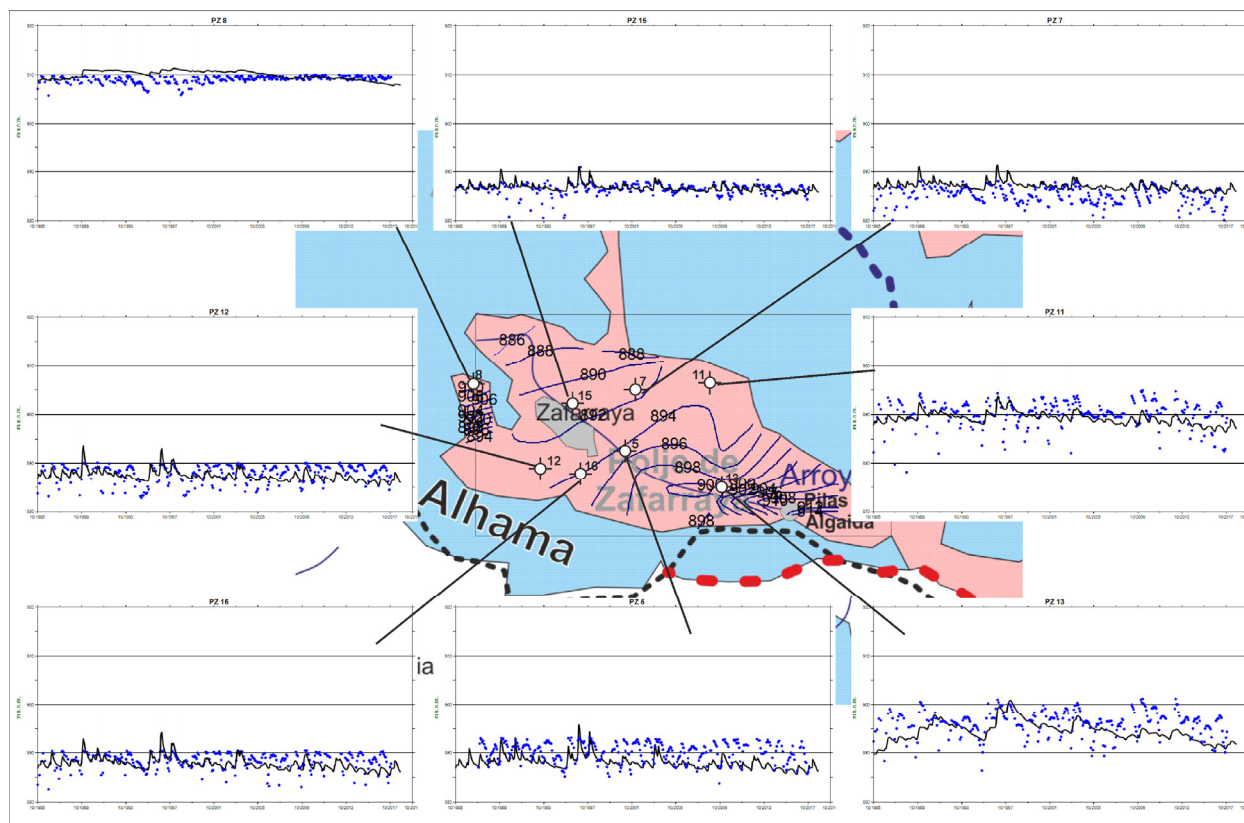


Figura 5.11. Evolución piezométrica e hidrométrica medida y simulada. Se representa sobre el plano de isopiezas de enero de 1997 en el que hubo unas fuertes precipitaciones.

La recarga estimada en el acuífero aluvial del polje de Zafarraya se sintetiza en los datos de la tabla 5.8. Hay que indicar que toda la recarga corresponde a la DHCMA. Aunque en principio la recarga debida a la precipitación puede parecer muy elevada (53%) hay que tener en cuenta que, al ser una cuenca endorréica, no existiría escorrentía superficial por lo que toda la lluvia útil se incorporaría al acuífero detrítico, no obstante, en episodios muy lluviosos pasaría casi directamente hacia el acuífero carbonatado a través de los sumideros o lateralmente, circunstancia que ya se contempla en el diseño del modelo cuando se sobrepasa un determinado nivel piezométrico.

Tabla 5.8. Recarga en el acuífero aluvial del polje de Zafarraya calculada con RENATA para la DHCMA (periodo 1985/86-2017/18).

Precipitación	Recarga lluvia directa (hm ³ /a)		Arroyo de la Madre (hm ³ /a)	Retorno de riego (hm ³ /a)	Total recarga (hm ³ /a)
	Infiltración lluvia (hm ³ /a)	Tasa de Recarga			
16,70	8,86	53,1 %	8,63	0,68	18,17

5.2.3. Balances y funcionamiento

Posteriormente a la calibración se ha realizado la simulación en régimen permanente y no influenciado. Los resultados tanto en régimen no influenciado como en régimen influenciado se recogen en las tablas 5.9 y 5.10, respectivamente. Evidentemente, en régimen no influenciado, todas las entradas procedentes de la infiltración directa de la lluvia y de la recarga del arroyo de La Madre, saldrían de acuífero aluvial para recargar el carbonatado de Sierra Gorda. En régimen influenciado, además del retorno de riego, entra como término de salida la explotación, aunque en promedio puede parecer escasa, 2,49 hm³/a, esta ha ido aumentando progresivamente hasta alcanzar en los últimos años más de 5 hm³/a. este aumento se puede constatar en la figura 5.12 que representa la evolución anual de los términos del balance. Además, hay que tener en cuenta que la explotación contemplada corresponde exclusivamente a los sondeos que capta el acuífero aluvial.

Tabla 5.9. Balance hídrico en régimen NO INFLUENCIADO en el acuífero aluvial del polje de Zafarraya. Valores medios para el periodo 1985/86-2017/18 en hm³/a.

	Concepto	Valores hm ³ /a
ETRADAS	Infiltración lluvia directa	8,86
	Arroyo de la Madre	8,63
	Total entradas	17,49
SALIDAS	Carbonatos de Sierra Gorda	17,49
	Total salidas	17,49

Tabla 5.10. Balance hídrico en régimen INFLUENCIADO en el acuífero aluvial del polje de Zafarraya. Valores medios para el periodo 1985/86-2017/18 en hm³/a.

	Concepto	Valores hm ³ /a
ENTRADAS	Infiltración lluvia directa	8,86
	Arroyo de la Madre	8,63
	Retorno de riego	0,68⁽¹⁾
	Total entradas	18,17
SALIDAS	Explotaciones	2,49
	Carbonatos de Sierra Gorda	15,19
	Variación almacenamiento	0,49
	Total salidas	18,17

(1) Corresponde al retorno de las superficies cultivadas regadas con agua procedente de diversas fuentes: subterráneas del detrítico de los carbonatos o superficiales.

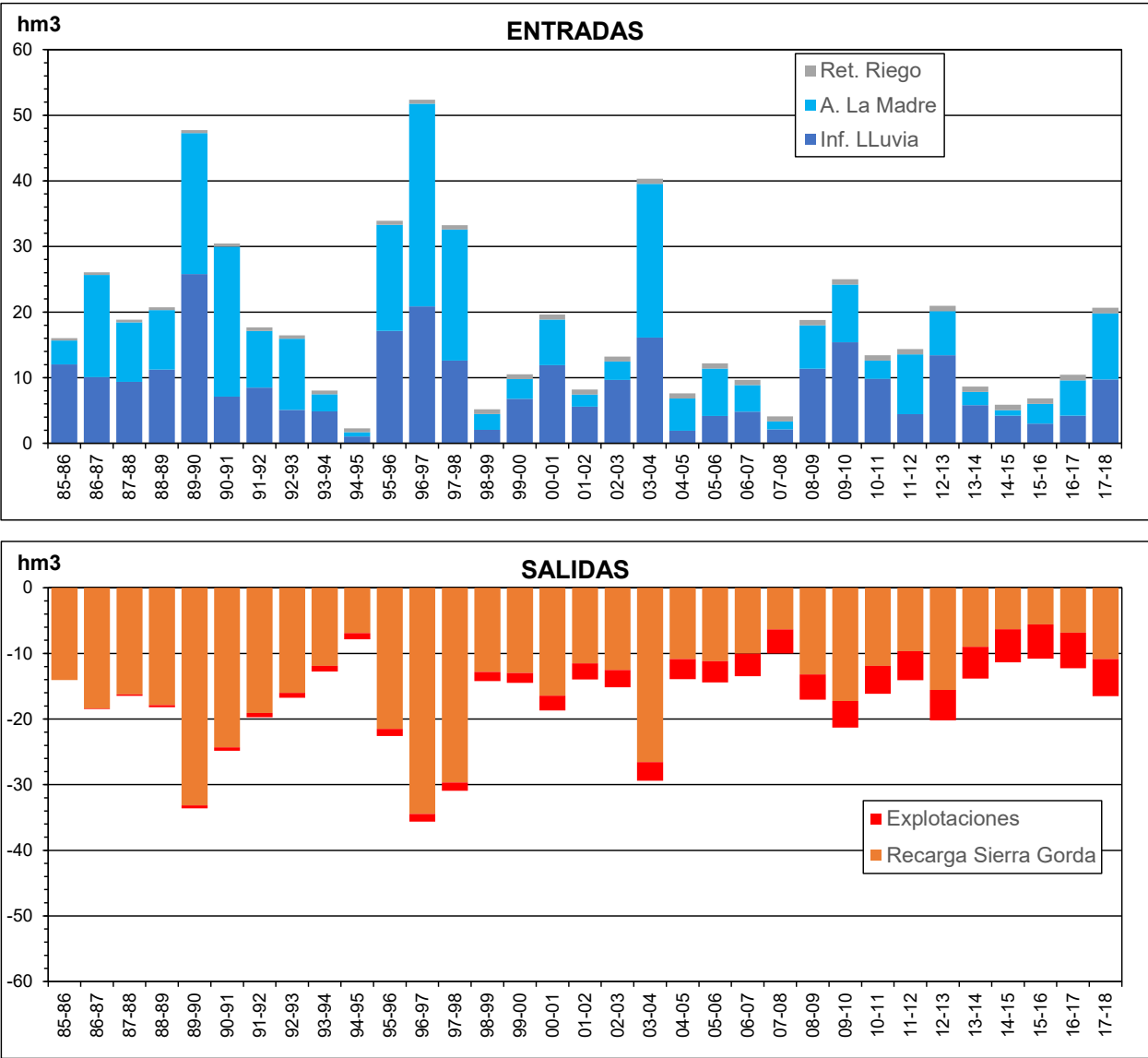


Figura 5.12. Valores anuales de los términos del balance hídrico en régimen influenciado.

5.3. MASCH Sierra Gorda- Zafarraya, Sierra Gibalto y Fuente Camacho

Para estimar la recarga en el conjunto de MASCH objeto de este estudio, se ha empleado también el código RENATA. Como ya se ha indicado anteriormente, los resultados obtenidos el acuífero detrítico del polje de Zafarraya serán utilizados como datos de entrada en el modelo diseñado, especialmente los que se refieren a la recarga de los carbonatos de sierra Gorda desde el polje y desde la cabecera del arroyo de la Madre.

La metodología de cálculo aplicada es la misma que la descrita en el modelo utilizado en el polje de Zafarraya.

5.3.1 Diseño del modelo

Generación de la malla y periodo de cálculo

La malla definida en el conjunto de MASCH se ha establecido entre las coordenadas UTM X: 382000-416000 y UTM Y: 4084000-4120000 en la que queda enmarcada la superficie sujeta al proceso de cálculo y estimación de la recarga (Figura 5.13). La malla consta de 72 filas y 98 columnas, con celdas de tamaño 0,5x0,5 km. Las celdas activas ocupan una superficie total de 517 km², 148,75 km² corresponden a la DHCMA y 368,25 km² a la DHG.

La recarga se ha estimado a nivel diario en cada celda activa entre los años hidrológicos comprendidos entre 1985/86 y 2017/18.

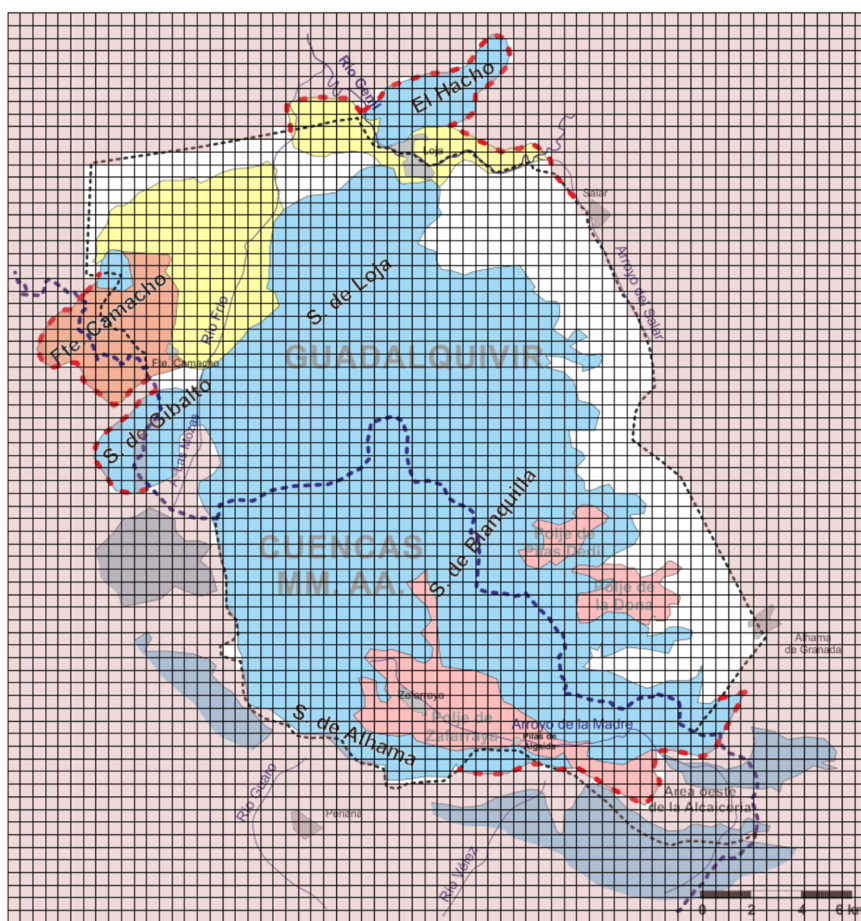


Figura 5.13. Mallado y límites del modelo para la determinación de la recarga y del funcionamiento hídrico.

Sectores climáticos

Los sectores climáticos (Tabla 5.11) se han establecido por el método de los polígonos de Thiessen sobre la base de 10 estaciones pluviométricas. A cada sector se le ha asignado, además de una serie pluviométrica, una termométrica para determinar la ETP según la relación que se recoge en la tabla 4.1.

Tabla 5.11. Características de los sectores climáticos.

Sector climático	Superficie (km ²)	Precipitación media (mm/a)	ETP media (mm/a)
5576	47,00	404,9	1290,0
5577	31,00	335,6	1290,0
5580	19,75	434,4	1235,2
5584	92,75	441,5	1235,2
6090	63,75	817,1	1208,3
6179	5,75	939,6	1054,7
6377	41,75	775,7	1117,7
6378	4,50	686,7	1290,0
AGRO	108,50	956,7	1117,7

Los sectores climáticos quedan caracterizados por su correspondiente estación pluviométrica y serie de ETP. Se han adaptado al mallado definido para poder aplicar el código RENATA (Figura 5.14).

Sectores de suelo

Los sectores de suelo se han definido a partir de la cartografía geológica simplificada del IGME, en la que se han diferenciado 4 clases de afloramientos de materiales permeables: carbonatos del Jurásico, detrítico (conglomerados-gravas-arcillas), triásico de Fuente Camacho y detrítico de los poljes (Figura 5.15). De este último no se ha

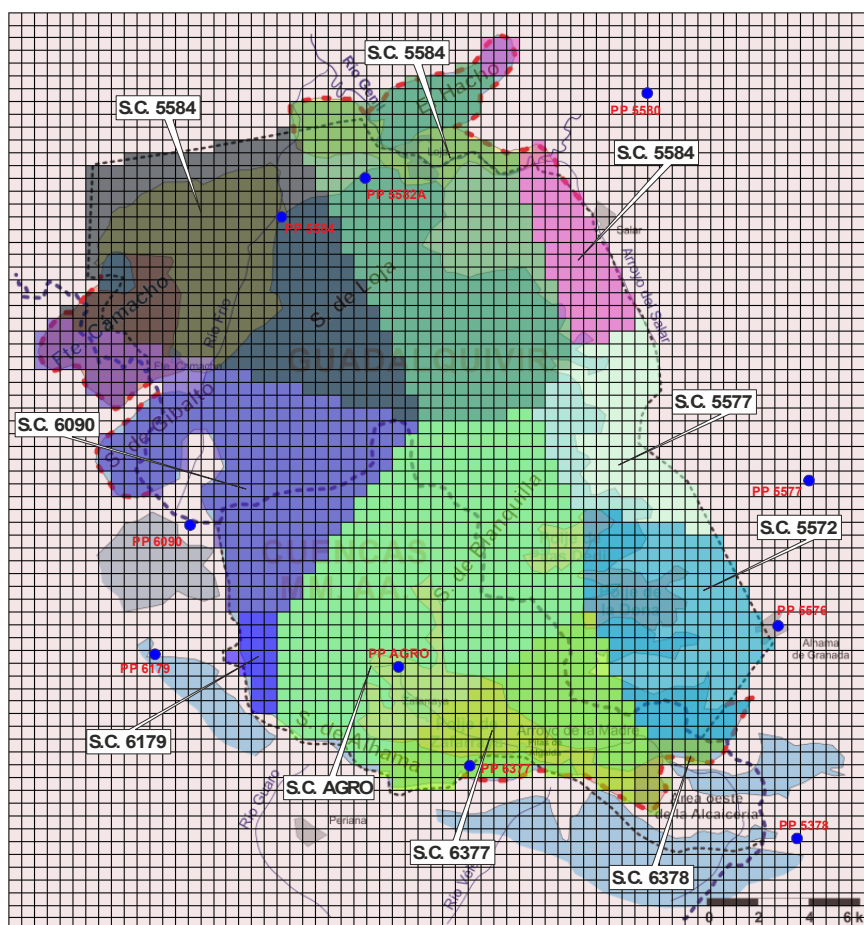


Figura 5.14. Sectores climáticos por polígonos de Thiessen ajustados al mallado aplicado en el código RENATA

incluido en el diseño gran parte del aluvial del polje de Zafarraya, porque su recarga ya se ha calculado en el modelo independiente específicamente para este acuífero detrítico.

Para asignar un valor inicial a los parámetros del suelo, además de criterios hidrogeológicos y de conocimiento experto de la zona, se han utilizado como referencia los obtenidos en las estimaciones que se realizaron en informes anteriores.

Para la determinación de la recarga con la aplicación RENATA los parámetros utilizados han sido modificados a lo largo del proceso de calibración en función de los resultados arrojados hasta alcanzar un ajuste aceptable entre las evoluciones piezométricas calculadas y las observadas. Los valores finalmente obtenidos se muestran en la tabla 5.12.

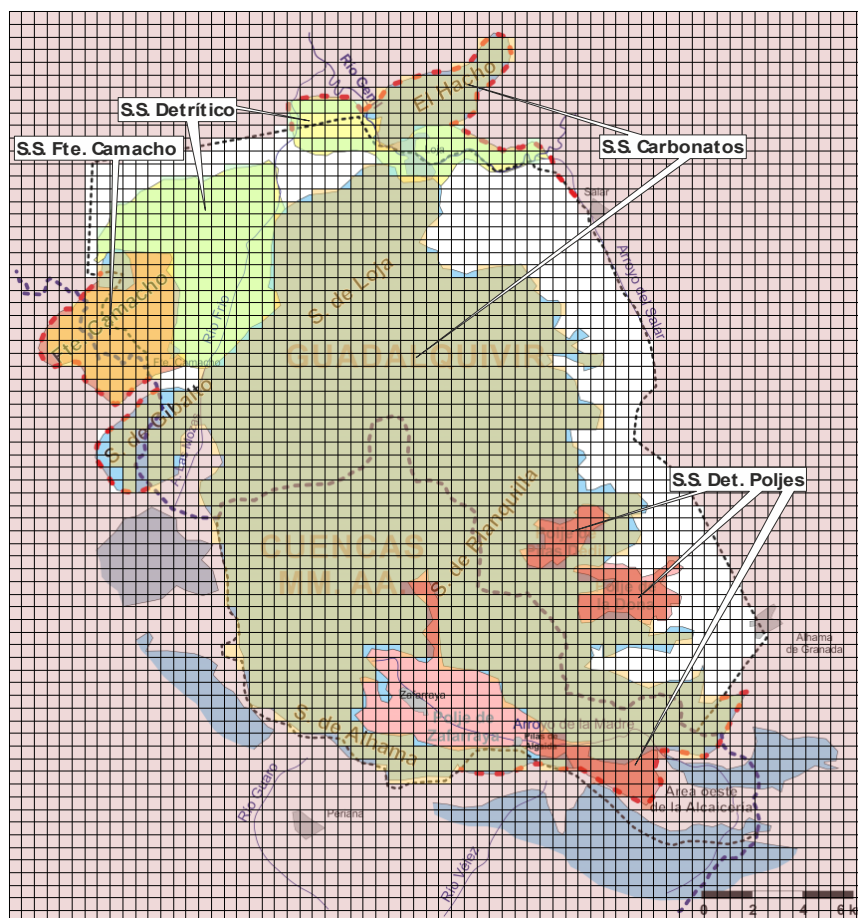


Figura 5.15. Sectores de suelo aplicados en el código RENATA

Tabla 5.12. Sectores de suelo: parámetros utilizados

Sector de suelo	Superficie (km ²)	Parámetros
Carbonatos	306,75	RU _{min} =25 mm RU _{max} =30 mm P ₀ =60 mm NC=46
Detrítico	46,00	RU _{min} =50 mm RU _{max} =75 mm P ₀ =20 mm NC=72
Detrítico poljes(*)	19,50	RU _{min} =40 mm RU _{max} =60 mm
Fte. Camacho	18,50	RU _{min} =250 mm RU _{max} =300 mm P ₀ =5 mm NC=91
Total afloramientos permeables	390,75	

RU_{min} y RU_{max} reserva útil utilizable por las plantas; P₀ umbral de escorrentía; NC número de curva.

*No se considera el detrítico previamente simulado individualmente en el polje de Zafarraya. Tampoco existe escorrentía superficial por ser endorreicas

Sectores de riego

Área	Superficie (km ²)	Sector climático	Sector suelo	Sector riego
1	2,25	5580	Carbonatico	NO
2	60,50	5582A	Carbonatico	NO
3	10,25	5582A	Detritico	NO
4	0,75	5580	Detritico	NO
5	34,50	5584	Detritico	NO
6	33,50	5584	Carbonatico	NO
7	9,50	5584	Fte. Camacho	NO
8	9,00	6090	Fte. Camacho	NO
9	9,75	5577	Carbonatico	NO
10	0,50	6090	Detritico	NO
11	57,00	6090	Carbonatico	NO
12	93,25	AGRO	Carbonatico	NO
13	6,50	5576	Det.Polje	SI
14	15,25	5576	Carbonatico	NO
15	2,25	AGRO	Det.Polje	NO
16	3,00	AGRO	Det.Polje	NO
17	1,25	5576	Det.Polje	NO
18	5,50	6179	Carbonatico	NO
19	27,75	6377	Carbonatico	NO
20	0,25	6377	Det.Polje	SI
21	3,75	6377	Det.Polje	NO
22	2,00	6378	Carbonatico	NO
23	2,50	6378	Det.Polje	NO
Total	390,75			

Geometría

Tanto las profundidades como los espesores de las formaciones hidrogeológicas presentes varían mucho en el dominio simulado. No obstante, para los objetivos perseguidos en este trabajo se ha simplificado la geometría a una sola capa limitada por la superficie topográfica y la cota de 0 m s.n.m. Las diferencias de espesor entre los sectores se han podido simular mediante diferentes coeficientes de almacenamiento y permeabilidades. La topografía se ha importado del modelo digital del terreno de 200 m referido a ETRS89 tomado del IGN.

Parámetros hidráulicos

La asignación espacial de los parámetros hidráulicos se ha realizado sobre la base de la coherencia de los resultados con el conocimiento hidrogeológico y el mejor ajuste alcanzado entre los niveles piezométricos y aforos disponibles con los obtenidos en la simulación. Se ha incluido una compartimentación del acuífero de Sierra Gibalto debido a un cabalgamiento geológico EO que coincide aproximadamente con la divisoria hidrológica entre las DH, no obstante esta compartimentación no debe estar totalmente cerrada pudiendo existir cierta comunicación hídrica en su extremo norte como indican los manantiales tipo “trop plein” existentes.

Condiciones de contorno

Además de los límites impermeables del dominio, como límites de contorno se han asignado en el modelo los de tipo “dren” que corresponden a las principales surgencias, identificadas en la tabla 3.1, y las de tipo “río” que pretende simular la interconexión del río Genil cuando atraviesa el acuífero de Sierra Gorda por su extremo N y la del arroyo de Las Mozas, cuenca alta el río Frío, que a su paso por las calizas jurásicas puede drenar la MASCH de Sierra Gibalto y Sierra Gorda. Como nivel constante se ha asignado el límite oeste de Sierra Gibalto con el objetivo de simular las descargas de este macizo hacia el detrítico de La Lana con el que conecta hidráulicamente.

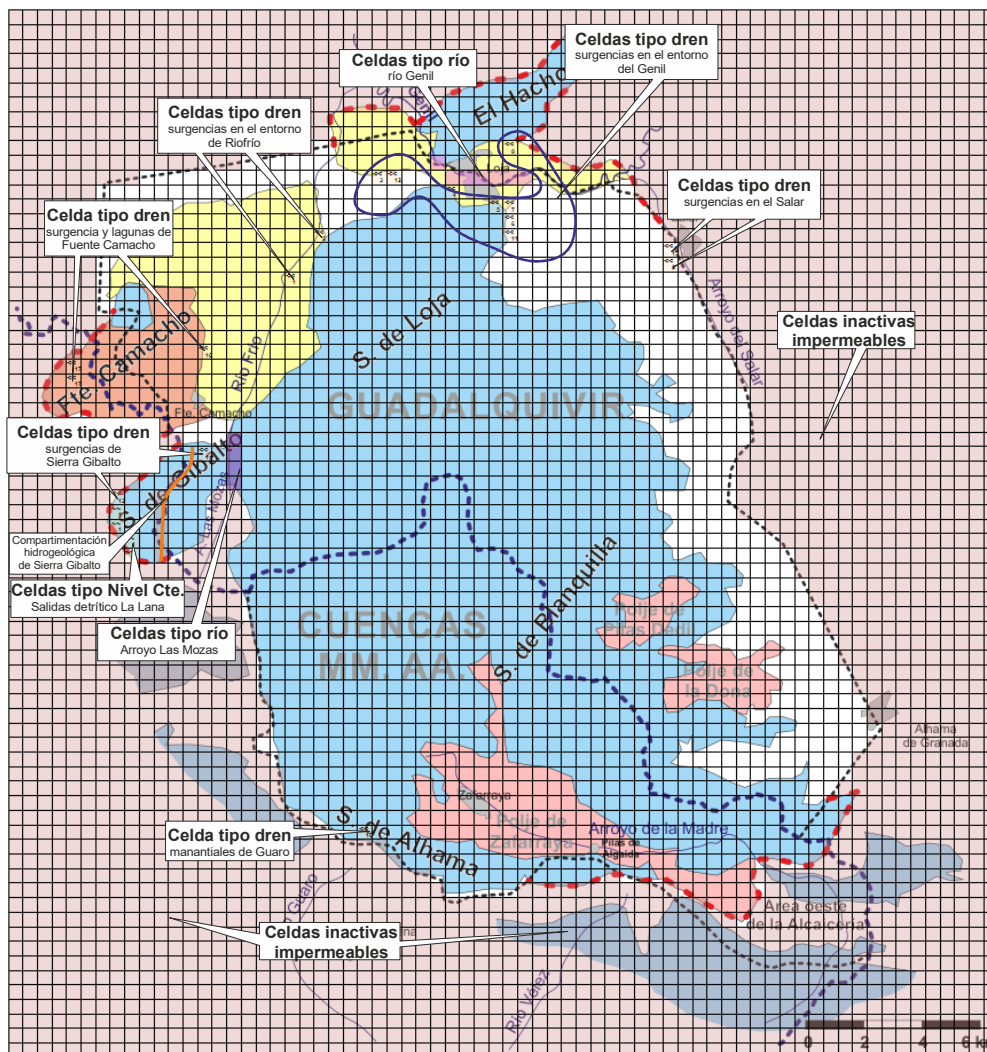


Figura 5.18. Condiciones en los límites del modelo de flujo.

Recarga alóctona

Las dos recargas externas al acuífero carbonatado de Sierra Gorda contempladas en el modelo están ligadas al polje de Zafarraya, como ya se ha indicado en el apartado 3.6, sobre el funcionamiento del arroyo de La Madre. Una de ellas se produce en los carbonatos antes de que el arroyo entre en el acuífero aluvial del polje. La otra se produce desde el acuífero aluvial, bien por los sumideros o bien lateralmente, cuando el nivel piezométrico alcanza las calizas. Ambas series de recarga han sido estimadas mensualmente en la simulación ajustada con la aplicación RENATA en el acuífero aluvial del polje de Zafarraya (apartado 5.2). En la figura 5.19 se recoge la representación gráfica de estas dos recargas en régimen no influenciado e influenciado. Si bien la recarga del acuífero carbonatado será igual antes del aluvial en los dos regímenes, no así la que se produce en el aluvial, que se reducirá con las explotaciones, sobre todo en los últimos años cuando

son mayores. La aportación media en el periodo analizado es en régimen no influenciado de 21,91 hm^3/a (4,42 hm^3/a y 17,49 hm^3/a , antes y en el aluvial), en régimen no influenciado es de 19,61

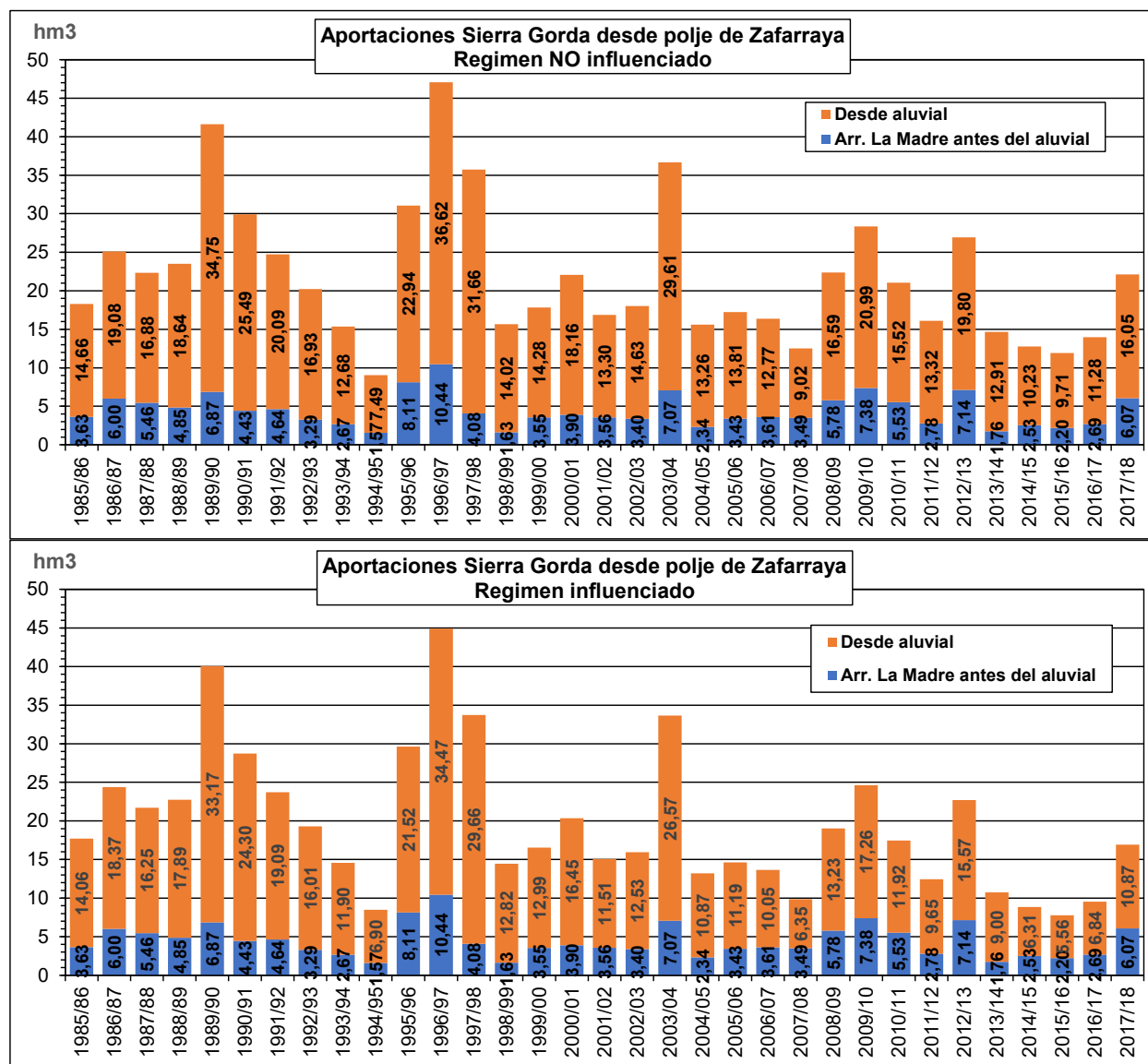


Figura 5.19. Aportaciones estimadas hacia los carbonatos de Sierra Gorda desde el sector del Polje de Zafarraya y arroyo de La Madre.

hm^3/a (4,42 hm^3/a y 15,19 hm^3/a , antes y en el aluvial). En los últimos diez años (2008/09-2017/18) la aportación en el aluvial se reduciría de 14,64 hm^3/a , en no influenciado, a 10,62 hm^3/a , en influenciado.

Explotaciones

Como ya se ha indicado en el análisis de explotaciones realizado en el apartado 3.8, las principales explotaciones subterráneas ubicadas en el área de estudio se pueden dividir en tres grupos: las que explotan el aluvial del polje de Zafarraya, las que captan los carbonatos de Sierra Gorda también en el polje de Zafarraya y el resto localizadas fundamentalmente en los poljes de La Dona y Pilas-Dedil. El resto de bombeos o bien se localizan en los bordes de Sierra Gorda o bien cerca de manantiales para su regulación, en cualquiera de estos casos, su repercusión en la recarga y funcionamiento las MASCH objeto de este estudio no es significativa. Los bombeos del aluvial de Zafarraya ya fueron contempladas en el modelo realizado ex profeso, por lo que en este sólo se van a considerar las extracciones de los carbonatos de Sierra Gorda en los poljes de Zafarraya, La Dona

y Pilas-Dedil (Figura 5.21). En el periodo analizado, 1985/86 a 2017/18, la explotación media incluida en este modelo ha sido de 6,02 hm³/a (1,70 y 4,32 hm³/a en el polje de Zafarraya y en La Dona y Pilas-Dedil, respectivamente) y en los últimos 10 años, 2008/09 a 2017/18, de 7,35 hm³/a (2,06 y 5,29 hm³/a en el polje de Zafarraya y en La Dona y Pilas-Dedil, respectivamente). En la figura 5.20 se representan las explotaciones consideradas en el modelo.

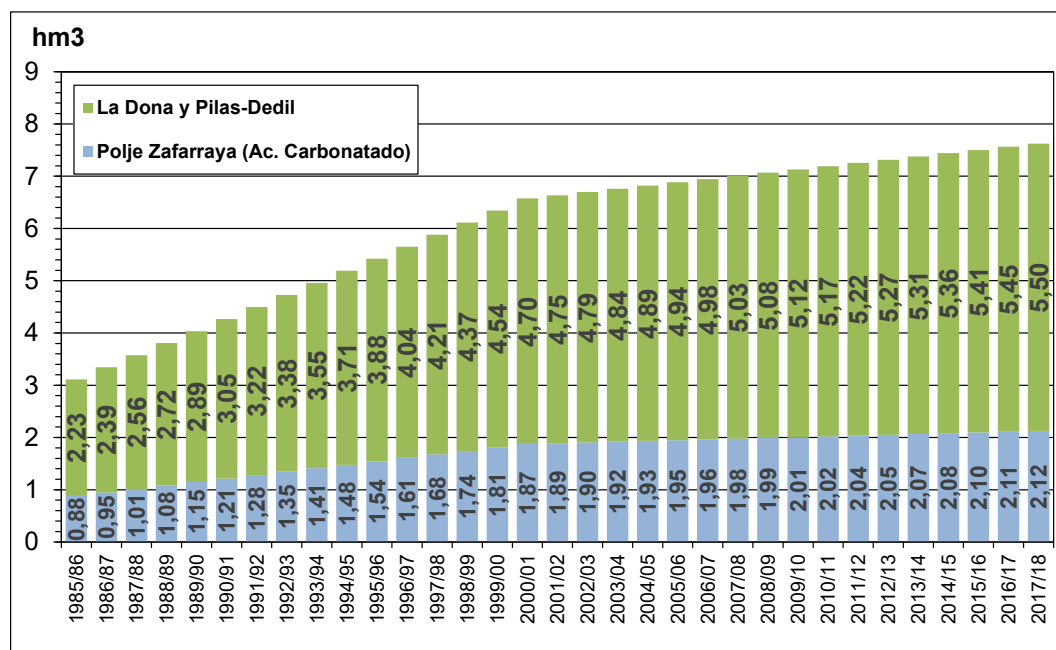


Figura 5.20. Distribución de las explotaciones asignadas en el modelo de Sierra Gorda

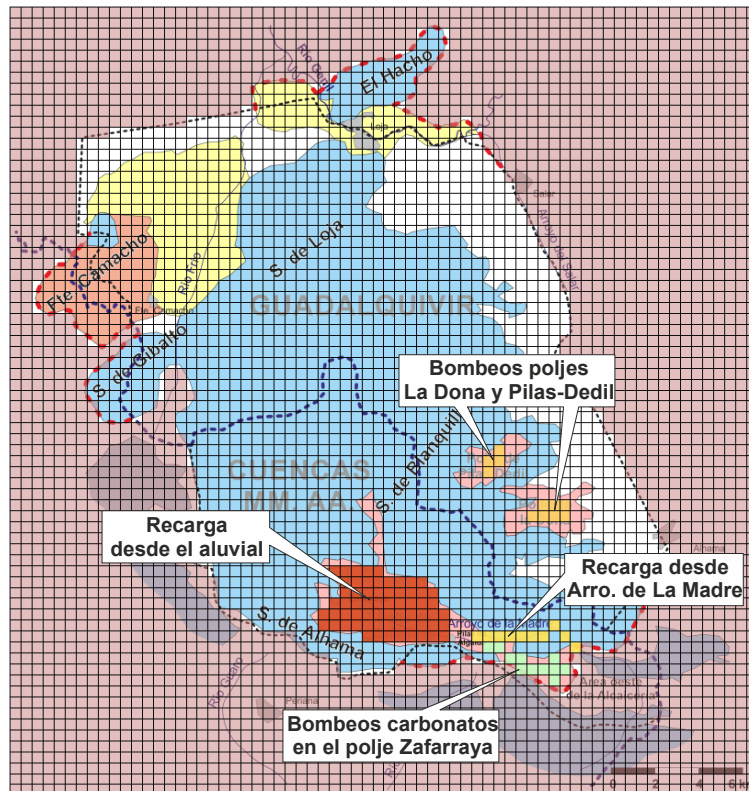


Figura 5.21. Localización y distribución de las explotaciones y de la recarga alóctona.

5.3.2. Calibración

La calibración se ha realizado en régimen transitorio influenciado, partiendo de los niveles iniciales obtenidos en régimen permanente no influenciado, considerando como entradas la media de la recarga obtenida en el periodo entre 1985/86-2017/18. A lo largo del proceso de calibración en régimen transitorio se han modificado los valores de la reserva de agua en el suelo y el umbral de escorrentía. Así mismo, se han modificado los parámetros hidráulicos hasta alcanzar un funcionamiento aceptable. Para ello, se ha utilizado como criterio la coherencia del funcionamiento hidrológico de las formaciones hidrogeológicas implicadas. Especialmente interesante para la distribución de los parámetros hidráulicos ha sido el esquema de funcionamiento propuesto por González-Ramón et al. (2017) que se recoge en la figura 3.5. Sobre esta base se ha realizado una compartimentación del dominio simulado mediante límites de menor conductividad hidráulica. Como criterio objetivo, el ajuste piezométrico en varios sondeos representativos incluidos en el dominio estudiado y las salidas por los principales manantiales. La localización de estos puntos con el valor obtenido para los parámetros hidráulicos se muestra en la figura 5.22, y el ajuste finalmente alcanzado en la figura 5.23 y 5.24.

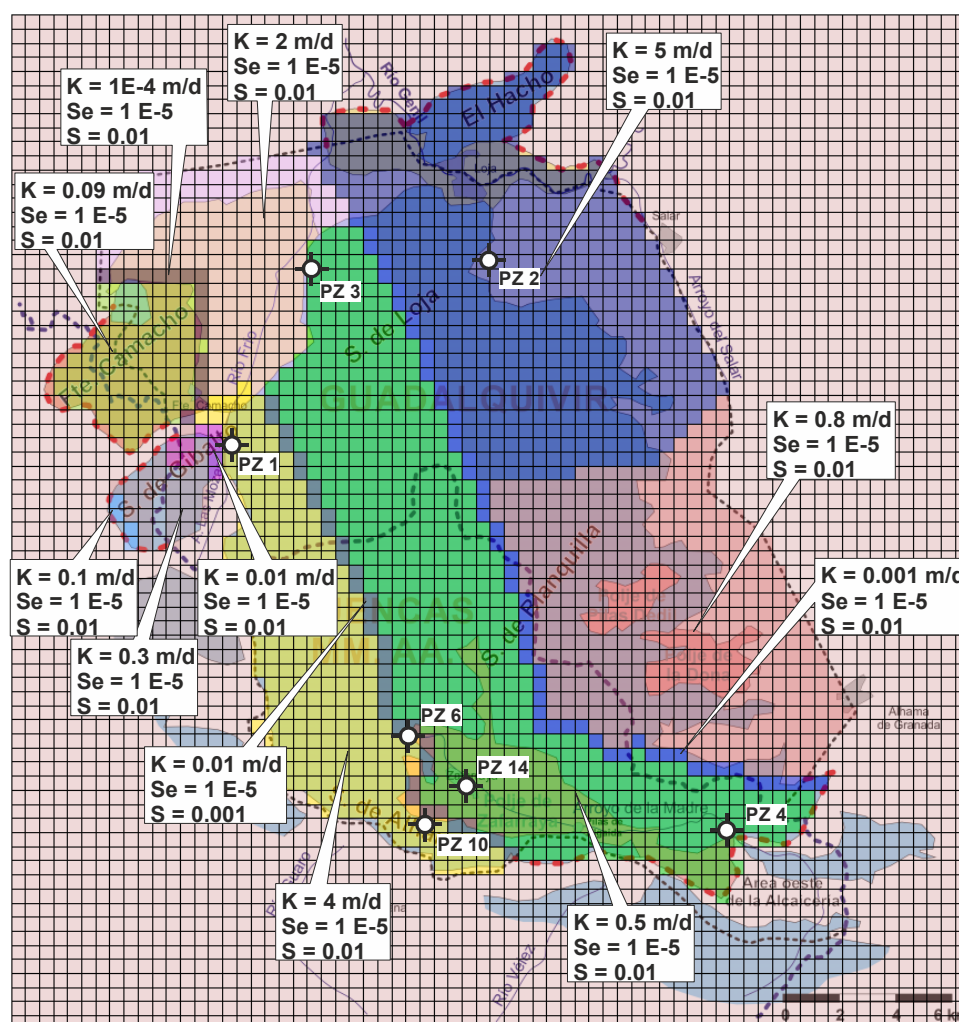
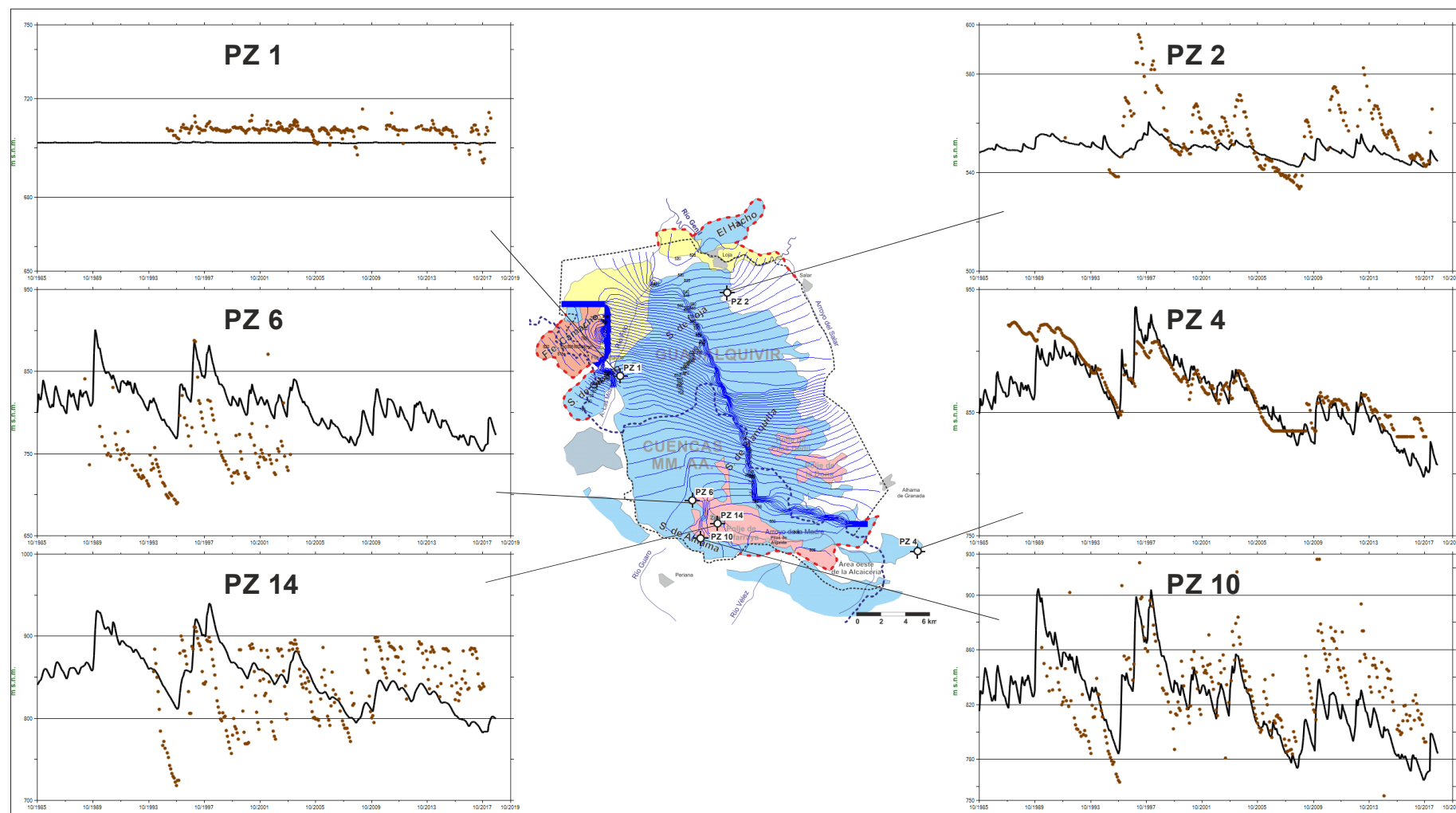
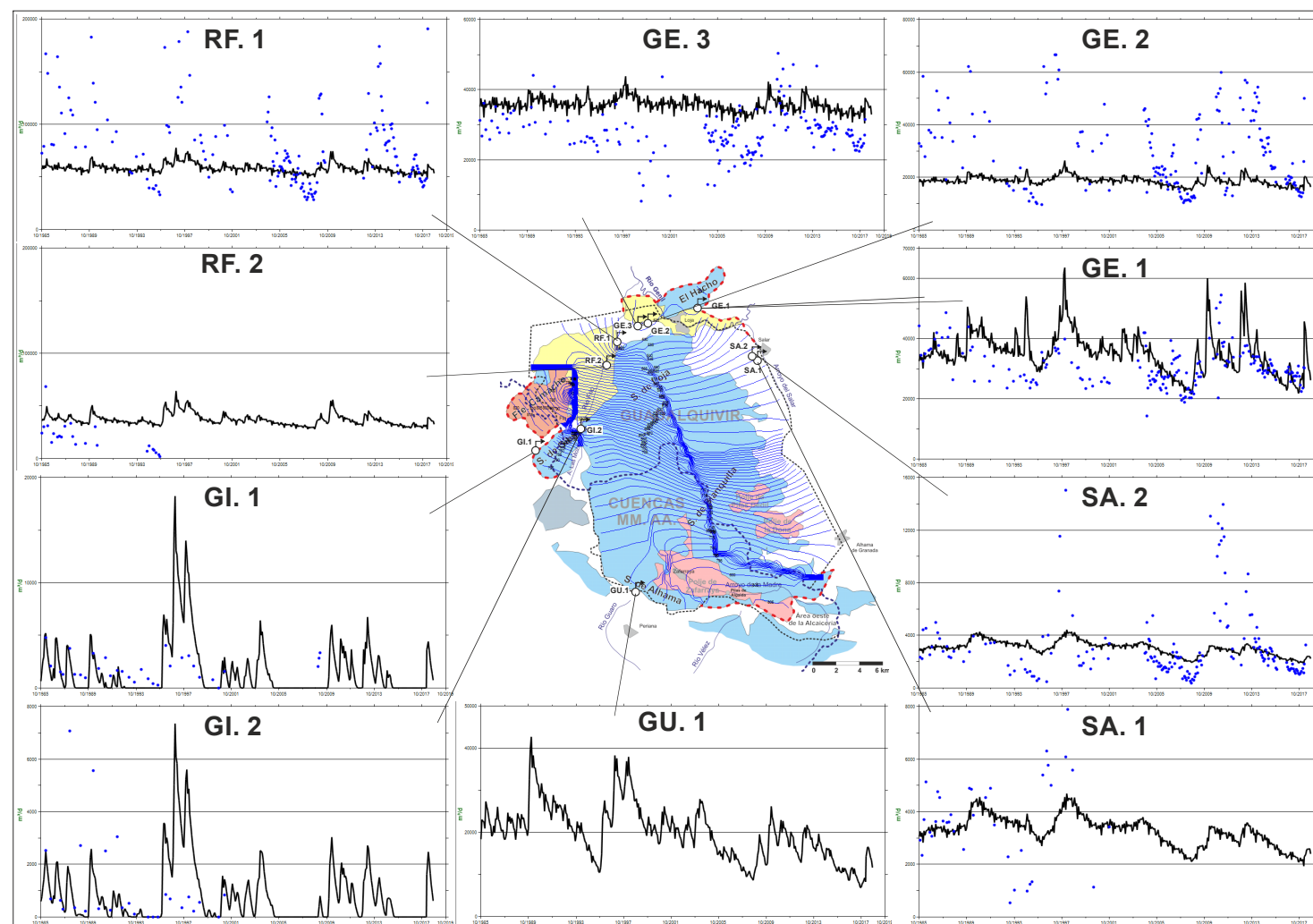


Figura 5.22. Parámetros hidráulicos de las principales zonas tras el proceso de calibración y piezómetros representativos utilizados en el mismo.





En la figura 5.24 no se recogen todos los hidrogramas disponibles, sino aquellos que consideramos representativos de la simulación realizada, como las descargas de Sierra Gibalto (GI.1 y GI.2), las salidas del Salar (SA.1 y SA.2), las de Guaro (GU.1) o las del Frontil (GE.1). En muchos casos el ajuste entre la simulación y las medidas no es bueno, sobre todo en las surgencias localizadas al N de Sierra Gorda, ya que suelen estar reguladas por sondeos o bien resultaría imposible su ajuste individual en un modelo simplificado, por lo que se ha ido a obtener en esta zona unos resultados globales junto con las salidas hacia el río Genil coherentes con su funcionamiento hidrogeológico conocido. No obstante, consideramos que los resultados son bastante aceptables para los objetivos perseguidos en este estudio.

5.3.3. Resultados

Los resultados para el régimen transitorio se sintetizan en las tablas 5.14, 5.15 y 5.16. En la primera se proporcionan los valores de la recarga por precipitación y por retornos de riego en las 23 áreas de parámetros homogéneos diferenciadas. La distribución espacial de estas variables se muestra en la figura 5.25 junto con algunas salidas numéricas. La segunda muestra la precipitación media, la recarga media por precipitación y la tasa de recarga en los sectores de suelo considerados. En la tercera tabla se presentan los resultados globales de la recarga en las MASCH y por demarcaciones hidrográficas. En esta última tabla se han incorporado también los resultados obtenidos en el anterior modelo diseñado y ajustado específicamente en el polje de Zafarraya.

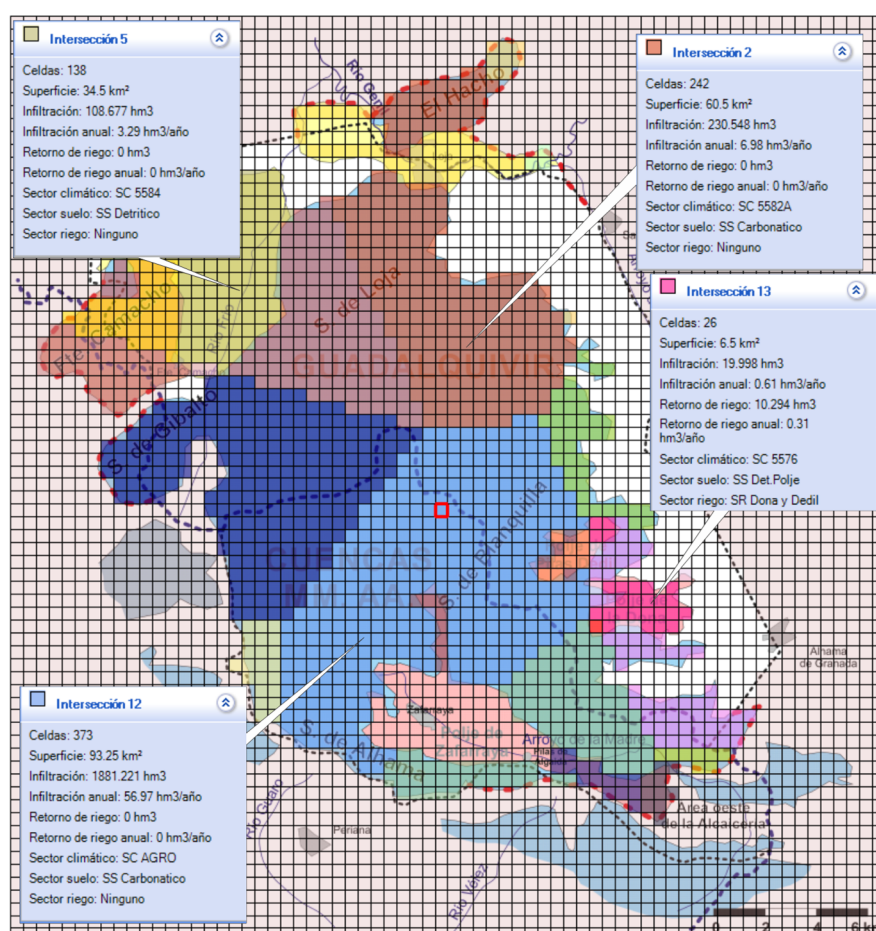


Figura 5.25. Distribución de la recarga según el código RENATA junto con los datos y resultados en cuatro áreas diferentes.

Tabla 5.14. Recarga por precipitación y retornos de riego en las 23 áreas diferenciadas (1985/86-2017/18)

Área	Superficie (km ²)	Sector climático	Sector suelo	Sector riego	Recarga precipitación (hm ³ /a)	Recarga retornos de riego (hm ³ /a)	Recarga Total (hm ³ /a)
1	2,25	5580	Carb. del Jurásico	NO	0,308	0,000	0,308
2	60,50	5582A	Carb. del Jurásico	NO	6,986	0,000	6,986
3	10,25	5582A	Pliocuaternario	NO	0,722	0,000	0,722
4	0,75	5580	Pliocuaternario	NO	0,069	0,000	0,069
5	34,50	5584	Pliocuaternario	NO	3,293	0,000	3,293
6	33,50	5584	Carb. del Jurásico	NO	4,949	0,000	4,949
7	9,50	5584	T. F. Camacho	NO	0,110	0,000	0,110
8	9,00	6090	T. F. Camacho	NO	1,134	0,000	1,134
9	9,75	5577	Carb. del Jurásico	NO	0,744	0,000	0,744
10	0,50	6090	Pliocuaternario	NO	0,176	0,000	0,176
11	57,00	6090	Carb. del Jurásico	NO	26,425	0,000	26,425
12	93,25	AGRO	Carb. del Jurásico	NO	57,007	0,000	57,007
13	6,50	5576	Detrítico poljes	SI	0,606	0,312	0,918
14	15,25	5576	Carb. del Jurásico	NO	1,921	0,000	1,921
15	2,25	AGRO	Detrítico poljes	SI	1,249	0,108	1,357
16	3,00	AGRO	Detrítico poljes	NO	1,665	0,000	1,665
17	1,25	5576	Detrítico poljes	NO	0,117	0,000	0,117
18	5,50	6179	Carb. del Jurásico	NO	3,240	0,000	3,240
19	27,75	6377	Carb. del Jurásico	NO	11,797	0,000	11,797
20	0,25	6377	Detrítico poljes	SI	0,092	0,012	0,104
21	3,75	6377	Detrítico poljes	NO	1,377	0,000	1,377
22	2,00	6378	Carb. del Jurásico	NO	0,739	0,000	0,739
23	2,50	6378	Detrítico poljes	NO	0,794	0,000	0,794
Total	390,75				125,520	0,432	125,952

Tabla 5.15. Precipitación media, recarga media por precipitación y tasa de recarga en los sectores de suelo considerados en el modelo (periodo 1985/86-2017/18)

Sector de suelo	Superficie (km ²)	Parámetros	Precipitación (P) media (hm ³ /a)	Recarga media (R) (hm ³ /a)	Tasa de recarga
Carbonatos del Jurásico	306,75	RU _{min} =25 mm RU _{max} =30 mm P ₀ =60 mm NC=46	215,40	114,12	53,0%
Detrítico poljes	19,50	RU _{min} =40 mm RU _{max} =60 mm	29,68 ⁽¹⁾	14,76 ⁽²⁾	49,7%
Trías Fte. Camacho	18,50	RU _{min} =250 mm RU _{max} =300 mm P ₀ =5 mm NC=91	11,55	1,24	10,8%
Pliocuaternario	46,00	RU _{min} =50 mm RU _{max} =75 mm P ₀ =20 mm NC=72	20,43	4,26	20,9%
Total afloramientos permeables	390,75		260,36	125,52	48,5%

(1) Se añaden 16,70 hm³/a de precipitación en el polje de Zafarraya(2) Se añaden 8,86 hm³/a de infiltración por lluvia en el polje de Zafarraya.

Tabla 5.16. Recarga de las MASCH y por demarcaciones hidrográficas (periodo 1985/86-2017/18).

Demarcación	MASCH	Infilt. (hm³/a)	Recarga alóctona (hm³/a)	Retorno de riego (hm³/a)	Rec. Total (hm³/a)	
DHG	Sierra Gorda-Zafarraya	55,62		0,43	56,05	
	Sierra Gibalto	2,09			2,09	
	Fuente Camacho	0,77			0,77	
	Total DHG	58,48	0,00	0,43	58,91	
DHCMA	Sierra Gorda- Zafarraya	Sierra Gorda ⁽¹⁾	64,99	4,42 ⁽³⁾	69,41	
		Polje Zafarraya ⁽²⁾	8,86	8,63 ⁽³⁾	0,68	18,17
		Total S. Gorda- Zafarraya	73,75	13,05	0,68	87,48
	Sierra Gibalto	1,51			1,51	
	Fuente Camacho	0,73			0,73	
	Total DHCMA	75,99	13,05	0,68	89,72	
TOTAL		134,47	13,05	1,11	148,63	

(1) Resultados obtenidos en Sierra Gorda en la DHCMA sin contar el polje de Zafarraya

(2) Resultados obtenidos en el modelo específico diseñado en el polje de Zafarraya

(3) Recarga procedente del arroyo de La Madre

6. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN NO INFLUENCIADO

El balance hídrico del dominio modelado en condiciones naturales, no influenciado, se ha determinado en régimen estacionario. En este tipo de régimen las entradas y las salidas de agua son equivalentes, por lo que la superficie piezométrica es estable y, en consecuencia, no hay variación en el almacenamiento.

El balance hídrico se expone en la tabla 6.1 de forma individual para cada MASCH. La recarga de agua en las tres MASCH contabilizan un total de 147,62 hm³/a: 142,52 hm³/a en Sierra Gorda-Zafarraya (13,05 hm³/a proceden de recarga alóctona del arroyo de La Madre), 3,60 hm³/a en Sierra Gibalto y 1,50 hm³/a en Fuente Camacho.

Tabla 6.1. Balance hídrico en régimen natural en las MASCH. Valores medios para el periodo 1985/86-2017/18 en hm³/a.

CONCEPTO		S. Gorda-Zafarraya	S. Gibalto	F. Camacho	TOTAL
Entradas	Recarga lluvia	129,47	3,60	1,50	134,57
	Recarga alóctona	13,05			13,05
	Total	142,52	3,60	1,50	147,62
Salidas	Manantiales	-126,49	-1,63	-1,00 ⁽¹⁾	-129,12
	Río Genil	-9,12			-9,12
	Ar. Las Mozas	-8,43			-8,43
	Detritico La Lana		-0,95		-0,95
	Total	-144,04	-2,58	-1,00	-147,62
Transferencias	S. Gorda-Zafarraya		-1,02	-0,50	-1,52
	S. Gibalto	1,02			1,02
	F. Camacho	0,50			0,50
	Total	1,52	-1,02	-0,50	0,00

(1) Drenaje hacia el manantial y las lagunas salinas

En la tabla 6.2 se recoge la distribución de la recarga por demarcaciones hidrográficas y por MASCH y en la tabla 6.3 todos los términos que intervienen en el balance. De la 147,6 hm³/a de recarga total en las tres MASCH, 58,5 hm³/a (40%) se produce en la DHG, en su totalidad procedente de la infiltración de la lluvia directa, y 89,1 hm³/a (60%) en la DHCMA, 75,9 hm³/a de la lluvia y 13,1 hm³/a alóctona del arroyo de La Madre. En Sierra Gorda-Zafarraya, la recarga estimada, 142,5 hm³/a, se distribuye en 55,6 (39%) en la DHG y 86,9 (61%) en la DHCMA; de los 3,6 hm³/a de Sierra Gibalto, 2,1 hm³/a (58%) se producen en la DHG y 1,5 hm³/a en la DHCMA, y en Fuente Camacho, los 1,5 hm³/a que se recargan, 0,77 (51%) pertenecen a la DHG y 0,73 hm³/a (49%) a la DHCMA.

Tabla 6.2. Distribución de los recursos de cada MASCH en régimen natural para el periodo 1985/86-2016/17 en hm³/a.

MASCH	Recarga total	DHG	DHCMA
Sierra Gorda-Zafarraya	142,52	55,62 (39%)	86,90 (61%)
Sierra de Gibalto	3,60	2,09 (58%)	1,51 (42%)
Fuente Camacho	1,50	0,77 (51%)	0,73 (49%)
Total	147,62	58,48 (40%)	89,14 (60%)

Nota: Los porcentajes se calculan respecto a la recarga total en cada MASCH y, en la última fila, respecto al total

Tabla 6.3. Balance hídrico en régimen natural estacionario de las MASCH por DH. Valores medios para el periodo 1985/86-2016/17 en hm³/a.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA									
CONCEPTO	GUADALQUIVIR				CUENCAS MEDITERRÁNEAS ANDALUZAS				TOTAL
	S. Gorda-Zafarraya DHG	S. Gibalto DHG	F. Camacho DHG	Total DHG	S. Gorda-Zafarraya DHCMA	S Gibalto DHCMA	F. Camacho DHCMA	Total DHCMA	
Recarga Iluvia	55,62	2,09	0,77	58,48	73,85	1,51	0,73	76,09	134,57
Rec. Alóctona					13,05			13,05	13,05
Manantiales	-118,91	-1,13	-0,36	-120,40	-7,58	-0,50	-0,64	-8,72	-129,12
Río Genil	-9,12			-9,12					-9,12
A. Las Mozas	-8,43			-8,43					-8,43
Detrítico de La Lana						-0,95		-0,95	-0,95
S. Gorda-Zafarraya (DHG)		-1,02	-0,50	-1,52	-79,32			-79,32	
S. Gibalto (DHG)	1,02			1,02		-0,06		-0,06	
F. Camacho (DHG)	0,50			0,50			-0,09	-0,09	
S. Gorda-Zafarraya (DHCMA)	79,32			79,32					
S. Gibalto (DHCMA)		0,06		0,06					
F. Camacho (DHCMA)			0,09	0,09					
DHG					79,32	0,06	0,09	79,47	
DHCMA	-79,32	-0,06	-0,09	-79,47					

The map illustrates the Guadalquivir basin, highlighting its hydrological and topographical characteristics. Key features include:

- Hydrological Features:** Major rivers such as the Río Genil, Río Guaro, Río Vélez, and Río de San Pedro are shown. The Guadalquivir river is the central feature, with numerous tributaries. The map also shows the Salar de San Pedro and the Arroyo del Salar.
- Topography:** The map uses contour lines to represent elevation, with labels for various altitudes (e.g., 520, 540, 550, 560, 570, 580, 590, 600, 610, 620, 630, 640, 650, 660, 670, 680, 690, 700, 710, 720, 730, 740, 750, 760, 770, 780, 790, 800, 810, 820, 830, 840, 850, 860, 870, 880, 890, 900, 910, 920, 930, 940, 950, 960, 970, 980, 990, 1000, 1010, 1020, 1030, 1040, 1050, 1060, 1070, 1080, 1090, 1100, 1110, 1120, 1130, 1140, 1150, 1160, 1170, 1180, 1190, 1200, 1210, 1220, 1230, 1240, 1250, 1260, 1270, 1280, 1290, 1300, 1310, 1320, 1330, 1340, 1350, 1360, 1370, 1380, 1390, 1400, 1410, 1420, 1430, 1440, 1450, 1460, 1470, 1480, 1490, 1500, 1510, 1520, 1530, 1540, 1550, 1560, 1570, 1580, 1590, 1600, 1610, 1620, 1630, 1640, 1650, 1660, 1670, 1680, 1690, 1700, 1710, 1720, 1730, 1740, 1750, 1760, 1770, 1780, 1790, 1800, 1810, 1820, 1830, 1840, 1850, 1860, 1870, 1880, 1890, 1900, 1910, 1920, 1930, 1940, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990, 2000, 2010, 2020, 2030, 2040, 2050, 2060, 2070, 2080, 2090, 2100, 2110, 2120, 2130, 2140, 2150, 2160, 2170, 2180, 2190, 2200, 2210, 2220, 2230, 2240, 2250, 2260, 2270, 2280, 2290, 2300, 2310, 2320, 2330, 2340, 2350, 2360, 2370, 2380, 2390, 2400, 2410, 2420, 2430, 2440, 2450, 2460, 2470, 2480, 2490, 2500, 2510, 2520, 2530, 2540, 2550, 2560, 2570, 2580, 2590, 2600, 2610, 2620, 2630, 2640, 2650, 2660, 2670, 2680, 2690, 2700, 2710, 2720, 2730, 2740, 2750, 2760, 2770, 2780, 2790, 2800, 2810, 2820, 2830, 2840, 2850, 2860, 2870, 2880, 2890, 2900, 2910, 2920, 2930, 2940, 2950, 2960, 2970, 2980, 2990, 3000, 3010, 3020, 3030, 3040, 3050, 3060, 3070, 3080, 3090, 3100, 3110, 3120, 3130, 3140, 3150, 3160, 3170, 3180, 3190, 3200, 3210, 3220, 3230, 3240, 3250, 3260, 3270, 3280, 3290, 3300, 3310, 3320, 3330, 3340, 3350, 3360, 3370, 3380, 3390, 3400, 3410, 3420, 3430, 3440, 3450, 3460, 3470, 3480, 3490, 3500, 3510, 3520, 3530, 3540, 3550, 3560, 3570, 3580, 3590, 3600, 3610, 3620, 3630, 3640, 3650, 3660, 3670, 3680, 3690, 3700, 3710, 3720, 3730, 3740, 3750, 3760, 3770, 3780, 3790, 3800, 3810, 3820, 3830, 3840, 3850, 3860, 3870, 3880, 3890, 3900, 3910, 3920, 3930, 3940, 3950, 3960, 3970, 3980, 3990, 4000, 4010, 4020, 4030, 4040, 4050, 4060, 4070, 4080, 4090, 4100, 4110, 4120, 4130, 4140, 4150, 4160, 4170, 4180, 4190, 4200, 4210, 4220, 4230, 4240, 4250, 4260, 4270, 4280, 4290, 4300, 4310, 4320, 4330, 4340, 4350, 4360, 4370, 4380, 4390, 4400, 4410, 4420, 4430, 4440, 4450, 4460, 4470, 4480, 4490, 4500, 4510, 4520, 4530, 4540, 4550, 4560, 4570, 4580, 4590, 4600, 4610, 4620, 4630, 4640, 4650, 4660, 4670, 4680, 4690, 4700, 4710, 4720, 4730, 4740, 4750, 4760, 4770, 4780, 4790, 4800, 4810, 4820, 4830, 4840, 4850, 4860, 4870, 4880, 4890, 4900, 4910, 4920, 4930, 4940, 4950, 4960, 4970, 4980, 4990, 5000, 5010, 5020, 5030, 5040, 5050, 5060, 5070, 5080, 5090, 5100, 5110, 5120, 5130, 5140, 5150, 5160, 5170, 5180, 5190, 5200, 5210, 5220, 5230, 5240, 5250, 5260, 5270, 5280, 5290, 5300, 5310, 5320, 5330, 5340, 5350, 5360, 5370, 5380, 5390, 5400, 5410, 5420, 5430, 5440, 5450, 5460, 5470, 5480, 5490, 5500, 5510, 5520, 5530, 5540, 5550, 5560, 5570, 5580, 5590, 5600, 5610, 5620, 5630, 5640, 5650, 5660, 5670, 5680, 5690, 5700, 5710, 5720, 5730, 5740, 5750, 5760, 5770, 5780, 5790, 5800, 5810, 5820, 5830, 5840, 5850, 5860, 5870, 5880, 5890, 5900, 5910, 5920, 5930, 5940, 5950, 5960, 5970, 5980, 5990, 6000, 6010, 6020, 6030, 6040, 6050, 6060, 6070, 6080, 6090, 6100, 6110, 6120, 6130, 6140, 6150, 6160, 6170, 6180, 6190, 6200, 6210, 6220, 6230, 6240, 6250, 6260, 6270, 6280, 6290, 6300, 6310, 6320, 6330, 6340, 6350, 6360, 6370, 6380, 6390, 6400, 6410, 6420, 6430, 6440, 6450, 6460, 6470, 6480, 6490, 6500, 6510, 6520, 6530, 6540, 6550, 6560, 6570, 6580, 6590, 6600, 6610, 6620, 6630, 6640, 6650, 6660, 6670, 6680, 6690, 6700, 6710, 6720, 6730, 6740, 6750, 6760, 6770, 6780, 6790, 6800, 6810, 6820, 6830, 6840, 6850, 6860, 6870, 6880, 6890, 6900, 6910, 6920, 6930, 6940, 6950, 6960, 6970, 6980, 6990, 7000, 7010, 7020, 7030, 7040, 7050, 7060, 7070, 7080, 7090, 7100, 7110, 7120, 7130, 7140, 7150, 7160, 7170

Figura 6.1. Funcionamiento hidrodinámico de las MASCH estudiadas en régimen natural. Las flechas indican el sentido del flujo subterráneo

7. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN INFLUENCIADO

El funcionamiento hidrogeológico en régimen alterado de las MASCH se ha realizado para el periodo 1985/86-2017/18, así como la evolución histórica de sus variables de estado, se ha simulado con la aplicación de las presiones generadas por la explotación de sus recursos y con los retornos de riego. Dado que las explotaciones no han tenido una influencia significativa en el funcionamiento hidrogeológico, la simulación se ha realizado partiendo de una situación en régimen estacionario no influenciado en las condiciones climáticas medias del periodo 1985/86-2017/18.

En La tabla 7.1 se recoge el balance hídrico de forma individual para cada MASCH. Como se puede observar es muy similar al del balance en régimen no influenciado, la diferencia más significativa como consecuencia de la explotación se observa en una reducción de las salidas por los manantiales en 2,3 hm³/a, de 129,1 a 126,8 hm³/a, casi en su totalidad en la MASCH de Sierra Gorda-Zafarraya. La recarga de agua en las tres MASCH contabilizan un total de 148,73 hm³/a, sin contar las reducción del almacenamiento, algo más que en régimen no influenciado debido al retorno de riego: 143,6 hm³/a en Sierra Gorda-Zafarraya, de las cuales 13,05 hm³/a proceden de la recarga del arroyo de La Madre, 3,6 hm³/a de Sierra Gibalto y 1,5 hm³/a de Fuente Camacho. En cuanto a las transferencias de agua entre MASCH apenas existe diferencia respecto al régimen no influenciado.

Tabla 7.1. Balance hídrico en régimen influenciado en las MASCH. Periodo 1985/86-2017/18 en hm³/a.

	CONCEPTO	S. Gorda-Zafarraya	S. Gibalto	F. Camacho	TOTAL
Entradas	Recarga lluvia	129,47	3,60	1,50	134,57
	Recarga alóctona	13,05			13,05
	Retorno de riego	1,11			1,11
	Total	143,63	3,60	1,50	148,73
	Var. Almacenamiento. ⁽¹⁾	3,78	0,00	0,02	3,80
	Total	147,41	3,60	1,52	152,53
Salidas	Manantiales	-124,18	-1,63	-1,02	-126,83
	Río Genil	-8,90			-8,90
	Ar. Las Mozas	-7,34			-7,34
	Explotaciones	-8,51			-8,51
	Total	-148,93	-1,63	-1,02	-151,58
Transferencias	S. Gorda-Zafarraya		-1,02	-0,50	-1,52
	S. Gibalto	1,02			1,02
	F. Camacho	0,50			0,50
	Total	1,52	-1,02	-0,50	0,00

(1) Los valores positivos indican reducción del almacenamiento

En la tabla 7.2 se recoge la distribución de la recarga por demarcaciones hidrográficas y por MASCH y en la tabla 7.3 todos los términos que intervienen en el balance. La recarga total en las tres MASCH, incluyendo infiltración de agua de lluvia, recarga alóctona, retorno de riego y variación del almacenamiento, es de 152,5 hm³/a. De las cuales, 60,9 hm³/a (40%) se produce en la DHG y 91,6 hm³/a (60%) en la DHCMA.

Tabla 7.2. Distribución de la recarga en cada MASCH en régimen influenciado para el periodo 1985/86-2017/18 en hm³/a.

MASCH	Recarga total ⁽¹⁾	DHG	DHCMA
Sierra Gorda-Zafarraya	147,41	58,07 (39%)	89,34 (61%)
Sierra de Gibalto	3,60	2,09 (58%)	1,51 (42%)
Fuente Camacho	1,50	0,77 (51%)	0,73 (49%)
Total	152,51	60,93 (40%)	91,58 (60%)

Nota: Los porcentajes se calculan respecto a la recarga total en cada MASCH y, en la última fila, respecto al total
 (1) A diferencia del régimen no influenciado, en las entradas se incluyen tanto el retorno de riego como la variación del almacenamiento.

En cuanto a la distribución de isopiezas apenas existe diferencia en las direcciones de flujo preferente entre el régimen no influenciado e influenciado. Tan sólo se podría destacar una diferencia apreciable en las cotas piezométricas en el extremo sur de Sierra Gorda. En este sector las diferencias en cota absoluta entre un régimen u otro pueden sobrepasar los 50 m, como consecuencia del aumento de las explotaciones en el polje de Zafarraya, tanto en el aluvial como en los carbonatos de Sierra Gorda. En la figura 7.1 se muestra un detalle de las diferencias piezométricas en el acuífero carbonatado de Sierra Gorda en este sector entre el régimen no influenciado estacionario y el influenciado en septiembre de 2018.

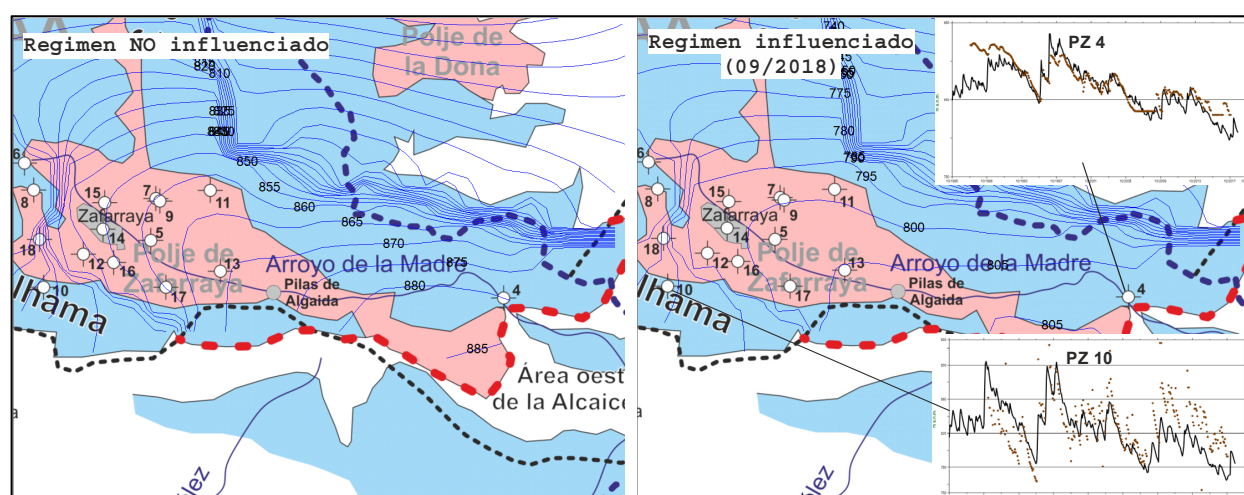


Figura 7.1. Detalle de las isopiezas del acuífero carbonatado en el norte de sierra Gorda en régimen no influenciado y en régimen influenciado en el 09/2018. Se incluye la evolución de niveles medidos y simulados en dos piezómetros representativos que captan este acuífero.

Tabla 7.3. Balance hídrico en régimen influenciado de las MASCH por DH, para el periodo 1985/86-2017/18 en hm³/a.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA									TOTAL
CONCEPTO	GUADALQUIVIR				CUENCAS MEDITERRÁNEAS ANDALUZAS				
	S. Gorda-Zafarraya DHG	S. Gibalto DHG	F. Camacho DHG	Total DHG	S. Gorda-Zafarraya DHCMA	S Gibalto DHCMA	F. Camacho DHCMA	Total DHCMA	
Recarga lluvia	55,62	2,09	0,77	58,48	73,85	1,51	0,73	76,09	134,57
Rec. Alóctona					13,05			13,05	13,05
Retorno riego	0,43			0,43	0,68			0,68	1,11
Manantiales	-116,94	-1,13	-0,36	-118,43	-7,24	-0,50	-0,66	-8,40	-126,83
Río Genil	-8,90			-8,90					-8,99
A. Las Mozas	-7,34			-7,34					-7,34
Explotaciones	-4,32			-4,32	-4,19			-4,19	-8,51
Var. Almacen.	2,02	0,00	0,02	2,04	1,76	0,00	0,00	1,76	3,80
Detrítico de La Lana						-0,95		-0,95	-0,95
S. Gorda-Zafarraya (DHG)		-1,02	-0,50	-1,52	-77,91			-77,91	
S. Gibalto (DHG)	1,02			1,02		-0,06		-0,06	
F. Camacho (DHG)	0,50			0,50			-0,07	-0,07	
S. Gorda-Zafarraya (DHCMA)	77,91			77,91					
S. Gibalto (DHCMA)		0,06		0,06					
F. Camacho (DHCMA)			0,07	0,07					
DHG					77,91	0,06	0,07	78,04	
DHCMA	-77,91	-0,06	-0,07	-78,04					

8. BALANCE HÍDRICO SEGÚN DIVISORIA HIDROGRÁFICA E HIDROGEOLÓGICA

Desde un punto de vista estrictamente normativo la evaluación de los recursos hídricos subterráneos disponibles de una masa de agua subterránea, independientemente de que aquella presente continuidad hidrogeológica o no con otra localizada en un ámbito de planificación diferente, responde a la directriz aportada en la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH, 2008), apartado 1.2-55, donde se establece que los recursos disponibles de una masa de agua subterránea se determinarán a partir del *valor medio interanual de la tasa de recarga total de la masa de agua subterránea, menos el flujo interanual medio requerido para conseguir los objetivos de calidad ecológica para el agua superficial asociada, para evitar cualquier disminución significativa en el estado ecológico de tales aguas, y cualquier daño significativo a los ecosistemas terrestres asociados.*

Por otro lado, en el apartado 1.2-55 de la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH, 2008), también se hace alusión a las restricciones ambientales asociadas a las aguas subterráneas. A este respecto, en el texto refundido de la Ley de Aguas, en su apartado 5.2.4.1 “Estado cuantitativo”, se *dispone que las restricciones ambientales, asociadas a las aguas subterráneas, corresponden a los flujos medioambientales requeridos para cumplir con el régimen de caudales ecológicos y para prevenir los efectos negativos causados por la intrusión marina. En el régimen de caudales ecológicos se incluye tanto los caudales necesarios para mantener el caudal base en las masas superficiales categoría ríos como los requerimientos hídricos necesarios para la conservación de los lagos y zonas húmedas. En lo que se refiere a la intrusión marina considera los volúmenes mínimos necesarios para evitar el avance de la cuña salina.*

Como se deduce del análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en régimen no influenciado e influenciado en los dos apartados anteriores apenas existe diferencia en la distribución de la recarga en las tres MASCH estudiadas en un régimen u otro. En la MASCH de Sierra de Gibalto y Fuente Camacho apenas existe diferencia en la distribución de la recarga al considerar las divisoria hidrográfica o la hidrogeológica. No así en la MASCH de Sierra Gorda donde las entradas se distribuyen entre el 40% en la DHG y el 60% en la DHCMA. Es decir, existe una aportación subterránea desde la DHCMA hacia la DHG del 91% (79,32 hm³/a) de sus aportaciones totales (86,80 hm³/a).

En la tabla 8.1 se muestra una comparativa de la distribución de la recarga en régimen natural para el periodo 1985/86 a 2017/18 para las MASCH estudiadas según las divisorias hidrográfica e hidrogeológica. Como ya se ha indicado, en las MASCH de Sierra Gibalto y Fuente Camacho, apenas existe diferencia entre la divisoria hidrográfica e hidrogeológica. No así en Sierra Gorda-Zafarraya, la divisoria hidrogeológica entre la DHG y la DHCMA está desplazada respecto a la hidrográfica muy al sur, quedando la vertiente subterránea de la DHCMA limitada a las salidas por los manantiales de Guaro.

Tabla 8.1. Comparativa de la distribución de la recarga en régimen natural en las tres MASCH según las divisorias hidrográfica e hidrogeológica correspondientes a las

Cuencas Mediterráneas Andaluzas y al Guadalquivir. Variaciones absolutas y porcentuales.

MASCH	Distribución de recursos según	(1) DHG hm³/a	(2) DHCMA (hm³/a)	(3) Total MASCH (hm³/a)
Sierra Gorda-Zafarraya	Divisoria hidrográfica	57,14 ⁽¹⁾ (39,7%)	86,90 ⁽²⁾ (60,3%)	144,02
	Divisoria hidrogeológica	136,46 (94,8%)	7,58 (5,2%)	
Sierra Gibalto	Divisoria hidrográfica	2,09 (58,1%)	1,51 (41,9%)	3,60
	Divisoria hidrogeológica	2,15 (59,7%)	1,45 (40,3%)	
Fuente Camacho	Divisoria hidrográfica	0,77 (51,3%)	0,73 (48,7%)	1,50
	Divisoria hidrogeológica	0,86 (57,3%)	0,64 (42,7%)	

(1) Se contabilizan los recursos propios más los procedentes por transferencia subterránea de Sierra Gibalto (1,02 hm³/a) y los de Fuente Camacho (0,50hm³/a).

(2) Se contabilizan los recursos propios más los alóctonos procedentes del arroyo de La Madre (13,05 hm³/a).

”

9. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Los principales resultados y conclusiones obtenidas de los trabajos llevados a cabo se exponen en los siguientes puntos.

- Existen masas de agua subterránea, colindantes entre dos o más demarcaciones hidrográficas, cuya realidad física respecto de su conexión hídrica y funcionamiento hidrogeológico escapa a sus límites administrativos, por lo que resulta necesario afrontar su estudio y su gestión desde la óptica de su realidad hidrogeológica. Este es el caso de las masas de agua subterránea (MASb) que se contemplan en el presente informe, donde no tiene sentido proceder a estimar los recursos de agua subterránea de manera independiente, unilateral y separadamente. **A dichas masas se las ha agrupado bajo la denominación de “masas de agua subterránea que presentan continuidad hidrogeológica” (MASCH).**
- Las MASb que se analizan en este documento tienen continuidad hidrogeológica entre las demarcaciones de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas (DHCMA) y la del Guadalquivir (DHG). La **MASCH Sierra Gorda-Zafarraya**, integrada con el mismo nombre en la DHCMA y en la DHG pero con los códigos ES060MSBT060.025 y ES050MSPF011009021, respectivamente. La **MASCH Sierra Gibalto**, adscrita a la DHCMA con el nombre Sierra Gibalto-Arroyo Marín (ES060MSBT060.028) y a la DHG que se incluye en la de Sierra Gorda-Zafarraya. La formación diapírica triásicas al NO de sierra Gorda **MASCH Fuente Camacho** que, aunque no está adscrita a ninguna de las demarcaciones, constituye claramente un acuífero diferenciado del resto.
- **En las MASCH de Sierra Gorda-Zafarraya y Sierra Gibalto, la formación hidrogeológica principal corresponde a los materiales del Jurásico inferior, que pueden llegar a alcanzar un espesor de 1300 m de calizas y dolomías masivas.** Además, en Sierra Gorda-Zafarraya se localiza el acuífero **aluvial del Polje de Zafarraya**, que, aunque tiene un funcionamiento independiente del acuífero carbonatado, están estrechamente relacionados por las transferencias laterales a través del polje, sobre todo las procedentes del arroyo de La Madre. **En la MASCH de Fuente Camacho** los materiales de estructura diapírica constituidos por una mezcla de **yesos masivos, arcillas, areniscas y, a veces calizas y dolomías**, puede conformar una formación de permeabilidad media-baja que da lugar a surgencias salinas de cierta importancia hidrogeológica.
- **La precipitación media** en el dominio estudiado es de **626 mm/a** para el periodo 1985/86-2017/18 con diferencias interanuales y variaciones a nivel diario importantes (1.058 mm a 291 mm y desviación típica de 204 mm). Debido a las grandes diferencias de cota (entre 450 y 1700 m s.n.m.), también existe una variabilidad espacial importante, desde los 900 mm/a de media en las zonas más altas de Zafarraya hasta los 400 mm/a en las zonas más bajas.
- **Las aportaciones subterráneas alóctonas** hacia la MASCH de Sierra Gorda-Zafarraya de la cuenca endorreica del **arroyo de La Madre** se han calculado diariamente por el método del “número de curva”. Para el periodo 1985/86-2017/18 se han estimado en un total de **13,03 hm³/a**, de los cuales **4,42 hm³/a se infiltrarían en los carbonatos de sierra Gorda** antes de alcanzar el aluvial del polje de Zafarraya. No obstante, parte de lo que llega al aluvial se infiltraría hacia los carbonatos lateralmente o por sumideros.
- **Las explotaciones** consideradas para los objetivos de este estudio han sido las que se localizan en los **poljes de Zafarraya, Pilas-Dedil y La Dona**. En esta áreas, la explotación media **en el periodo 1985/86-2017/18 ha sido de 8.51 hm³/a, 4,32 en los poljes de La Dona y Pilas-Dedil y 4,19 hm³/a en el de Zafarraya** (2,49 y 1,70 hm³/a se captan del detrítico y de los carbonatos,

respectivamente). La explotación ha aumentado progresivamente desde el inicio del periodo analizado, en los últimos 10 años (1985/86-2017/18) se han contabilizado en un total de 11,13 hm³/a.

- Debido al funcionamiento hidrogeológico diferente pero estrechamente relacionados entre el acuífero aluvial de Zafarraya y el carbonatado de sierra Gorda, para alcanzar los objetivos perseguidos se ha considerado conveniente calcular la recarga mediante el **diseño y calibración de dos modelos con la aplicación RENATA, uno en el aluvial de Zafarraya y otro en el conjunto de las MASCH estudiadas**. Los resultados del primer modelo se han incorporado en el segundo.
- Los principales **resultados obtenidos en el acuífero detrítico de Zafarraya** han sido los siguientes:

Concepto		Régimen NO influenciado (hm ³ /a)	Régimen influenciado (hm ³ /a)
ENTRADAS	Infiltración lluvia	8.86	8,86
	Arroyo La Madre	8.63	8,63
	Retorno de riego		0,68
	Total entradas	17.49	18,17
SALIDAS	Explotaciones		2,49
	Carbonatos de S. Gorda	17.49	15,19
	Variación Almacenamiento		0,49
	Total salidas	17.49	18,17

- La recarga de las MASCH (1985/86-2017/18)** estimadas con la aplicación **RENATA** han sido de **142,35 hm³/a en Sierra Gorda-Zafarraya**, **5,21 hm³/a en Sierra Gibalto** y **1,71 hm³/a en Fuente Camacho**. Apenas existe diferencias entre el funcionamiento hidrogeológico ni entre la recarga obtenida por demarcaciones en régimen no influenciado e influenciado, salvo en lo que se refiere al retorno de riego. En régimen no influenciado según la procedencia y destino de los recursos se distribuyen por demarcaciones en hm³/a para el periodo 1985/86-2017/18:

MASCH	Total Recarga	DHG		DHCMA	
		Recarga	Salidas	Recarga	Salidas
Sierra Gorda-Zafarraya	142,35	55,55 (39%)		86,80 (61%)	
Sierra de Gibalto	5,21	2,78 (53%)		2,43 (47%)	
Fuente Camacho	1,71	0,76 (44%)		0,95 (66%)	
Total	149,27	59,09 (40%)	140,56 (94%)	90,18 (60%)	8.71 (6%)

Notas: Los porcentajes se calculan respecto a la recarga total en cada MASCH y, en la última fila, respecto al total. No se puede indicar por MASCH las salidas porque existe transferencias de agua subterránea entre ellas.

REFERENCIAS

- Álvarez Díez, J.; De Ávila, A.; Del Pozo, J; Fdez.-Serrano, M.; González-Ramón, A.; Mejías, M.; Peinado Parra, T. y Sánchez, C. (2013). *Contribución al conocimiento hidrogeológico del margen norte de Sierra Gorda. Síntesis de los resultados obtenidos en el estudio hidrogeológico de la variante de Loja. L.A.V. Antequera-Granada (I)*. X Simposio de Hidrogeología (A. Fernández-Uría –Ed-), pp 643-656. Serie Hidrogeología y Recursos Hidráulicos 30. Instituto Geológico y Minero de España. ISBN: 978-84-7840-914-3.
- Anguita, F. y Fernández Montero, A. (1969): *Estudio hidrogeológico de Zafarraya (Granada)*. III Curso de Hidrogeología Subterránea, Barcelona, 82 pp. Inédito.
- Benavente, J., Pulido, A. y Fernández-Rubio, R. (1986): *Les grandes caractères de l'hydrogéologie karstique dans les Cordillères Bétiques*. Karst et cavités d'Andalousie. Karstologie Memoires, 1: 87-99.
- Casares, J. (1978): *Investigaciones hidrogeológicas en los macizos kársticos de Parapanda y del Hacho de Loja (Provincia de Granada)*. Tesis de Licenciatura, Universidad Granada, 218 pp.
- Casares, J. (1981): *Quimismo y evolución hidrogeoquímica de los acuíferos kársticos de Parapanda y del Hacho de Loja (provincia de Granada)*. I Simposio Agua en Andalucía, Granada, 1, 429-444.
- Casares, J.; Fernández Rubio, R. y Pulido Bosch, A. (1979): *Aspectos hidrogeológicos de dos macizos carbonatados del dominio Subbético interno*. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, Pamplona, 3, 147-165.
- Castillo, A. y Benavente, J. (1988): *Consideraciones sobre la tendencia evolutiva de quimismos del río Genil (Sierra Nevada-Iznájar)*. 11 Congreso Geológico de España, comunicaciones, 2: 363-366.
- Castillo, A. y López Chicano, M. (1988): *Consideraciones acerca de las relaciones existentes entre las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del alto Genil. (Provincia de Granada)*. 11 Congreso Geológico de España, comunicaciones, 2: 367- 370.
- CHG-IGME (2001): *Norma de Explotación de la U.H. 05.40 Sierra Gorda - Polje De Zafarraya. Revisión y actualización de las normas de explotación de las Unidades Hidrogeológicas de las cuencas del Guadalquivir y Guadalete - Barbate*. Propuesta de normativa y definición de nuevas Unidades Hidrogeológicas. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir-Instituto Geológico y Minero de España. 39 pp.
- CHSE (1987): *Regulación de las aguas subterráneas del manantial de Guaro, Periana, Málaga. Servicio de Obras Hidráulicas*. Confederación Hidrográfica del Sur de España. Informe interno.
- CHS-IGME-GHUMA (2004): *Redefinición de las unidades hidrogeológicas de la Cuenca Sur*. Instituto Geológico y Minero de España; Confederación Hidrográfica del Sur; Universidad de Málaga, Madrid (España). 219 pp.
- Crespo-Blanc, A. (2007): *Superimposed folding and oblique structures in the palaeomargin-derived units of the Central Betics (SW Spain)*. Journal of the Geological Society, (164): 621–636. DOI:10.1144/0016-76492006-084.
- De Ávila, A.; Del Pozo, J; Fdez.-Serrano, M.; González-Ramón, A.; Mejías, M.; Peinado Parra, T. y Sánchez, C. (2013). *Contribución al conocimiento hidrogeológico del margen norte de Sierra Gorda. Síntesis de los resultados obtenidos en el estudio hidrogeológico de la variante de Loja*.

- L.A.V. *Antequera-Granada (II)*. En: X Simposio de Hidrogeología (A. Fernández-Uría –Ed-), pp 657-670. Serie Hidrogeología y Recursos Hidráulicos 30. Instituto Geológico y Minero de España. ISBN: 978-84-7840-914-3.
- Delgado Moya, S. (1973): *Estudio Hidrogeológico del Karst de Sierra Gorda (Granada)*. Tesis de Licenciatura, Universidad de Granada, 99 pp.
- Delgado Moya, S.; Hidalgo, J.; Fernández Rubio, R. y del Valle, M. (1974): *Características hidrogeológicas del embalse subterráneo de Sierra Gorda (Prov. de Granada)*. Documentos Investigación Hidrológica, Barcelona, 16, 54-68.
- DGOH (1988). Estudio 01/88. *Estudio hidrogeológico de la problemática hídrica del Llano de Zafarraya (Granada)*. *Propuesta para la ordenación de sus recursos*. Informe inédito.
- DGOH (1991). *Informe sobre las relaciones de dependencia existentes entre las unidades hidrogeológicas de Sierra Gorda y Polje de Zafarraya (Granada)*. Informe inédito.
- DGOH (1995). *Normas de explotación de las unidades hidrogeológicas con afección directa a los embalses de regulación y fuentes de abastecimiento a poblaciones de la Cuenca del Guadalquivir. Unidad hidrogeológica 05.40. Sierra Gorda y Zafarraya*.
- DGOH-ITGE (1993): *Propuesta de normas de explotación de las unidades hidrogeológicas con afección a embalses de regulación y fuentes de abastecimiento a poblaciones de la cuenca del Guadalquivir. Unidad Hidrogeológica nº 00.09 (40 y 41). Sierra Gorda y Polje de Zafarraya*.
- Diputación Provincial de Granada - ITGE (1990): *Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Granada*. Diputación Provincial de Granada - ITGE, Granada, 107 pp.
- Durán, J. J. (1996). *Los sistemas kársticos de la provincia de Málaga y su evolución. Contribución al conocimiento paleoclimático del Cuaternario en el Mediterráneo Occidental (Ph.D. Thesis)*. Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Garay, P.; Obarti, F.J. y Morell, L. (1988): *Dissolution-rates in Spanish Karst regions*. In: Karst Hydrogeology and Karst Environments Protection. I.A.H. 21st Congress, Guilin, 1: 276-280.
- Garay, P. y Morell, L. (1989): *Tasas de disolución en regiones kársticas españolas*. En: Duran. J.J. y López Martínez. J. eds.). *El Karst en España*. Monografía 4. S.E.G., Madrid: 257-264.
- Gavilán Moreno, C.J., Ortega Vargas R.F. y Navarro Iáñez J.A. (1996): *Nueva interpretación de los datos sobre las direcciones principales de drenaje del macizo kárstico de Sierra Gorda*. IV Simposio sobre el Agua en Andalucía. Vol. 1: 259-269.
- Girard, G., Ledoux, E., and Villeneuve, J. P (1981): *Le modèle couplé: simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique*. Cahiers ORSTOM, série hydrologie, XVIII (4).
- González-Ramón, A., López-Chicano, M., Gázquez, F., Durán-Valsero, J. J., Pedrera, A., Ruiz-Constán, A., y González-Egea, E. (2017): *Isotopic and hydrochemistry spatial variation of sulfate for groundwater characterization in karstic aquifers*. Hydrological Processes, 31:3242–3254.
- González-Ramón, A., Peinado-Parra, T., Luque-Espinar, J.A. (2012): *Caracterización hidroquímica temporal y espacial del borde norte del acuífero de Sierra Gorda (Loja, Granada)*. Geogaceta, 52, 223-226.
- Guzmán del Pino, J.L. (1987): *Estudio hidrogeológico del polje de Zafarraya y áreas adyacentes*. Informe técnico para la CHSE, Málaga, 115 pp. Inédito.

- Guzmán del Pino, J.L.; Delgado Pastor, J. Castillo Pérez, E. y Lupiani, E. (1991): *Problemática hídrica del Llano de Zafarraya*. XXIII Congreso A.I.H., Puerto de la Cruz, 531-534.
- Hargreaves, G.H y Samani, Z.A. (1985). *Reference crop evapotranspiration from temperature*. Applied Engineering in Agriculture, 1, 96–99.
- Hidalgo, J. (1974a): *Estudio hidrogeológico del Polje de Zafarraya y zonas adyacentes (provincias de Granada y Málaga)*. Tesis de Licenciatura, Universidad de Granada, 165 pp.
- Hidalgo, J. (1974b): *Fluctuaciones del nivel piezométrico en el polje de Zafarraya (Provincia de Granada)*. Documentos Investigación Hidrológica, Barcelona, 16, 95-112.
- Hidalgo, J. y Fernández Rubio, R. (1974): *Vulnerabilidad a la polución de las aguas subterráneas en el polje de Zafarraya y zonas adyacentes (Granada y Málaga)*. Boletín Geológico y Minero, 85(3), 300-307.
- IARA (1989): *Estudio hidrogeológico de la problemática hídrica del Llano de Zafarraya (Granada). Propuesta para la ordenación de sus recursos*. Informe inédito.
- IARA (1994): *Observaciones hidrogeológicas durante el bombeo experimental de la galería de Guaro realizado entre 1992 y 1993*. Informe inédito.
- IGME (1977): *Cuenca Sur de España, parte occidental (Málaga). Síntesis hidrogeológica de la Sierra Gorda (1976-1977)*.
- IGME (1983a): *Investigación hidrogeológica de las cuencas del sur de España (Sector Occidental)*. Informe técnico nº 9. Sistema acuífero nº 40-E. Mesozoico calizo-dolomítico de la Sierra Gorda. PIAS, IGME, 142 pp.
- IGME (1983b): *Informe final del sondeo para abastecimiento a Cuesta Blanca (Loja-Granada)*. Informe inédito.
- IGME (1984): *Informe final del sondeo Arroyo del Salar (Cortijo Salcedo)*. Informe inédito.
- IGME (1986a): *Informe sobre el sondeo de reconocimiento realizado en el barranco Los Pilonos (Alhama de Granada)*. Informe inédito.
- IGME (1986b): *Informe sobre el sondeo de reconocimiento realizado al sur del pueblo de Salar (Granada)*. Informe inédito.
- IGME-DPM-UMA (2007): *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*. Instituto Geológico y Minero de España; Diputación de Málaga; Universidad de Málaga. Madrid. 3 tomos.
- IGME-DGA (2010): *Masa de Agua Subterránea 051.040 “Sierra Gorda-Zafarraya”. Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Actividad nº 4. Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descargas por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico*. Instituto Geológico y Minero de España, Dirección General del Agua. 53 pp.
- IGME-Diputación Provincial de Alicante (2012): *RENATA: Recarga Natural a los acuíferos*
- ITGE-Junta de Andalucía (1998): *Atlas Hidrogeológico de Andalucía*. Instituto Tecnológico Geominero de España; Junta de Andalucía. 216 pp.
- ITGE-Junta de Andalucía (2000): *Actividad nº 26. Documentos nº 26.6, 26.7 y 26.8. Plan de integración de los recursos hídricos subterráneos en el abastecimiento urbano. Estudio*

- hidrogeológico de probabilidades de mejora de los abastecimientos urbanos del Norte de la provincia de Málaga*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Junta de Andalucía. 291 pp.
- Junta de Andalucía-Diputación Provincial de Granada (1995): *Informe final del sondeo para abastecimiento a Zafarraya (Granada). Sondeo Zafarraya II*. Informe inédito.
- Lhenaff, R. (1999): *Los poljes de Andalucía*. En: Durán, J.J. y López-Martínez, J. (Eds.), *Karst en Andalucía*, 55-58. Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid (España). 192 pp.
- López-Chicano, M., Pulido Bosch, A. (1989): *Compartimentación y descenso de niveles piezométricos en un sector del sistema de Sierra Gorda (Granada y Málaga)*. En: *La sobreexplotación de acuíferos*. ITGE, 577-591. Almería (España).
- López Chicano, M. (1989): *Geometría y estructura de un acuífero kárstico perimediterráneo: Sierra Gorda (Granada y Málaga)*. Tesis de Licenciatura, Universidad de Granada, 77 pp.
- López-Chicano, M. (1992): *Contribución al conocimiento del sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda y su entorno (Granada y Málaga)*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada (España). 429 pp.
- López-Chicano, M. (1995): *El paisaje kárstico de Sierra Gorda. Formas y evolución geodinámica reciente*. Espeleotemas, 5, 31–50.
- López-Chicano, M. (2007): *Sierra Gorda-Polje de Zafarraya (M.A.S. 060.025)*. En: Durán, J.J. (Coord. general), *Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga*, tomo 2, 131-136. Instituto Geológico y Minero de España; Diputación de Málaga, Madrid. 220 pp.
- López-Chicano, M., Cerón, J.C., Vallejos, A., Pulido-Bosch, A. (2001): *Geochemistry of thermal springs, Alhama de Granada (southern Spain)*. *Applied Geochemistry*, 16 (9-10): 1153-1163. DOI: 10.1016/S0883-2927(01)00020-8.
- López-Chicano, M., Pulido Bosch, A. (2002): *Síntesis hidrogeológica de los acuíferos de Sierra Gorda, Polje de Zafarraya y Hacho de Loja*. Libro Homenaje a Manuel del Valle Cardenete, 311-340.
- López-Chicano, M., Pulido Bosch, A., Cherif, L y Gámez, J.L. (1996): *Aportación al conocimiento hidrogeológico del Polje de Zafarraya*. IV SIAGA. Tomo I. 145-156.
- López Geta, J.A.; del Valle, M. y Trenado, L. (1981): *Adecuación de los recursos hídricos de las surgencias naturales de "Guaro" a la demanda de la zona*. I Simposio Agua en Andalucía, Granada, 2, 767-784.
- Lupiani, E. y Soria, J. (1988): *Mapa y memoria explicativa de la Hoja 1025 (Loja) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000*. Instituto Geológico y Minero de España.
- MOPU-IGME (1988): *Estudio 07/88. Delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares y síntesis de sus características. Cuenca del Guadalquivir*. Informe inédito.
- Martín-Algarra, A. (1987): *Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y las externas de la Cordillera Bética*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada (España). 1.171 pp.
- Moreno Calvillo, I. y Castillo Martín, A. (1982): *Síntesis hidrogeológica de Sierra Gorda (Granada)*. *Spes*, 2:41-57.

- Obarti, F.J.; Garay, P. y Morell, L. (1988): *An attempt to Karst classification in Spain based on System Analysis*. In: Karst Hydrogeology and Karst Environments Protection. I.A.H. 21st Congress, Guilin, 1: 328-336.
- Ollero, E. y García, J.L. (1983): *Estudio Hidrogeológico y Agronómico del Polje de Zafarraya. Informe para la Diputación Provincial de Granada*. Inédito. 196 pp.
- Ollero, E. y García, J.L. (1984a): *Características hidroquímicas del acuífero aluvial del polje de Zafarraya*. I Congreso Español de Geología, 4, 287-294.
- Ollero, E. y García, J.L. (1984b). *Incidencias de las aportaciones del arroyo de la Madre en el balance hídrico del polje de Zafarraya*. I Congreso Español de Geología, 4, 295-305.
- Pezzi, M.C. (1977): *Un Karst caractéristique de montagnemoyenneméditerranéenne: Sierra Gorda (Grenade), CordilleresBétiques*. St. TrentiniSci. Nat., 54:37-54.
- Pistre, S., López-Chicano, M., Pulido-Bosch, A. y Drogue, C. (1999): *The role of western Mediterranean tectonic evolution in the geometry of a karstic domain in the Betic Cordilleras (Sierra Gorda, Spain): importance of a tardy extensional regime*. Geodinamica Acta, 12, 11-24.
- Rubio, J.C. y del Valle, M. (1987): *Actualización de balances en los acuíferos de las provincias de Granada y Jaén*. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, Palma de Mallorca, 11, 669-683.
- Sánchez Caballero, M.A.; Fernández, A. y Castillo, A. (1986): *Caracterización físico-química preliminar de las aguas superficiales de la cuenca del Alto Genil*. II Simp. Agua en Andalucía, Granada, 1: 511-521.
- Témez Peláez, J. R. (1978): *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. MOPU.
- Thornthwaite, C.W. (1948): *An approach toward a rational classification of climate*. Geographical Review, 38(1): 55-94.
- Vera J.A. y Martín-Algarra, A. (2004): *Cordillera Bética y Baleares*. En: Vera J.A. (ed) Geología de España. SGE-IGME, Madrid, 345-464.