

62778
(5)

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA NUMÉRICA DE ANÁLISIS Y
CONTRASTE DE LAS DESCARGAS DE LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS A LOS HUMEDALES PARA SU APLICACIÓN EN
LA MODELIZACIÓN DE FLUJO**

**DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DE FLUJO DEL SISTEMA
HIDROGEOLÓGICO DE DENSIDAD VARIABLE EN
LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA (MÁLAGA)**

MEMORIA

Julio de 2004



MINISTERIO
DE EDUCACIÓN
Y CIENCIA



Instituto Geológico
y Minero de España

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA NUMÉRICA DE ANÁLISIS Y
CONTRASTE DE LAS DESCARGAS DE LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS A LOS HUMEDALES PARA SU APLICACIÓN EN
LA MODELIZACIÓN DE FLUJO**

**DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DE FLUJO DEL SISTEMA
HIDROGEOLÓGICO DE DENSIDAD VARIABLE EN
LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA (MÁLAGA)**

MEMORIA

Julio de 2004



INFORME	Identificación: H-2046-04 Fecha: Julio de 2004
TÍTULO DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA NUMÉRICA DE ANÁLISIS Y CONTRASTE DE LAS DESCARGAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS A LOS HUMEDALES PARA SU APLICACIÓN EN LA MODELIZACIÓN DE FLUJO.	
PROYECTO DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DE FLUJO DEL SISTEMA HIDROGEO-LÓGICO DE DENSIDAD VARIABLE EN LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA, MÁLAGA (ESPAÑA)	
RESUMEN El sistema hidrogeológico de la laguna de Fuente de Piedra (Málaga, España) se caracteriza por su gran complejidad, pues presenta varios sistemas de flujo estratificados -debido a las distintas densidades- que descargan a la laguna, conformando con las aguas superficiales una cuenca endorreica. Las salmueras en la zona de descarga alcanzan una salinidad superior en 5 veces a la del agua de mar. La laguna es Reserva Natural y fue uno de los primeros humedales españoles incorporados al Convenio de Ramsar, por ser, con de la Camargue (Francia), el sitio más importante de nidificación de flamencos en el Mediterráneo occidental. La gestión hídrica es fundamental en la estrategia conservacionista de la Reserva Natural. Sobre los recursos hídricos de la cuenca concurren distintas demandas: abastecimiento, regadíos, industrias de transformación y la conservacionista. El objetivo inicial del Proyecto fue el desarrollo de un modelo numérico del sistema hidrogeológico de la laguna de Fuente de Piedra, con el fin de ser usado como herramienta en la gestión hídrica de la cuenca. Sin embargo, el modelo conceptual del sistema existente hasta la fecha presentaba serias limitaciones -entre otras, consideraba al flujo con densidad constante, desconocía la geometría de las formaciones acuíferas- e incertidumbres en los términos del balance hídrico. Así, el IGME se propuso como nuevo objetivo la caracterización adecuada y rigurosa de este sistema hidrogeológico. En el presente informe se exponen los avances en los trabajos de investigación que se desarrollaron en pos de esta meta.	
Revisión Nombre: Juan Antonio López-Geta Unidad: Hidrogeología y Aguas Subterráneas Fecha: Julio de 2004	Autores: Javier Heredia, Luis Araguás, José María Ruiz Responsable: Juan Antonio López-Geta

El presente informe se ha realizado dentro del Proyecto “Desarrollo de una herramienta numérica de análisis y contraste de las descargas de las aguas subterráneas a los humedales para su aplicación en la modelización de flujo” en el marco de la labor de estudio que desde hace 25 años el IGME viene desarrollando en el sistema hidrogeológico de la laguna, así como organismo asesor del Patronato de la Reserva Natural de la Laguna de Fuente Piedra en la gestión de los recursos hídricos, actuando como:

Responsable del estudio:

Juan Antonio López-Geta

Autores del estudio:

Javier Heredia, Luis Araguás, José María Ruiz

Asesores de la geología de la zona:

Alfredo García de Domingo, Juan José Durán

Se desea expresar un agradecimiento particular por la colaboración prestada en el Proyecto a D. Manuel Rendón Martos, Director-Conservador de la Reserva Natural de la Laguna de Fuente de Piedra; D. José Benavente, Profesor Titular de la Universidad de Granada y D. Luis Linares. Asimismo, se desea hacer extensivo este reconocimiento a los restantes relatores y ponentes del Taller *Sobre la hidrogeología de los sedimentos tráasicos y su control sobre los sistemas lagunares del norte de la provincia de Málaga* los Profesores Titulares D. Francisco Carrasco, D. Bartolomé Andreo, D. Javier Cruz-San Julián, D. Agustín Martín-Algarra, D. Alberto Pérez-López y D. Miguel Rodríguez y D. José Luis Guzmán del Pino y a los demás participantes de esta Jornada el Profesor D. Juan Lucena, el anterior Director del IGME D. Emilio Custodio y nuestros compañeros D. Juan Carlos Rubio, D. José L. Padilla y D. Antonio González. Institucionalmente se desea agradecer al CEDEX por colaborar en la ejecución de los ensayos de campo y en los análisis químicos y de isótopos estables, al Instituto Geográfico Nacional por contribuir con su Modelo Digital del Terreno y a la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía por su colaboración en la realización del inventario selectivo.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
I.1- Breve descripción de la cuenca	1
I.2- Motivación del proyecto: objetivo inicial y limitaciones en el conocimiento del sistema	2
I.2.1- Objetivo inicial	2
I.2.2- Limitaciones en el conocimiento: infraestructura básica	3
I.2.3- Limitaciones en el conocimiento: balance hídrico	4
I.2.4- Limitaciones en el conocimiento: geología	4
I.2.5- Limitaciones en el conocimiento: topografía	5
II. OBJETIVO	7
III. SÍNTESIS GEOLÓGICA	8
III.1. Introducción	8
III.2. Características litoestratigráficas	8
III.2.1 Formaciones Triásicas	8
III.2.2- Formaciones Jurásicas	9
III.2.3- Formaciones Cretácicas	10
III.2.4- Formaciones Terciarias	10
III.2.4.1- Unidad Olistostrómica o Complejo Olistostrómico Subbético	10
III.2.4.2- Mioceno superior	10
III.2.5- Formaciones cuaternarias	11
III.3- Características tectónicas	11
III.4- Características geomorfológicas	12
III.5- Características hidrogeológicas	12
III.6- Modelo geológico-genético de la laguna de Fuente de Piedra	13
III.7- Observaciones	14
IV. MEJORA EN LA INFRAESTRUCTURA BÁSICA DE CONTROL HIDROGEOLÓGICO	16
IV.1- Inventario y red piezométrica actual en la cuenca de la Laguna de Fuente de Piedra	16
IV.2- Requisitos para un inventario selectivo en la cuenca de la Laguna de Fuente de Piedra	17

IV.3.- Tareas de inventario complementarias	18
IV.4- Resultado del inventario selectivo	18
V. MODELO DIGITAL DEL TERRENO	23
V.1- Introducción	23
V.2- Selección de MDT base	23
V.3- Inconsistencias del MDT del IGN	23
V.4- Tratamiento de las inconsistencia del MDT del IGN y elaboración del MDT Definitivo	25
VI. DETERMINACIÓN DEL MURO DEL ACUÍFERO MIOCENO SUPERIOR	29
VI.3- Introducción	29
VI.3- Información disponible	29
VI.3- Interpolación mediante el método de Krigin	35
VI.4- Interpolación mediante el método de medias móviles ponderadas	38
VI.5- Conclusión	39
VII. HIDROGEOQUÍMICA	40
VII.1- Introducción	40
VII.2- Actividades y técnicas utilizadas	43
VII.2.1- Análisis de la distribución espacial de la salinidad de las aguas subterráneas: Perfiles de conductividad y temperatura	43
VII.2.2- Ensayos de marcado de la columna de agua	43
VII.2.3- Toma de muestras para análisis químicos e isotópicos	44
VII.2.4- Análisis químicos e isotópicos	44
VII.3- Familias de aguas identificadas	46
VII.3.1- Aguas en los paquetes calizos jurásicos	48
VII.3.2- Aguas de la zona intermedia	48
VII.3.3- Salmuera bajo y alrededor de la laguna	48
VII.3.4- Aguas de zonas situadas fuera de la Cuenca de Fuente de Piedra.	50
VII.4- Datación de las aguas- Resultados de los análisis de tritio	50

VIII. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO PROPUESTAS

52

IX. BIBLIOGRAFÍA

55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1- Laguna de Fuente de Piedra	1
Figura I.2- Pozos inventariados -Base de datos AGMA- y subcuencas hidrográficas	3
Figura I.3- Puntos con columna estratigráfica y geología simplificada	5
Figura III.1- Formaciones geológicas en la cuenca de la Laguna de Fuente de Piedra	8
Figura IV.1 – Red actual de control de las aguas subterráneas	16
Figura IV.2- inventario selectivo: situación global	18
Figura IV3- inventario selectivo: situación de detalle	21-22
Figura V.1- Distorsión del MDT regional por concatenación de los MDT de las hojas 1:2.5000	24
Figura V.2- MDT del IGN: vaso de la laguna y sector de La Albina	25
Figura V.3- Puntos auxiliares para la corrección del MDT del IGN	26
Figura V.4- MDT resultante: vaso de la laguna y sector de La Albina	27
Figura V.5- Modelo Digital de Terreno resultante	28
Figura VI.1- Puntos con información sobre la profundidad del muro del Mioceno Superior	30
Figura VI.2- Puntos con información de apoyo sobre la profundidad del muro del Mioceno Superior	32
Figura VI.3. Variogramas experimentales y teóricos de la <i>informaciones litológica y global</i>	36
Figura VI.4- Interpolación resultante mediante el método de Krigin	37
Figura VI.5- Interpolación resultante mediante el método de las medias móviles ponderadas	39
Figura VII.1.- Puntos visitados en las campañas del año 2003	41
Figura VII.2- Diagrama de Piper mostrando las abundancias iónicas relativas de los diferentes tipos de aguas diferenciados en este estudio	46
Figura VII.3- Variabilidad espacial de la salinidad de la salmuera en el perímetro de la laguna, en TDS (g/l)	49
Figura VII.4. Diagrafía de gamma natural en el sondeo SGOP nº 3 La Herriza	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla IV.1- Puntos resultantes del inventario selectivo. Propuesta de redes de piezometría y calidad	19-20
Tabla VI.1- Puntos con información de la profundidad del muro del Mioceno Superior	30-31
Tabla VI.2- Puntos con información de apoyo sobre la profundidad del muro del Mioceno Superior	33-35
Tabla VI.3. Parámetros de los variogramas experimentales y teóricos de las informaciones litológica y global	36
Tabla VII.1. Características de los puntos visitados en las campañas hidrogeológicas del 2003	42
Tabla VII.2. Composición química de las muestras de agua recolectadas en las campañas de Julio y Octubre de 2003.	47
Tabla VII.3. Contenidos de tritio de las muestras de agua	50

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I. FICHAS DE PUNTOS RESULTANTES DEL INVENTARIO SELECTIVO

ANEXO II.a. FICHAS DE PUNTOS CON INFORMACIÓN LITOLÓGICA

**ANEXO II.b. FICHAS DE PUNTOS DE APOYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL MURO DEL
ACUÍFERO MIOCENO SUPERIOR**

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA NUMÉRICA DE ANÁLISIS Y
CONTRASTE DE LAS DESCARGAS DE LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS A LOS HUMEDALES PARA SU APLICACIÓN EN
LA MODELIZACIÓN DE FLUJO**

**DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DE FLUJO DEL SISTEMA
HIDROGEO-LÓGICO DE DENSIDAD VARIABLE EN
LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA, MÁLAGA**

ANEXOS

Julio de 2004

I- INTRODUCCIÓN

I.1- Breve descripción de la cuenca

La laguna de Fuente Piedra (Figura I.1) posee una cuenca de aportación de aguas superficiales de carácter endorreico, cuya área es de aproximadamente 150 km² -unas 10 veces la superficie de la laguna, 13.5 km²- . La laguna se sitúa en la zona de la divisoria de aguas entre la cuenca del río Guadalquivir – vertiente atlántica- y la cuenca del río Guadalhorce -vertiente Mediterránea-, en el norte de la provincia de Málaga. La Sierra de Mollina (798 m) establece la divisoria de aguas con la cuenca del Guadalquivir y la Sierra de Humilladero (680 m) con la del Guadalhorce. En la región existen numerosas cuencas endorreicas que descargan a lagunas, cuya génesis se considera que es la misma que la de Fuente de Piedra: hundimiento por disolución y colapso de evaporitas, en la clasificación geológico-genética de humedales de Durán y García de Domingo (Durán et al, 2002). Sin embargo, no existe una única hipótesis sobre la génesis de estas lagunas, ni existen datos de campo que impliquen apoyo a ninguna en particular.

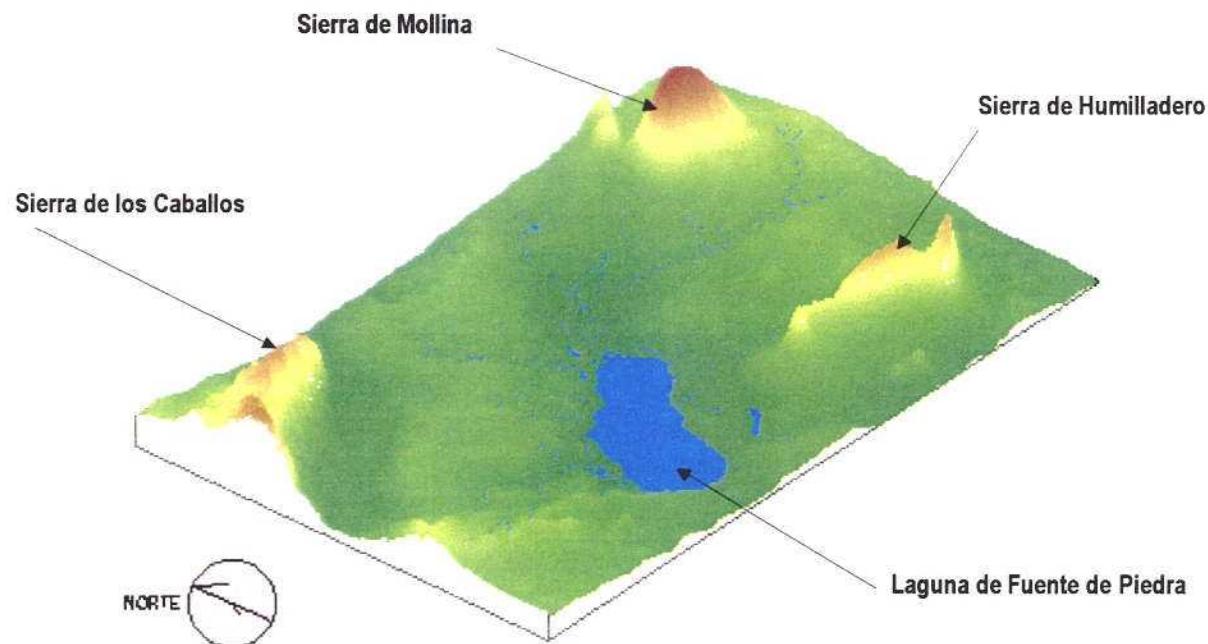


Figura I.1- Laguna de Fuente de Piedra

El sistema hidrogeológico es sumamente complejo. Se considera que su extensión coincide con la de la cuenca superficial y que, como esta, es endorreico, aunque existen indicios que parte de los flujos profundos del sistema se incorporan a flujos regionales que discurren por materiales Triásicos. Estos flujos regionales podrían tener sus descargas en manantiales salinos en la cuenca del río Guadalhorce. Estos sedimentos triásicos, que afloran en distintos sectores de la cuenca, conforman la base de los niveles acuíferos productivos, son ricos en yesos y otros materiales evaporíticos y son susceptibles a karstificarse. La disolución de estos materiales y la interacción roca-agua favorecida por los largos tiempos tránsito son uno de los posibles mecanismos de enriquecimiento en sales de los flujos profundos del sistema hidrogeológico de la laguna. La evaporación en la laguna es la principal salida del sistema, propiciando la acumulación de sales en su superficie -las que históricamente fueron explotadas-. La salmuera subyacente a la laguna alcanza una concentración de sales más de 5 veces superior a la del agua de mar.

Los recursos hídricos de la cuenca se han evaluado entre los 20 a 24 hm³/a, de estos unos 6 hm³/a son de precipitación directa sobre la laguna (Linares, 1990; IGME, 1998). La precipitación media anual y la evapotranspiración potencial media se hallan en torno a los 460 mm/a y 830 mm/a, respectivamente. La distribución interanual de la precipitación presenta una gran variación. Estacionalmente, las lluvias se concentran entre noviembre y febrero. La red hidrográfica en general posee un régimen estacional. La laguna, con la excepción del período húmedo de 1962 a 1971, se seca durante el estiaje. En la cuenca, se sitúan las poblaciones de Fuente de Piedra y Humilladero, que conjuntamente con la vecina población de Mollina se abastecen (0.6 hm³/a, aproximadamente) con aguas subterráneas de la cuenca. La actividad económica preponderante es la agricultura, aunque existe una gran incertidumbre en la estimación de la magnitud de los bombeos asociados a la misma.

La laguna de Fuente de Piedra -declarada Reserva Natural- es uno de los primeros humedales españoles incorporados al Convenio de Ramsar, por ser, después de la Camargue (Francia), el sitio más importante de nidificación de flamencos en el Mediterráneo occidental. En 1982 la laguna fue declarada Refugio Nacional de Caza, incrementándose su protección medioambiental en 1984 al ser considerada Reserva Integral, para, finalmente, establecerse en 1989 la Reserva Natural de la laguna de Fuente de Piedra y ser incorporada al Inventario de Zonas Protegidas de Andalucía.

El primer estudio hidrogeológico de envergadura del medio del sistema acuífero de laguna de Fuente de Piedra fue abordado por el IGME en 1984. Posteriormente ese sistema hidrogeológico fue objeto de tesis doctorales que lo estudiaron tanto en su conjunto (Linares, 1990), como en aspectos parciales (Almecija, 1997) o enmarcados en estudios regionales (Rodríguez, 2002). En 1997/98 se realizó el último estudio integral sobre los recursos hídricos de la cuenca, cuyo objetivo era definir un plan protección de estos recursos (MIMAM-DGOHC, 1999).

El IGME mantiene una presencia relevante y permanente en el estudio de la hidrogeología del sistema acuífero de la laguna. Los primeros trabajos se realizaron hace más de 25 años (IGME, 1975); en 1984 se marcó un hito con el primer estudio integral y específico del sistema (IGME, 1984), en el que se sentaron las bases de los posteriores estudios y hasta el presente proyecto en el que se enmarcan los últimos trabajos de investigación que se exponen en este informe. A lo largo de todo este tiempo el IGME ha oficiado como organismo asesor del Patronato de la Reserva Natural de la Laguna de Fuente Piedra, prestando asesoramiento en la gestión hídrica. Actualmente, en el marco de este proyecto, se desarrollan tareas que atienden a la caracterización adecuada del modelo conceptual del sistema y el establecimiento de redes de observación que permitan un seguimiento –mediante acción concertada con las autoridades de la Reserva Natural- de la piezometría y calidad de las aguas del sistema.

I.2- Motivación del proyecto: objetivo inicial y limitaciones en el conocimiento del sistema

I.2.1- Objetivo inicial

Los humedales son ecosistemas complejos y, a un tiempo, frágiles, donde la gestión hídrica es fundamental en la estrategia conservacionista. En particular, la población de flamencos y el número de pollos de cría de la Reserva Natural es particularmente sensible al nivel de agua en la laguna. Por otro lado, en las aguas subterráneas descansa el abastecimiento a las poblaciones de la cuenca y la demanda agrícola. En este sentido, se detectó que los pozos de abastecimiento, emplazados sobre los afloramientos de calizas jurásicas, pueden haber cambiado el gradiente natural del sistema en su sector, repercutiendo ello en la calidad de las aguas para abastecimiento. Respecto a la demanda agrícola, son hechos constatados la aportación de nitratos al sistema procedentes de los retornos de riego. En suma, sobre el sistema de la laguna concurren múltiples demandas hídricas: la de abastecimiento de la población, la conservacionista de la Reserva Natural, el de los productores agrícolas y el de una incipiente industria de transformación agrícola. Si bien la atención de estas

demandas ya está jerarquizada administrativamente a través de la Ley de Aguas, en una gestión hídrica sostenible de la cuenca el desarrollo de un modelo numérico del sistema hidrogeológico de la misma permitiría contar con una potente herramienta para esta tarea.

El Proyecto tuvo como **objetivo inicial**: el desarrollo de un modelo numérico del sistema hidrogeológico de la laguna de Fuente de Piedra. El fin del modelo era su uso como herramienta de apoyo a la gestión hídrica de la cuenca. Este modelo consideraría al flujo con densidad constante, dado que no existían datos para representar de forma rigurosa la variabilidad espacial de la densidad del flujo.

En pos del objetivo expuesto se realizaron labores de premodelización. Estas demandaron un análisis y estructuración de los datos que contribuyó a identificar las carencias, incertidumbres y requerimientos de actualización del modelo conceptual del sistema hídrico de la Laguna de Fuente de Piedra. Algunas de las carencias de la información ya se presentaron en los primeros trabajos de conocimiento del medio realizados y su magnitud impidió caracterizar un modelo conceptual consistente del sistema hidrogeológico, así como establecer un balance hídrico operativo. A continuación se exponen los aspectos más relevantes de estas carencias.

I.2.2- Limitaciones en el conocimiento: Infraestructura básica

Los puntos de aguas registrados en la base de datos AGMA del IGME en el ámbito de la cuenca y zona inmediata adyacente son 457. Sin embargo, a pesar de lo extenso del inventario la distribución espacial de los puntos es marcadamente desigual. La mayor parte de los pozos inventariados se concentran en la cuenca baja del arroyo Santillán -paraje de Las Albinas- y en la cuenca media del arroyo del Charcón y en el interflujo de ambas cuencas –entorno de Humilladero- (Figura I.2). Las cuencas de los arroyos de La Serafina, Mari Fernández y los Arenales, así como las cuencas endorreicas de las depresiones de La Serafina y El Navazo se caracterizan por la escasez de puntos inventariados (Figura I.2).

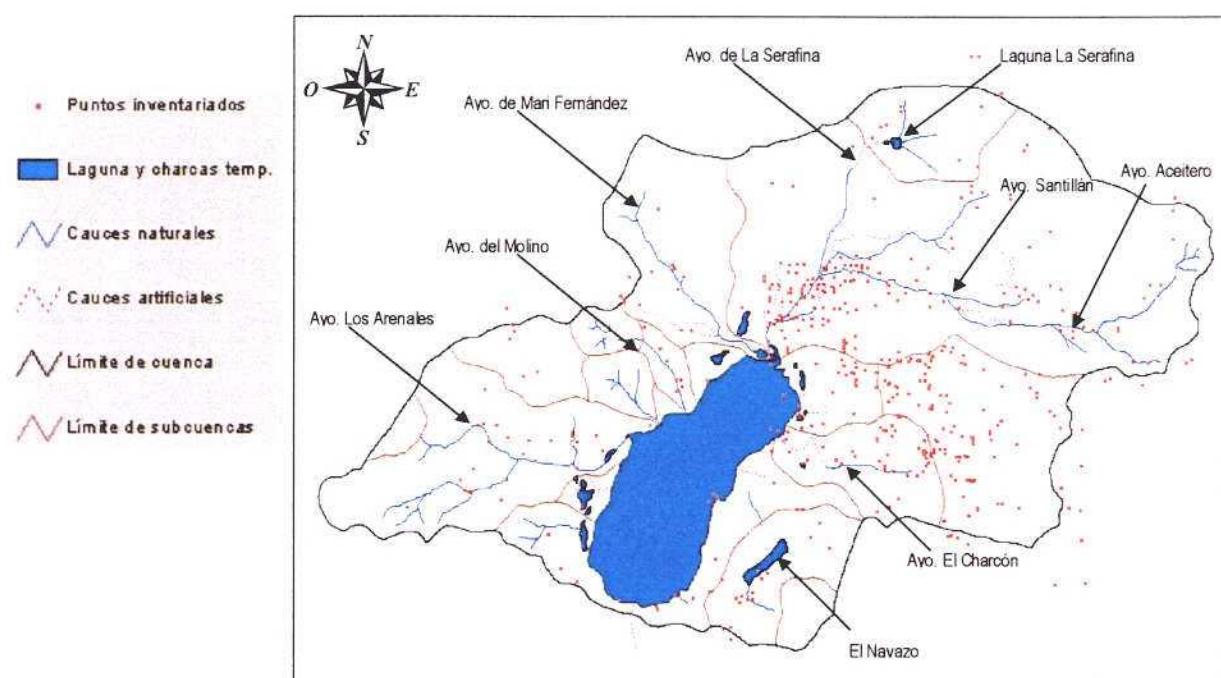


Figura I.2- Pozos inventariados -Base de datos AGMA- y subcuenca hidrográficas

Por otro lado, se desconoce la profundidad del 13 % de los puntos inventariados. Respecto a los restantes puntos, el 42 % tiene una profundidad menor a 10 m -estando muchos de ellos secos- y un 30 % la tiene entre 10 y 20 m. Así, la información piezométrica que ofrecen el 70 % de los puntos corresponde a los niveles acuíferos más superficiales. Ello representa una limitación importante cuando se estudia un sistema como este en que los flujos profundos tiene un carácter destacado. Este rasgo de la información básica también afecta al modelo de flujo que procure representar al sistema, pues la calibración de sus parámetros se ve mediatisada por el carácter somero de los pozos, al proceder el 80% de la información piezométrica de puntos con menos de 20 m de profundidad

I.2.3- Limitaciones en el conocimiento: balance hídrico

En principio, se considera que el sistema hidrogeológico de la laguna tiene como única recarga la originada en la infiltración de la lluvia y los retornos de regadio y como salidas preponderantes la evaporación a través de la laguna y las extracciones por bombeo. Las surgencias históricas se han secado y ocasionalmente asociadas a algún evento tormentoso vuelven a descargar hasta agotarse. Si bien se considera a la cuenca de carácter endorreico, tanto para las aguas superficiales como las subterráneas, es plausible su vinculación con el sistema de flujo regional que descarga al Guadalhorce. En este sentido, varios investigadores señalaron la posibilidad que parte de la descarga de la cuenca se realizaría a través de flujos profundos que se incorporarían al sistema regional. Sin embargo, no procuraron identificar los posibles puntos de descarga regional asociados y, sin ninguna evaluación, consideraron irrelevantes estas posibles salidas, desestimándolas al calcular el balance hídrico.

La casi totalidad de estos pozos se inventariaron en las décadas de los 70 y 80 del siglo pasado. Desde aquella época hasta el presente y en particular en el último lustro, se ha producido una notable modificación en las prácticas agrícolas de la cuenca. El regadio originalmente orientado a cultivos cerealeros se incrementó con riegos de apoyo a importantes extensiones de olivar y vid. Los riegos se realizan exclusivamente con aguas subterráneas y han generado la perforación de numerosos pozos. En contraste, con este escenario los trabajos de investigación realizados asumen que entre el comienzo de la década de los 70 y fines de los 80 las extracciones se redujeron de 7 a 3 hm^3/a , debido "a la mejora de las técnicas de riego". La estimación de 7 hm^3/a se basó en el inventario masivo realizado en esos años, mientras que los 3 hm^3/a se basó en el supuesto antes dicho. Sin embargo, en contradicción con el supuesto expuesto sobre la evolución de las extracciones entre 1973 y 1983 se midió un descenso generalizado niveles que en las zonas de Santillán y La Coneja superaran los 2 m y localmente los 6 m (Linares 1990), secándose muchos pozos someros. Asimismo, en una revisión exhaustiva de las concesiones de aguas otorgadas en la cuenca, estas eran de 9.26 hm^3/a , valor que excede notoriamente una estimación realista de las extracciones (DGOH-CA, 1999).

Finalmente, la descarga subterránea a la laguna, principal salida del sistema, en todos los trabajos hasta el presente, ha sido estimada mediante el cierre del balance y contrastada mediante un balance medio anual del cuerpo de agua. Se considera que dadas las características hidrogeológicas y la gran variabilidad hidrometeorológica del sistema, este procedimiento arroja una gran incertidumbre en la estimación de este componente fundamental del ciclo hidrológico de la cuenca.

I.2.4- Limitaciones en el conocimiento: geología

El modelo geológico de la cuenca se halla sujeto a una importante revisión. Existen dos aspectos que presentan una incertidumbre importante, en el mejor de los casos, o que directamente se desconocen e impiden la caracterización hidrogeológica de la cuenca. Estos aspectos son la geometría de las formaciones y el comportamiento hidrogeológico del Triás.

Respecto a la evolución en profundidad de la geología en la cuenca existen incertidumbres notorias, entre ellas cabe citar la variación espacial de la potencia de los materiales del mioceno superior y de la potencia de los depósitos cuaternarios de la laguna, así como la identificación de las formaciones subyacentes en cada caso. Ambas limitaciones en la información inciden de forma muy negativa al caracterizar el sistema de flujo subterráneo y, en particular, en la gestión de los recursos hídricos susceptibles de explotarse, pues estos se sitúan en su mayor parte en los materiales del mioceno superior. La información dada por las columnas estratigráficas es limitada dado su escaso número -45 en toda la cuenca y en la zona vecina inmediata- y su distribución es heterogénea. Estrictamente, sólo se disponen de 32 columnas que se sitúen en la cuenca (Figura I.3).

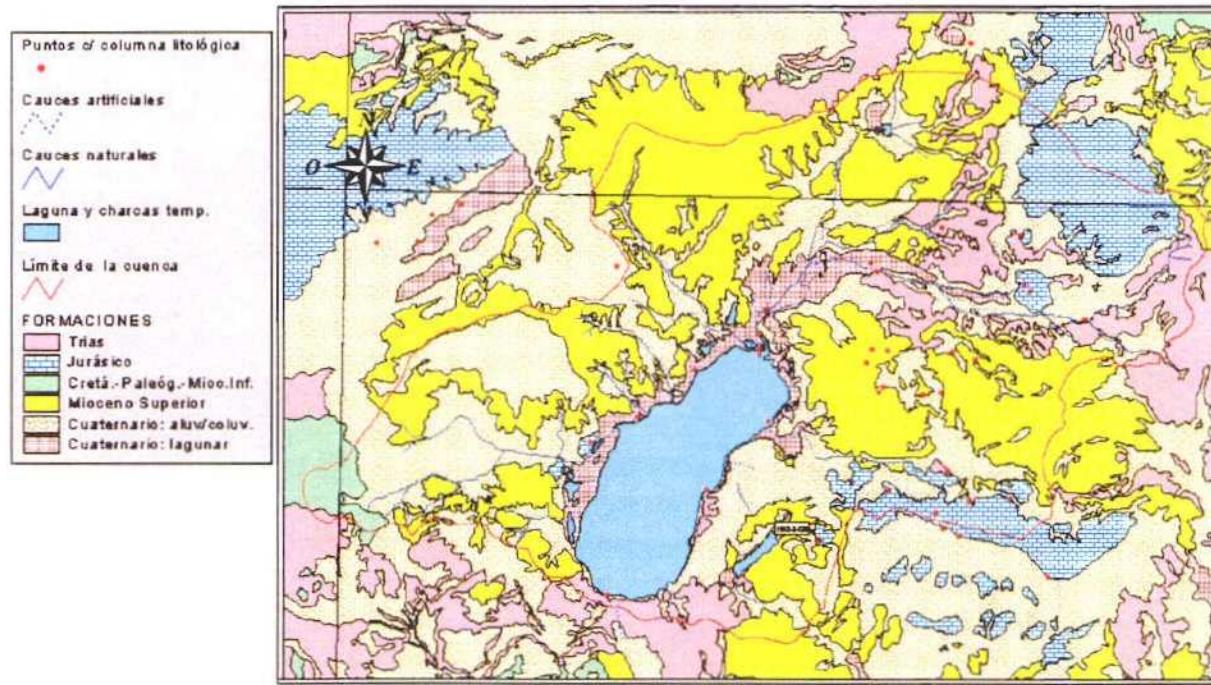


Figura I.3- Puntos con columna estratigráfica y geología simplificada

Otro aspecto del modelo conceptual que requiere ser investigado es el desarrollo kárstico de los sedimentos Mioceno donde se han retrabajado los materiales de origen triásico. Esta karstificación y su desarrollo espacial incidiría en la existencia de flujos profundos en el sistema, en la zona de la laguna -en particular- y en la eventual vinculación del sistema de la cuenca con el flujo regional. La presencia de flujos verticales ascendentes explicaría la movilización de sales disueltas, tanto desde niveles profundos como desde otros más someros. Sin embargo, no ha existido hasta el presente constatación fehaciente de estos flujos verticales. Tampoco existía, hasta las actuaciones realizadas en este proyecto, datación de las aguas subterráneas. El conocer los tiempos de residencia de las aguas permite diferenciar los flujos de circulación más rápida ya sea por discurrir más superficialmente o por vías preferentes profundas de los sectores del acuífero donde el tiempo de renovación de las aguas es mayor. La carencia de esta información impide, en rigor, validar el actual modelo conceptual del sistema. Cubrir esta información permitiría tanto evaluar si existe un control litológico en el flujo de la zona de estudio, como validar el origen y el mecanismo de salinización de la laguna.

Asimismo, si bien existen estudios sobre la evolución espacial y temporal de la concentración de la salmuera en el perímetro de la laguna (Benavente et al, 1993, Benavente, Rodríguez y Almeida, 2003), se desconoce su evolución en el vaso de la misma o en profundidad. Esta carencia en el conocimiento

afecta en particular a la definición del modelo hidrogeológico conceptual. Así, si bien se acepta que la descarga a la laguna y la posterior evaporación del agua es prácticamente la única salida del sistema, la existencia de flujos ascendentes verticales en su vaso no se encuentra validada por ningún dato de campo. Igualmente, resulta de interés determinar si, procedentes de la cuenca de la laguna, existen aportaciones a flujos profundos de carácter regional que pudieran descargar en puntos situados fuera de la cuenca y, si los hubiera, conocer su magnitud.

I.2.5- Limitaciones en el conocimiento: topografía

La nidificación de los flamencos en la laguna -principal objetivo de la gestión del recurso en la cuenca- puede verse afectada por variaciones centimétricas en la lámina de agua en el vaso. Debido a ello, una correcta gestión de los recursos hídricos con un objetivo conservacionista debe contar con el auxilio de una nivelación del vaso con una sensibilidad de orden análogo al requerido en la gestión.

Existen tres Modelos Digitales del Terreno, MDT, que comprenden el vaso de la laguna así como su cuenca de aportación. Uno de los mismos fue desarrollado por la Junta de Andalucía, se haya definido en una malla de 20 m de paso y corresponde a la restitución de la información soportada por la Hojas 1:50.000 del Instituto Geográfico Nacional, IGN, este MDT presenta errores superiores a 9 m en el vaso de la laguna y posee una sensibilidad de orden métrico. Otro MDT fue desarrollado por el IGN, se haya definido en una malla de 25 m de paso, se basa en la digitalización de la cartografía 1:25.000 del propio IGN, posee una sensibilidad altimétrica de orden métrico y los errores en el vaso de la laguna pueden alcanzar los 9 metros, aunque no lo superan. Finalmente, en el marco de una tesis doctoral (M. Rodríguez, 2002) se presentó un MDT de la cuenca definido por 4548 nodos y para el que se hace referencia que su información procede de una cartografía 1:10000. Respecto a este último modelo se ignora la magnitud del paso de malla, aunque se supone que es de 200 m, y en cuanto a la cartografía de origen se desconoce toda referencia al organismo que la compuso, así como la precisión con que se interpoló la misma.

La Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía realizó una restitución fotogramétrica del vaso de la laguna y de un sector de la cuenca. La cartografía digitalizada resultante adolece de falta de precisión, aunque se desconoce la magnitud del error (M. Rendón, comunicación personal). Los trabajos de apoyo comprendieron la determinación planialtimétrica de la posición de los puntos de apoyo necesarios para la restitución fotogramétrica. El fango en el vaso de la laguna impidió la nivelación geométrica del mismo, debido a ello sólo se pudo nivelar un perfil longitudinal de la laguna y así como puntos singulares alrededor.

III. SÍNTESIS GEOLÓGICA

III.1. Introducción

Geológicamente, la cuenca de la Laguna de Fuente de Piedra se sitúa en el ámbito de las zonas externas de las Cordilleras Béticas en el Dominio Subbético. Las zonas externas de la cordillera bética están formadas por materiales mesozoicos y cenozoicos, en su mayor parte de origen marino, depositados en una cuenca sedimentaria y representan un intervalo de tiempo que va desde el Triás hasta el Mioceno (Figura III.1). Estructuralmente se trata de un olistostroma a gran escala en el que se constata que las grandes unidades subbéticas, formadas fundamentalmente por materiales jurásicos y cretácicos, están implicadas en el mismo, constituyendo lo que se podría llamar el Complejo Olistostómico Subbético (Pérez-López y Sanz de Galdeano, 1994). El olistostroma es el producto de la resedimentación en masa de los materiales subbéticos (sobre todo, pero no exclusivamente, triásicos) en la depresión del Guadalquivir, a consecuencia del apilamiento de unidades alóctonas subbéticas y su deslizamiento gravitacional provocado por los esfuerzos orogénicos, durante el Mioceno medio principalmente.

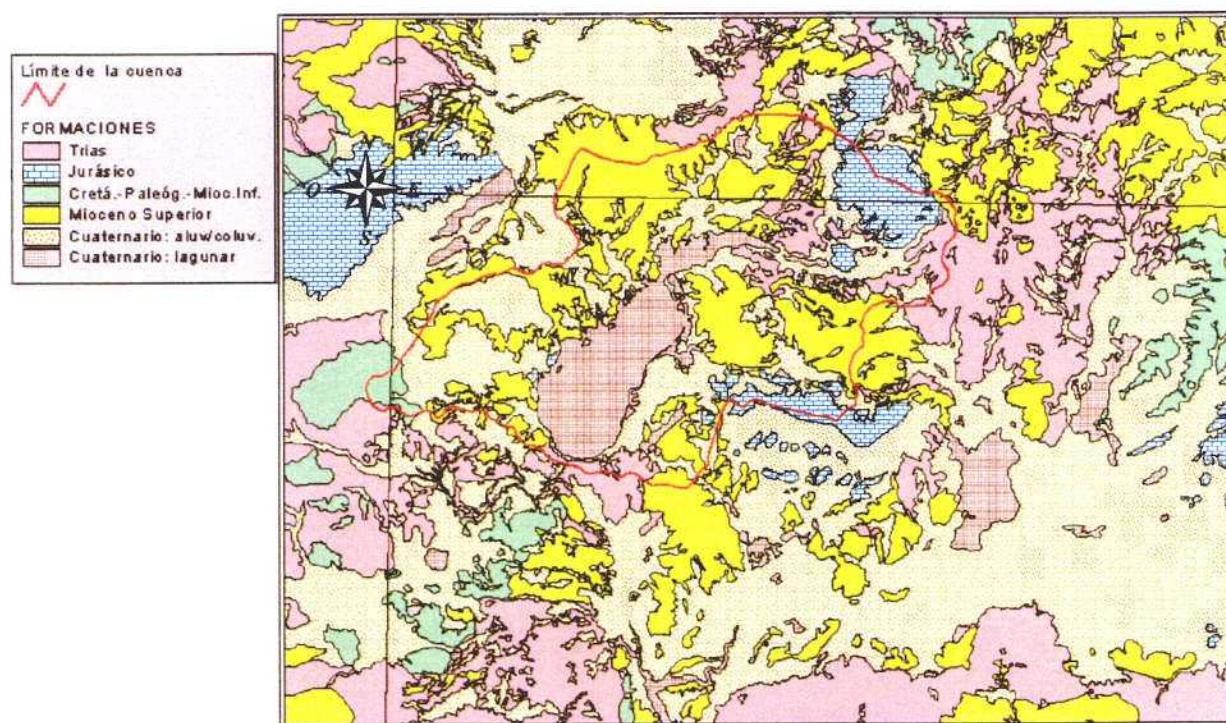


Figura III.1- Formaciones geológicas en la cuenca de la Laguna de Fuente de Piedra

En los siguientes apartados del capítulo se describen las características litoestratigráficas, tectónicas, geomorfológicas e hidrogeológicas de los materiales presentes en la zona de estudio.

III.2. Características litoestratigráficas

III.2.1 Formaciones Triásicas

Tradicionalmente estas formaciones han sido denominadas como el *Triás subbético indiferenciado*, también conocido como *Triás de Antequera*, constituido por arcillas, margas, arena y yesos con

II. OBJETIVO

Habida cuenta del estado del conocimiento del medio se fijó como objetivo principal del Proyecto el avanzar en la caracterización del sistema hidrogeológico de la Laguna de Fuente de Piedra, en pos de poder definir un modelo conceptual consistente.

Se procurará que el modelo conceptual considere la variación de la densidad del sistema de flujo y la influencia sobre el patrón de flujo y el balance hídrico del sistema. Este requerimiento responde a la necesidad de desarrollar un modelo numérico del sistema que contemple la variación de la densidad del flujo. El modelo deberá contribuir mediante la simulación de escenarios de estudio a establecer una gestión sostenible de la cuenca.

Los resultados que se obtendrán de la consecución del objetivo propuesto también ofrecen una contribución importante para:

- Caracterizar los flujos regionales profundos que discurren por los sedimentos de origen triásicos, tanto movilizados durante el Mioceno como los considerados autóctonos.
- Identificar la divisoria de las aguas subterráneas entre las vertientes mediterránea y atlántica en el noroeste de la Provincia de Málaga.
- Obtener indicios que permitan explicar consistentemente la génesis de las lagunas endorreicas existentes en la divisoria de las cuencas del Guadalquivir y las de vertiente mediterránea, en el norte de la provincia de Málaga.

Por otro lado, en el marco de este Proyecto se realizó, en Febrero del 2003, una Jornada Taller sobre la “*Hidrogeología de los sedimentos triásicos y su control sobre los sistemas lagunares del norte de la provincia de Málaga*” a la que concurrieron destacados investigadores de las Universidades de Granada, Málaga, Sevilla, Almería y Politécnica de Cataluña; consultores privados y técnicos de la Confederación Hidrográfica del Sur; así como investigadores y técnicos del IGME. Esta reunión se organizó con el apoyo de las autoridades de la Reserva Natural de la Laguna de Fuente de Piedra.

En el Capítulo III se presenta una síntesis de la geología de la cuenca considerando el marco regional. En los capítulos IV al VII se comentan las actuaciones específicas que se efectuaron en pos de un avance en el conocimiento del medio; así, en el IV se describen las actuaciones realizadas para mejorar la infraestructura básica de control hidrogeológico; en el V se comenta el desarrollo del modelo digital del terreno de la cuenca y sus mejoras respecto a los existentes; en el VI se expone la determinación del muro del acuífero correspondiente al mioceno superior -el de mayor trascendencia en la gestión hídrica de la cuenca- que se determinó a partir de la información litológica y en el VII se comentan las campañas de hidroquímica e isótopos ambientales que se ejecutaron en la cuenca. Finalmente, en el capítulo VIII se exponen las conclusiones obtenidas y proponen las propuestas de trabajos a realizar.

bloques de dolomías, brechas dolomíticas, calizas, carniolas y ofitas. En los apartados siguientes se discute sobre la idoneidad de considerar a gran parte de ellos como formaciones resedimentadas en el Mioceno.

Ahora bien, aunque estas unidades triásicas subbéticas tienen una estructura compleja y caótica, algunos trabajos han intentado establecer una serie de formaciones litoestratigráficas incluidas en el conjunto. Pérez-López y Sanz de Galdeano (1994) estudiaron la estructura de los materiales triásicos subbéticos centrales en varios sectores, entre los que se incluye el de Jauja (Córdoba), situado a una decena de kilómetros al norte de la Sierra de Mollina.

En ellos distinguen una serie de unidades litoestratigráficas que de más antigua a más moderna son:

- una formación carbonática constituida por calizas del Muschelkalk de edad Ladinense (Fm. Majanillos);
- cuatro formaciones detrítico-evaporíticas del Keuper (Keuper de Jaén);
- otra formación carbonática de edad Noriense (Triásico Superior) denominada Fm. Zamoranos que siempre forma parte de la megabrecha;
- e igualmente se han diferenciado los materiales correspondientes a una “megabrecha” de edad Mioceno medio, de naturaleza olistostómica, que está constituida predominantemente por materiales de facies triásicas (yesos con arcillas) que generalmente engloba a las formaciones triásicas anteriores, aunque contiene también olistolitos de materiales jurásicos, cretácicos y terciarios a la que denominaron Complejo Olistostómico Subbético.

De los estudios realizados en varios sectores (Pérez-López y Sanz de Galdeano, 1994; Pérez-López y Pérez-Valera, 2003) se desprende que no existen grandes afloramientos en los que se pueda observar, de forma continua, la sucesión estratigráfica de los materiales triásicos, existiendo conjuntos de facies homogéneas como arcillas y margas yesíferas, que no puede saberse si se trata de masas deslizadas en bloque o superpuestas estructuralmente o si son simplemente materiales resedimentados durante el Neógeno. Particularmente, en el sector de Jauja, la mayoría de los materiales del Triás constituyen un megaconglomerado o megabrecha arcillo-yesífera, en el que aparecen englobadas las formaciones triásicas reconocidas.

En el sector de Antequera se han encontrado microfósiles del Terciario en la matriz de la megabrecha por lo que muchos de estos afloramientos de “facies triásicas” son del Terciario. Igualmente diferencian otras facies triásicas de yesos que pudieran no pertenecer a la megabrecha. Esto apunta a que podrían considerarse dos tipos de facies triásicas (yesos y arcillas), las que han sufrido resedimentación y deslizamiento y que se encontrarían en una posición estructural superior y las inferiores que no han sido retrabajadas. Algunos indicios apuntan a la presencia de fenómenos de diapirismo que pueden haber afectado a ambas como la presencia de espesores importantes, del orden de centenares de metros, de halita que pueden estar asociados a facies del Buntsandstein y del Keuper cortados por sondeos en la zona de Bobadilla y manantial de Meliones.

III.2.2- Formaciones Jurásicas

Están constituidas por dolomías brechificadas de espesor muy variable entre 100 y 250 m. Sobre estos niveles dolomíticos afloran calizas con un espesor de unos 200 metros aunque pueden alcanzar los 500 m. La edad del conjunto calcáreo abarca desde el Lías inferior al Lías medio y está representado en las sierras de Mollina y Humilladero donde estos materiales constituyen la cumbre de las mismas.

III.2.3- Formaciones Cretácicas

Al nordeste del núcleo urbano de Alameda y en el extremo suroeste de la cuenca afloran materiales cretácicos constituidos por margas y margocalizas blancas que pasan hacia techo a margocalizas y margas de tonos rosados.

III.2.4- Formaciones Terciarias

III.2.4.1- Unidad Olistostómica o Complejo Olistostómico Subbético

García Cortés et al. (1991) observan la existencia de una formación de marcado carácter olistostómico y de edad comprendida entre el Langhiense superior y el Serravallense Medio (Mioceno medio) en el Sector central de las Cordilleras Béticas denominada Unidad Olistostómica del Mioceno Medio que se extiende desde el sector central de la Cordillera hasta el extremo nororiental de la provincia de Alicante.

Debido al predominio de materiales triásicos en su composición, esta unidad venía siendo cartografiada como Triás y denominada corrientemente como el complejo del *Triás de Antequera* de facies germano andaluza. Existen extensos afloramientos cartografiados como triásicos en numerosos mapas geológicos (Mapa Geológico 1:50000 de Antequera, Benalmádena etc.), que en sentido estricto, no pueden ser considerados propiamente triásicos, dado que no forman sucesiones estratigráficas organizadas. Más bien al contrario, constituyen una enorme megabrecha de materiales redepositados mayoritariamente arcilloso-yesíferos triásicos intensamente fragmentados, pero que incluye además fragmentos de otros materiales entre los que destacan formaciones mesozoicas y terciarias subbéticas.

La presencia mayoritaria de material triásico (yesos y arcillas y en menor proporción dolomías), así como las malas condiciones de afloramiento y el aspecto extraordinariamente caótico en campo han sido determinantes para que esta unidad litoestratigráfica se atribuyera tradicionalmente al Triás. Sin embargo se trata de una unidad sedimentaria, con facies características de flujo de masa (debris flow) y con fenómenos de deslizamientos sinsedimentarios (slumping).

La génesis propuesta hasta el momento para estas unidades redepositadas está asociada dos procesos que se establecerían simultáneamente:

- El levantamiento de las zonas externas, cuyo rápido e intenso desmantelamiento suministraría el material necesario, que debido a su gran plasticidad, caería con abundantes fenómenos de transporte en masa a una cuenca subsidente.
- Los fenómenos diapíricos considerados por Pérez-López y Pérez-Valera (2003) como el factor principal de la resedimentación de estas facies Triásicas se producirían durante el Terciario.

En el entorno de la cuenca de la laguna se reconocen varios afloramientos la Unidad Olistostómica. Esta la constituye una megabrecha en la que predominan los materiales triásicos resedimentados con una matriz arcillosa-lutítica de coloraciones heterogéneas que rodea a un conjunto de bloques de diferente tamaño y naturaleza siendo su aspecto totalmente caótico. El espesor es variable y debido a su complejidad sedimentaria es difícil de medir aunque debe de sobrepasar los 500 m de potencia.

III.2.4.2- Mioceno superior

El Mioceno Superior postorogénico que aflora ampliamente en la cuenca de la laguna de Fuente de Piedra y constituyen los materiales dominantes. Estos descansan discordantemente sobre la Unidad Olistostómica fosilizando un relieve preexistente. Las litologías presentes son arenas, calcarenitas bioclásticas y margas depositadas sobre un paleorrelieve. Sus espesores son variables, pudiendo

alcanzar los 100 metros.

III.2.5- Formaciones cuaternarias

Los depósitos cuaternarios en la zona están formados por:

- cantes de calizas y calcarenitas, arcillas y arenas con canto y arcillas arenosas asociadas a glaciares de ladera, conos aluviales, coluviones y depósitos de canchales.
- Cantes redondeados de caliza en una matriz arenosa o margoarenosa o arcillosa, arenas, arcillas y limos asociados a depósitos de sistemas fluviales como terrazas, llanuras de inundación y aluviales y fondos de valle.
- Costras, arenas y arcillas rojas asociadas a superficies.
- Arcillas, arenas rojas, margas y limos orgánicos asociados a depósitos de zonas deprimidas como rellenos de depresiones, zonas de encarcamiento ocasional y niveles de terraza lagunares.
- Fangos arenosos y corteza salina depositados en el fondo de la laguna y en las charcas.

III.3- Características tectónicas

La región de Antequera ha sido estudiada por varios autores como Peyre (1974) que indica que los afloramientos jurásicos de las Sierras de Mollina y Humilladero son una especie de isletas que flotan sobre el Triás y que representan los restos de una cobertura primitiva continua, despegada de su substrato, erosionada parcialmente y que ha sufrido despegues internos.

Actualmente la concepción estructural vigente considera estas sierras como bloques incluidos dentro de la unidad Olistostómica cuya matriz está datada como Mioceno medio (García Cortés et al. 1991). Esta hipótesis conceptual permite suponer que los bloques no se encuentran enraizados y justifica que cada bloque presente una disposición diferente a la originalmente establecida, tanto tectónica como estratigráficamente. Posteriormente estas unidades han sufrido resedimentaciones y desplazamientos relativos que han marcado sus características estructurales actuales y su emplazamiento paleogeográfico definitivo.

La tectónica de la zona está condicionada por la presencia del Triás que ha dado lugar a desplazamientos tectónicos, deformaciones por transformación yeso-anhidrita, disolución de materiales evaporíticos y movimientos halocinéticos. Esto ha dado lugar a la existencia de facies resedimentadas de naturaleza olistostómica y facies diapiricas. Pérez-López y Pérez-Valera (2003) señalan que la presencia de bloques del Jurásico, Cretácico o Terciario podría deberse bien al arrastre de los materiales diapiricos en su ascenso, o al deslizamiento de algunos bloques procedentes de los mantos. Los ascensos diapiricos se debieron dar antes, durante y después de los movimientos orogénicos alpinos. Las facies olistostómicas podrían estar mezcladas con facies de origen diapirico.

Estos autores finalmente proponen que el empuje ascensional de los materiales diapiricos Triásicos junto con la existencia de fallas regionales y la tectónica de mantos son los responsables de la existencia en superficie de la "megabrecha triásica" del Terciario.

Los depósitos postorogénicos (mioceno superior, plioceno y cuaternarios) se depositaron en una cuenca estructurada después de las fases de deformación principales de la orogenia alpina y se disponen discordantemente. Por ello, se presentan prácticamente horizontales, aunque solo ocasionalmente en los contactos con la Unidad Olistostómica, se observan buzamientos importantes debidos a procesos halocinéticos. Estos procesos de extrusión diapirica supuestamente delimitados por

fallas inversas, verticalizan las capas de los materiales adyacentes.

Los materiales postorogénicos han sido igualmente afectados localmente por deformaciones neotectónicas muy importantes (Martín Algarra, 1991). En varias zonas al este de Antequera se han cartografiado un cabalgamiento frontal acompañado de una amplia superposición de los materiales arcilloso-yesíferos subbéticos sobre las calcarenitas del Mioceno superior como se observa al sureste de la hoja geológica 1:50.000 nº 1023 de Antequera (IGME, 1986).

III.4- Características geomorfológicas

La zona de estudio se encuentra afectada por procesos kársticos desarrollados sobre los materiales calcáreos jurásicos y cretácicos de las sierras y sobre los materiales evaporítico-salinos de la Unidad Olistostrómica Miocena.

Parece aceptado que la génesis de la laguna de Fuente de Piedra estaría asociada al desarrollo de un sistema kárstico sobre la Unidad Olistostrómica Miocena o sobre materiales triásicos infrayacentes no resedimentados que afectaría al conjunto yesífero-salino. Los fenómenos kársticos se desarrollarían en las zonas donde estos niveles de yesos resedimentados alcanzasen espesores suficientes. Sin embargo, se debe observar que se desconoce la estructura en profundidad en la zona de la laguna.

La matriz formada por brechas yesíferas y arcilloso-yesíferas carece generalmente de estructura interna (brecha formada por amasijos desorganizados y heterométricos de cantos empastados en arcillas y yesos). Sin embargo, en otros casos se constata que poseen una cierta disposición en capas, que aunque pudiera tratarse de una estratificación de origen sedimentario, también podría tratarse de una foliación de origen tectónico. Estas rocas se encuentran notablemente karstificadas: en su interior existen un gran número de simas y cavidades, una buena parte de las cuales son penetrables y han sido exploradas por espeleólogos (Martín Algarra, 1991).

La matriz de esta unidad también presenta rocas carbonatadas compuestas principalmente por dolomías y calizas, probablemente de la Formación Zamoranos, y por ofitas muy alteradas que son rocas ígneas de origen subvolcánico. Las dolomías y calizas constituyen afloramientos discontinuos, conformando características peñas o grupos de peñascos; ejemplo de ello se pueden observar en el centro de interpretación de la Reserva Natural, en la costa de la laguna en la noria del Ancón y en las proximidades del manantial de Cañaveralejo.

III.5- Características hidrogeológicas

Durán et al. (2001) describen dos modelos geológicos conceptuales en acuíferos kársticos en el norte de la provincia de Málaga que son:

- “de bloque”, se caracteriza por la presencia de bloques más o menos rígidos de naturaleza olistostrómica, de distintas litologías, edades y tamaños, flotantes o englobados en una matriz fundamentalmente lutítico-evaporítica
- “paraautóctono”, extensiones de unidades con deformación interna dúctil y frágil, pero que presentan una continuidad lateral apreciable en superficie y en profundidad.

El modelo conceptual de bloques es el que puede asimilarse en la zona de estudio a la relación de las sierras de Mollina y Humilladero con la Unidad Olistostrómica Miocena. Las implicaciones hidrogeológicas que conlleva este modelo es que cada afloramiento carbonatado representa un acuífero aislado por límites estratigráficos y tectónicos con una geometría cuyo espesor es mucho mayor que su extensión espacial. Por ello, al considerar que los afloramientos jurásicos de estas sierras conforman uno (Sierra del Humilladero) o varios bloques (Sierra de Mollina) pueden definirse

como estructuras hidrogeológicas cerradas, limitadas por la matriz de la unidad olistostrómica muy poco permeable y aislados en profundidad.

Por ejemplo, al sur de la sierra de Humilladero se observan varios afloramientos de calizas y dolomías jurásicas que constituyen lomas aisladas como Los Cerrillos. Estos afloramientos constituyen bloques de pequeña entidad, que dan lugar a microacuíferos con escasa capacidad de almacenamiento aunque en la cartografía MAGNA (IGME, 1982) estos afloramientos se unen a la sierra de Humilladero.

III.6- Modelo geológico-genético de la laguna de Fuente de Piedra

La génesis de la laguna y de la propia cuenca deben relacionarse sin duda con procesos kársticos de disolución y subsidencia de los materiales evaporíticos triásicos. Como apuntan Linares y Rendón (2001) los materiales triásicos detrítico-evaporíticos presentan una morfología kárstica desarrollada. La presencia de numerosas y espectaculares formas exokársticas es muy característica, fundamentalmente torcas y dolinas formadas por colapso de cavidades próximas a superficie. Las circunstancias topográficas, hidrológicas e hidrogeológicas unidas al desarrollo de los procesos kársticos, han originado estos fenómenos de endorreísmo propicios para la instalación del humedal.

Otra hipótesis, relacionada con la anterior, explicaría el proceso de formación del sistema lagunar según el modelo genético de los Monegros definido por Sánchez Navarro (1989). A la evolución de los procesos kársticos se añade la continua evaporación desde la superficie freática que induce un flujo subterráneo convergente hacia la laguna. Se produce una especie de drenaje impedido puesto que el flujo subterráneo no drena las aguas y no se evacuan las sales, y al contrario, los flujos ascendentes aportan más sales a la laguna formándose superficies planas típicas de los medios tipo playa o sebkas.

Las aguas de elevada salinidad son debidas a dos situaciones hidrogeológicas diferentes que en el caso de la Laguna de Fuente de Piedra parecen darse conjuntamente:

- Una es el flujo subterráneo a través de materiales evaporíticos de origen triásicos karstificados, que da lugar a aguas cargadas en sales como el caso de manantiales salinos como el de Meliones.
- Otro mecanismo se debe al carácter endorreico de la laguna, al producirse procesos de concentración evaporativa provocando que aguas de salinidad moderada puedan evolucionar hasta salmueras.

La gran incógnita es determinar la existencia de esos flujos regionales convergentes hacia la laguna una vez que parece establecerse una relación entre la litología y el origen de las lagunas.

Aunque los materiales triásicos se han considerado tradicionalmente como el substrato impermeable a escala regional, pueden comportarse localmente como permeables a causa de los procesos kársticos desarrollados en los materiales evaporíticos. Linares (1990) admite que en la zona de Fuente de Piedra parece que al menos la zona más superficial del Triás podría estar afectada por los fenómenos kársticos y producirse a través de ella, circulación subterránea. Por el contrario la zona más profunda actuaría como nivel de baja permeabilidad donde probablemente no existiría karstificación permitiendo el estancamiento de las aguas por encima de un determinado nivel. Concluye asumiendo que el flujo subterráneo en la zona más próxima a la superficie sería convergente hacia la laguna, mientras que a mayor profundidad podría existir un flujo hacia otras zonas a cota más baja.

El carácter "permeable" de estos materiales y la complejidad de este "acuífero" se pone de manifiesto en un estudio realizado por el CEDEX en el manantial de Meliones situado junto al embalse del Guadalhorce a una decena de kilómetros al sur de la laguna de Fuente de Piedra. Algunas de las conclusiones obtenidas fueron:

- Se demostró mediante una experiencia realizada mediante la inyección de un trazador en un sondeo de más de 200 m de profundidad que existe una comunicación hidráulica relativamente rápida (10 m/h) entre los niveles profundos de este sondeo y el manantial situado a más de 500 m de distancia. En cambio, una experiencia similar realizada en otro pozo a unos 200 m del manantial dio un resultado negativo.
- El agua que afloraba por el manantial en el momento de realizar el estudio procedía, casi en su totalidad, de las precipitaciones de los últimos años con lo que se estima que la contribución de las aguas más antiguas era muy pequeña por lo que cabe preguntarse en este caso por la existencia de flujos regionales profundos.
- Entre los sondeos existentes en la zona de estudio en los que se han llevado a cabo las experiencias de trazado con trazadores artificiales fluorescentes (rodamina B y uranina), sólo algunos de ellos han interceptado el flujo subterráneo que aflora por el manantial. Esto sugiere que este flujo se encuentra muy localizado. Además, el hecho que un sondeo alejado a más de 4 km. de la surgencia haya interceptado este flujo sugiere una contribución importante al mismo del agua infiltrada en las dolinas y sumideros de la zona donde se encuentra dicho sondeo.

Parece claro que las sales disueltas en las aguas de los manantiales como Meliones y Cañaveralejo proceden de este conjunto tectónico formado en gran parte por materiales evaporítico-salinos. Como se apuntó anteriormente se destaca la presencia en profundidad de centenares de metros de halita en el triás atravesados en los sondeos realizados al sur de Bobadilla que pondrían de manifiesto el carácter diapírico de los materiales triásicos.

III.7- Observaciones

Aunque parece aceptada la relación geológico-genética de la formación del humedal con los materiales arcilloso-evaporíticos que forman parte de la matriz de la Unidad Olistostrómica, aún queda por poner de manifiesto algunos aspectos como:

- Reconocer el sustrato geológico sobre el que se sitúa el humedal. Ya se apunta por parte de Benavente et al. (2003) este desconocimiento pudiéndose solucionar mediante la realización de un sondeo profundo en el interior del mismo.
- Determinar si la estructura de estos materiales yesífero-arcillosos es la descrita generalmente como “compleja o caótica” o presenta localmente un grado de “competencia” y “continuidad” necesaria como soporte para el desarrollo y evolución de un complejo kárstico evaporítico.
- Determinar la existencia en profundidad de materiales salinos de naturaleza diapírica

Se desconoce si existen trabajos de detalle de cartografía geológica y tectónica en la zona del humedal que pongan de manifiesto por ejemplo, la distinción entre facies triásicas resedimentadas y materiales triásicos, o entre facies diapíricas y el resto de materiales triásicos.

En principio parece evidente la necesidad de aplicar alguna técnica geofísica de superficie para intentar establecer distinciones y relaciones entre materiales geológicos e incluso sobre posibles estratificaciones verticales de aguas de distinta salinidad en la proximidad del humedal. Sin embargo, los únicos trabajos de geofísica de los que se tiene conocimiento son los realizados por IBERGESA en 1983 por encargo del IGME y que consistieron en una campaña geoeléctrica en los alrededores de la laguna. El número total de SEV fue de 63, distribuidos en 11 perfiles de rumbo noroeste-sureste. La campaña se planteó acertadamente al ubicar los perfiles; sin embargo, las interpretaciones fracasaron por falta de contraste.

Aunque parece obvio el establecimiento de una relación entre los materiales evaporíticos y el origen de las lagunas y de parte de la salinidad de sus aguas, no puede determinarse por el momento desde el punto de vista exclusivamente litoestratigráfico la existencia de flujos regionales profundos convergentes hacia la laguna.

La existencia de manantiales salinos importantes como Meliones y Cañaveralejo al sur de la cuenca de Fuente de Piedra que surgen en estos materiales arcilloso-yesíferos, parecen relacionarse más con puntos o zonas de especial complejidad estructural que los afectan (fallas, retrocabalgamiento del “Trías” sobre los materiales del Complejo del Campo de Gibraltar y cabalgamientos frontales sobre las calcarenitas del Mioceno superior) y con la existencia de un desarrollo diapírico salino asociado. Estas vinculaciones no son tan evidentes en la zona de Fuente de Piedra.

En la cuenca de Fuente de Piedra los materiales aflorantes más ampliamente representados son las calcarenitas, arenas y conglomerados del Mioceno superior que presentan una alta permeabilidad. Aunque la importancia de los materiales del “Trías” en el modelo geológico-genético del humedal es determinante, no se han de menospreciar los aportes de flujos subterráneos a través de las formaciones miocenas y jurásicas, importantes para la descripción del modelo de funcionamiento hidrogeológico del humedal. Además deben considerarse los posibles aportes provenientes de flujos regionales de gran recorrido exteriores al sistema, cuya existencia está aún por determinar. Como se ha apuntando para el caso de Meliones por Martín Algarra (1991), cabe pensar en una circulación de aguas subterráneas a través de las calcarenitas miocenas en profundidad ascendiendo debido a accidentes tectónicos relacionados con el “Trías” más karstificado, además de la posible alimentación sobre los materiales arcilloso-evaporíticos.

IV. MEJORA EN LA INFRAESTRUCTURA BÁSICA DE CONTROL HIDROGEOLÓGICO

IV.1- Inventario y red piezométrica actual en la cuenca de la Laguna de Fuente de Piedra

El actual inventario en la cuenca de la laguna registra 457 puntos de agua (ver Figura I.2), en su gran mayoría fueron registrados en campañas ejecutadas en la década de los 70's y a comienzo de los 80's del pasado siglo. Entre los inventariados, los sondeos profundos (>40 m) son menos del 10 % y los puntos con información litológica son sólo 22, el 4%. Los datos sobre extracciones que contiene el inventario son escasos, por otro lado los profundos cambios acaecidos en la cuenca en cuanto al uso agrícola del suelo y su labor, lleva a la obsolescencia de la mayor parte de dicha información. Asimismo, actualmente existe una red de control de las aguas subterráneas tanto piezométrico como de calidad, su seguimiento es realizado por las autoridades de la Reserva Natural y los datos registrados se transfieren a la base de datos del IGME. Esta red, que está constituida por 57 puntos de agua, cubre adecuadamente la zona centro de la cuenca y el entorno de la laguna, pero posee escasos puntos en el noroeste, oeste, este y sureste de la misma (Figura IV.1). Esta heterogeneidad espacial no es el único aspecto de la red que se halla condicionado por las características de los puntos inventariados, así el 81% de los puntos tiene menos de 20 m y sólo 8 % supera los 50 m. Sólo de algunos de estos puntos se muestran hidroquímicamente a lo largo del año y ninguno de ellos supera los 18 m.

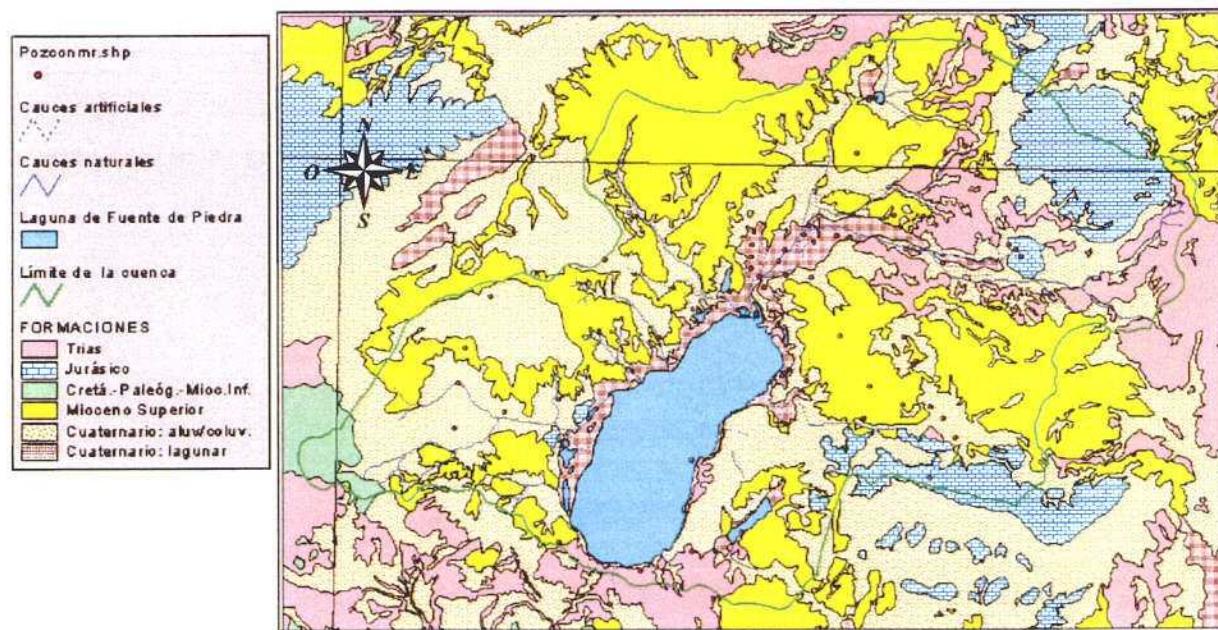


Figura IV.1 – Red actual de control de las aguas subterráneas

En respuesta al escenario descrito anteriormente, en el marco de este Proyecto se realizó un inventario selectivo con el fin de mejorar la infraestructura de control hidrogeológico. Esta actuación se implementó mediante una acción comercial financiada por la Consejería de Medioambiente de la Junta de Andalucía a través de la empresa pública EGMASA, bajo la supervisión técnica del IGME. Así, se ejecutó el “Inventario selectivo de puntos agua y carga de información en Sistema de Información geográfica (SIG) en la cuenca de Fuente de Piedra”. En la Secciones siguientes se exponen con mayor detalle los objetivos planteados y los resultados alcanzados.

IV.2- Requisitos para un inventario selectivo en la cuenca de la Laguna de Fuente de Piedra

Un inventario de puntos de agua puede ser un elemento útil en el conocimiento hidrogeológico de la cuenca de la Laguna de Fuente de Piedra, pero para ello debe atender los requisitos siguientes:

- Deberá aportar un máximo de información litológica que contribuya a una interpretación correcta de la geología de la cuenca.
- Deberá permitir el diseño de redes de observación piezométrica y de calidad de las aguas - basadas en los puntos inventariados- que sean un recurso en la gestión hidrica.
- Deberá contener los datos sobre extracciones suficientes, para complementar y contrastar la información sobre explotación de las aguas subterráneas obtenidas mediante otras técnicas.

Dado el panorama descrito y los requerimientos exigidos, la actualización del inventario se elaboró procurando conformar una base de datos realmente útil, más ajustada al escenario hídrico existente. Para ello su ejecución consideró que se debía plasmar en inventario selectivo, no masivo.

Para facilitar la actualización del inventario y optimizar sus resultados se realizaron las labores previas siguientes:

- Se identificaron en campo y actualizaron los datos de los puntos ya inventariados con información litológica, piezométrica o que sean puntos de extracción singular. El número de estos puntos es exiguo y por ello se encuentran claramente identificados.
- Se revisaron las redes de observación piezométrica y calidad de las aguas existentes, valorándose aquellos puntos que no se ajustan a criterios básicos de calidad operativa.
- Se identificaron mediante fotos aéreas, SIG temáticos y visitas de campo los usos del suelo bajo labor agrícola; discriminándose los distintos cultivos bajo regadio y secano.

Los puntos que se consideraron susceptibles de integrar el inventario selectivo se procuró que respondieran a, al menos, alguna de las características siguientes:

- Disponer de columna litológica, se recurrió a: propietarios de pozos; empresas de perforación; los Servicios de Minas o al ente de la administración pertinente.
- Tener una situación espacial, una profundidad y ausencia de bombas que lo presenten como un punto de interés para integrar las redes de observación piezométrica y de calidad de las aguas. Se procuró que en el caso de la red piezométrica la influencia de los bombeos circundantes al pozo seleccionado fuera mínima o, preferentemente, inexistente.
- Se considerase como punto de extracción singular, ya sea por la magnitud de los volúmenes extraídos o por el carácter representativo que pudiera tener su explotación respecto a otros puntos en similar situación.
- Respecto a la situación espacial se prestó mayor atención a emplazamientos en las cuencas con escasez de puntos inventariados, como son la de los arroyos Los Arenales, Mari Fernández y La Serafina (Figura I.2).

El inventario selectivo, como se expuso, fue de objetivo múltiple. Por otro lado, algunos de los objetivos propuestos atienden requerimientos contrapuestos entre sí. No obstante ello, se procuró que el resultado final, fuera equilibrado en su conjunto y que a la par diera una respuesta satisfactoria y homogénea en toda la cuenca a cada uno de los criterios directrices del trabajo.

IV.3- Tareas de inventario complementarias

El contraste de los posibles modelos conceptuales sobre el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca de la laguna requiere detectar eventuales descargas de flujos profundos en la vecina cuenca del río Guadalhorce, para estudiar posteriormente si estos flujos reciben alguna aportación procedente de la cuenca de Fuente de Piedra. Para ello se consideró necesario identificar e inventariar puntos de descarga natural de carácter difuso y concentrado existentes en la margen derecha del río Guadalhorce, en el área inmediata vecina a la cuenca de la laguna.

IV.4- Resultado del inventario selectivo

El ámbito territorial de los trabajos fue la cuenca endorreica de la Laguna de Fuente de Piedra, extendiéndose a la cuenca del Guadalhorce, en el área inmediata al interflujo. Se han inventariado sondeos, pozos y manantiales, eligiéndose algunos nuevos y otros ya inventariados antiguamente pero que se consideró de interés "recuperarlos". Se estudiaron más de 100 puntos, seleccionándose 46. En las Figuras IV.2 y IV.3 se indica la situación de los puntos inventariados, en la Tabla IV.1 se listan los mismos y se indica una primera valoración sobre su idoneidad para integrar las nuevas redes de control piezométrico, se señalan 31 puntos- y de red de calidad –se señalan 24 puntos-. En el Anexo 1 se adjuntan las fichas de los puntos inventariados.

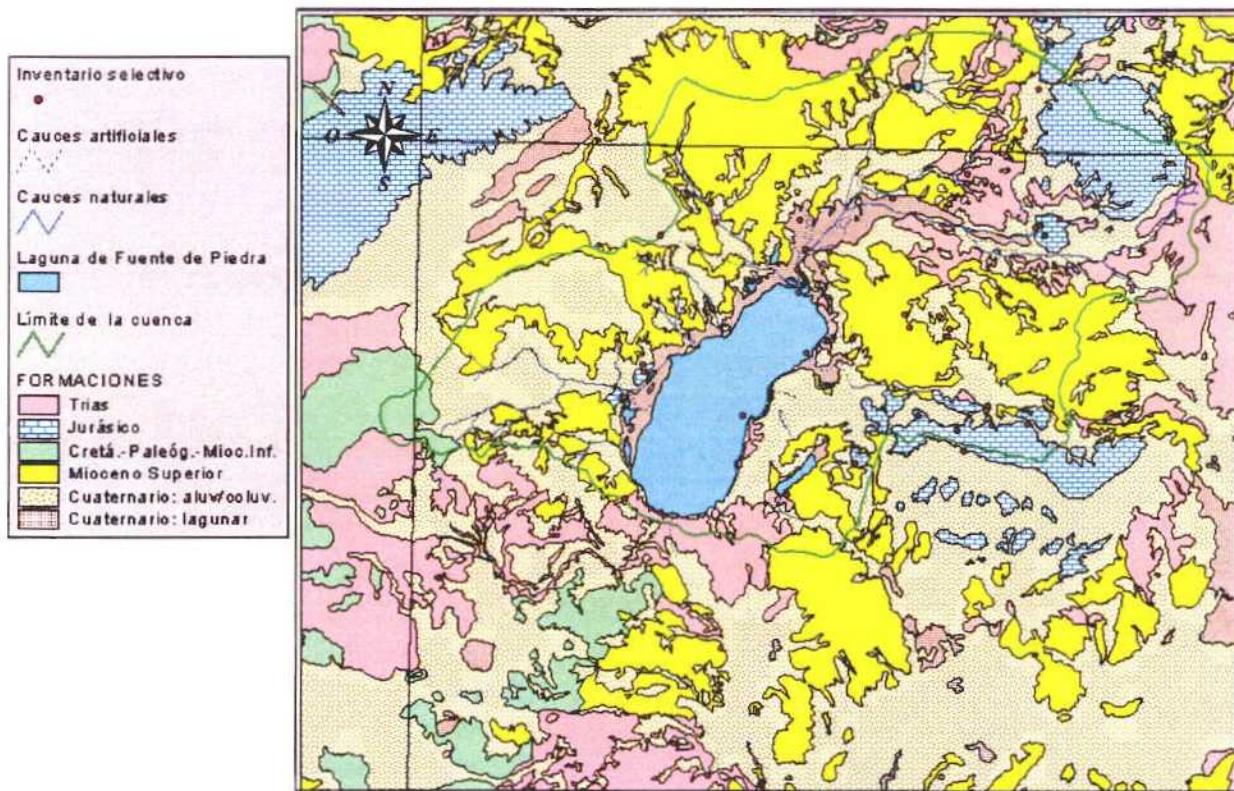


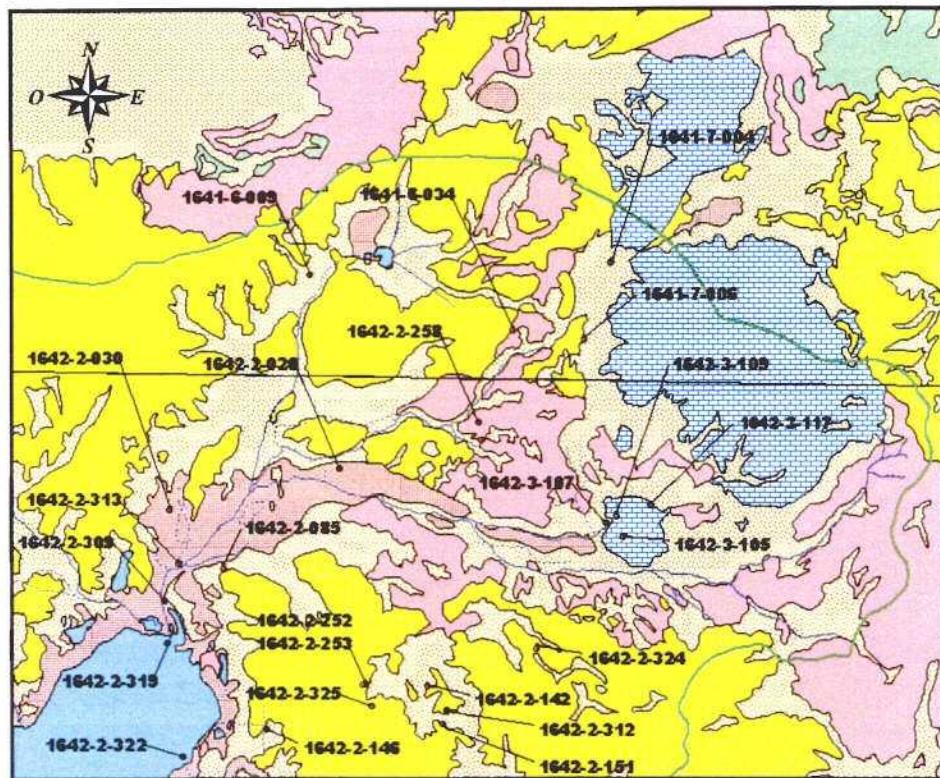
Figura IV.2- Inventario selectivo: situación global

Tabla IV.1- Puntos resultantes del inventario selectivo. Propuesta de redes de piezometría y calidad

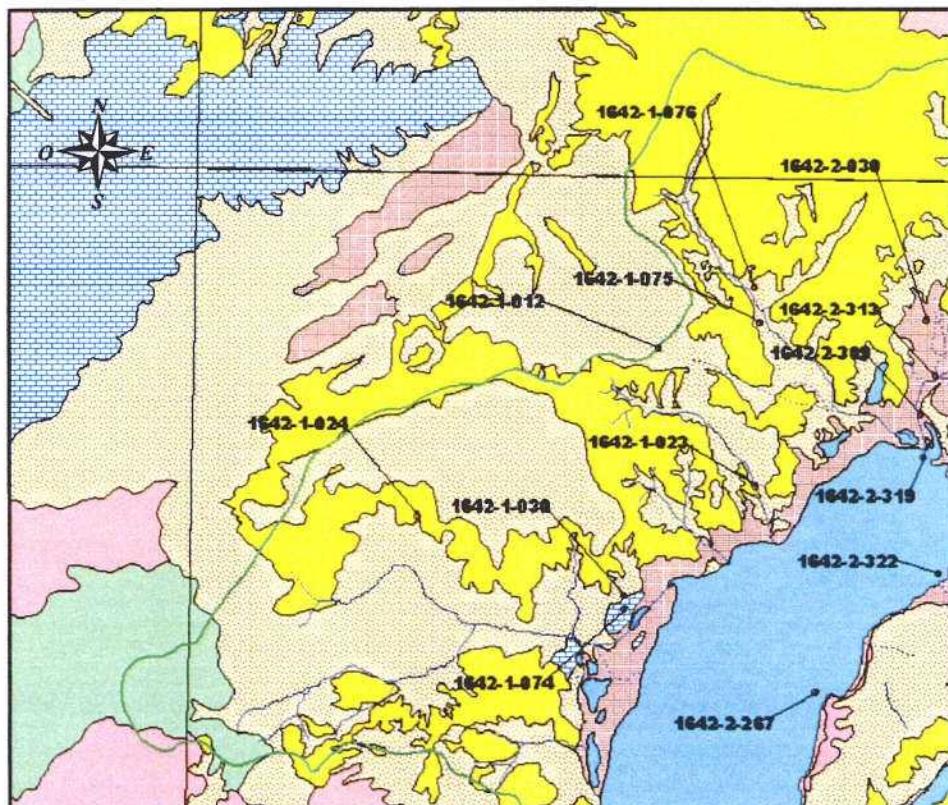
PUNTO	X UTM (uso 30N)	Y UTM (uso 30N)	Red Piezometrica propuesta	Red de Calidad propuesta
1641-6-009	346718	4116311		
1641-6-034	349391	4115561	X	
1641-6-035	348960	4114126		X
1641-7-004	350692	4116456	X	
1641-7-006	350323	4115447	X	X
1642-1-012	341427	4112849	X	X
1642-1-023	342668	4111062		
1642-1-024	338315	4110686	X	X
1642-1-030	340984	4109650	X	
1642-1-066	340520	4106353	X	X
1642-1-072	341398	4106014	X	
1642-1-074	340990	4109475	X	
1642-1-075	342731	4113169		X
1642-1-076	342656	4113646	X	X
1642-2-236	344527	4106448	X	X
1642-2-020	347105	4113747	X	
1642-2-030	344864	4113208	X	
1642-2-085	345568	4112420	X	X
1642-2-142	348260	4110861	X	X
1642-2-146	346145	4110303	X	X
1642-2-151	348458	4110355	X	X
1642-2-229	349465	4108665		X
1642-2-252	347434	4110900	X	X
1642-2-253	347400	4110890		X
1642-2-257	349529	4108169	X	X
1642-2-258	348960	4114126	X	X
1642-2-259	348863	4107549	X	X
1642-2-267	343437	4108410	X	
1642-2-309	344798	4111993	X	
1642-2-311	348695	4108040	X	
1642-2-312	348511	4110541		X
1642-2-313	344976	4112485	X	
1642-2-314	347749	4108392		X
1642-2-319	344832	4111441	X	

Tabla IV.1- Puntos resultantes del inventario selectivo. Propuesta de redes de piezometría y calidad (continuación)

PUNTO	X UTM (uso 30N)	Y UTM (uso 30N)	Red Piezometrica propuesta	Red de Calidad propuesta
1642-2-322	345019	4109938	X	
1642-2-324	349690	4111351	X	
1642-2-326	346196	4107248	X	
1642-2-355	347519	4110590	X	
1642-3-105	350836	4112836	X	
1642-3-107	350618	4113030		X
1642-3-109	350757	4113104	X	X
1642-3-110	350441	4108212		X
1642-3-117	351202	4113261		X
1642-5-029	341745	4100327		
1642-5-033	342582	4099555		X
1642-6-024	342888	4102655		

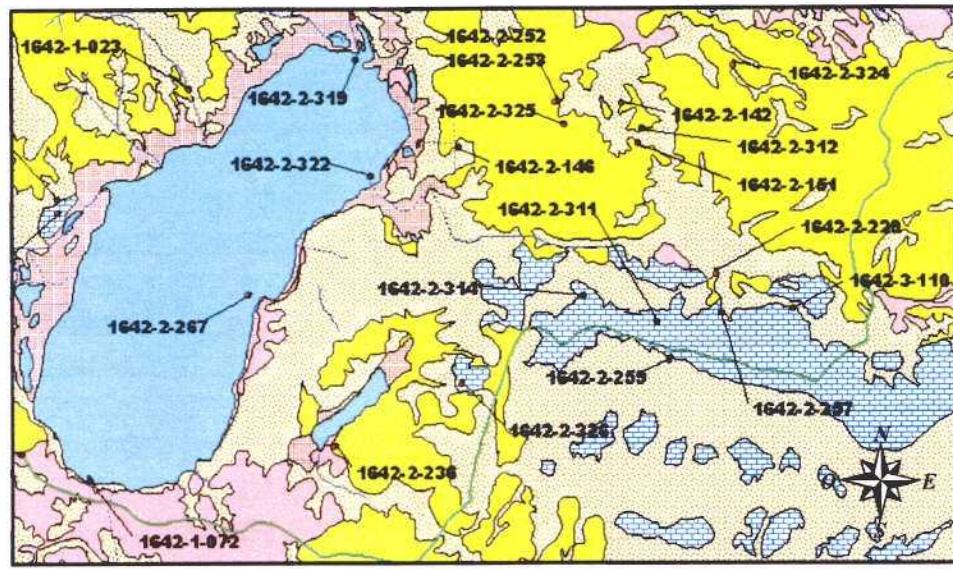


a – Sectores Norte y Noreste

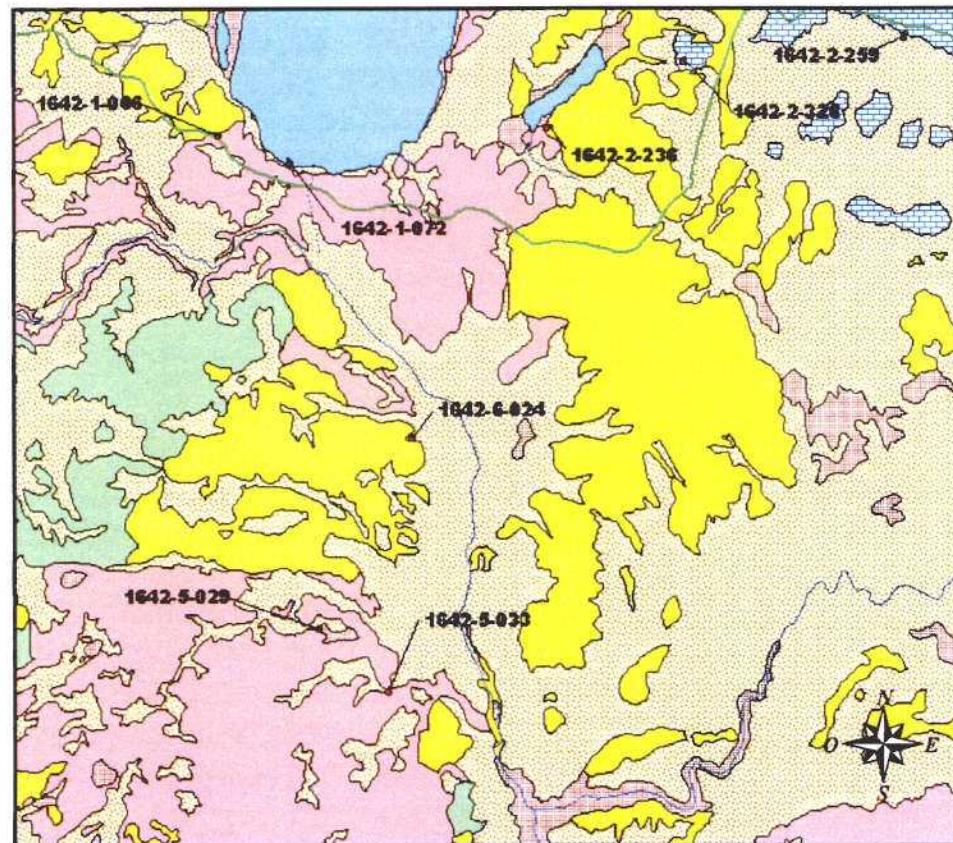


b – Sectores Norte y Noroeste

Figura IV.3- Inventario selectivo: situación de detalle



c - Sectores Centro y Este



d - Sector Sur

Figura IV.3- Inventario selectivo: situación de detalle (continuación)

V. MODELO DIGITAL DEL TERRENO

V.1- Introducción

Hasta el presente existían tres Modelos Digitales del Terreno, MDT, que comprenden el vaso de la laguna así como su cuenca de aportación. Uno de los mismos fue desarrollado por la Junta de Andalucía, se halla definido en una malla de 20 m de paso y corresponde a la restitución de la información soportada por la Hojas 1:50.000 del Instituto Geográfico Nacional, IGN. Este MDT presenta errores superiores a 9 m en el vaso de la laguna. Otro MDT fue desarrollado por el IGN, se halla definido en una malla de 25 m de paso, se basa en la digitalización de la cartografía 1:25.000 del propio Instituto y posee una sensibilidad altimétrica de orden métrico. Finalmente, en el marco de una tesis doctoral (Rodríguez, 2002) se presentó un MDT de la cuenca definido por 4548 nodos y para el que se hace referencia que su información procede de una cartografía 1:10000. Respecto a este último modelo el paso de malla es de 200 m, y en cuanto a la cartografía de origen se desconoce toda referencia al organismo que la compuso, así como la precisión con que se interpoló la misma. La Conserjería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía ha realizado una restitución fotogramétrica del vaso de la laguna y de un sector de la cuenca. La cartografía digitalizada resultante adolece de falta de precisión, desconociéndose además la magnitud del error (Rendón, 2003, comunicación personal).

V.2- Selección de MDT base

Inicialmente se seleccionó como MDT de trabajo para la modelización del sistema hidrogeológico de Fuente de Piedra el desarrollado por el Instituto Geológico Nacional. Esta decisión se adoptó al considerar que era el que mayor exactitud, acorde a su grado detalle, ofrecía entre los disponibles. Este MDT se define como una malla cuadrada en proyección UTM que cubre todo el territorio nacional. El ancho de malla de 25 metros, teniendo cada nodo asociada su correspondiente cota. Los datos utilizados para su formación son las coordenadas UTM y la altitud de los puntos de referencia que describen geométricamente la altimetría del país, datos que han sido obtenidos mediante la digitalización/restitución numérica de las curvas de nivel y puntos acotados contenidos en la serie cartográfica a escala 1:25.000 (MDT25) del Instituto Geográfico Nacional.

El MDT25 se ha subdividido en mallas que cubren las "HOJAS" de 14 km x 9.8 km, con un rebase hacia afuera para asegurar la continuidad entre modelos colindantes que varía desde los 100 m hasta los 500 m, lo que supone una superficie total aproximada de 118 km² (unos 190.000 nodos de malla). Esto supone manejar del orden de 800 millones de cotas para toda España, distribuidas cada 25 metros en dirección Norte-Sur y Este-Oeste, con una exactitud que el IGN cifra en 3 m en el eje Z., pero que en este proyecto se puso evidencia que pueden alcanzar valores de hasta 10 m.

Las hojas seleccionadas y posteriormente concatenadas fueron: 1005-IV, 1006-III, 1006-IV, 1022-II, 1022-IV, 1023-I, 1023-II, 1023-III y 1023-IV.

V.3.- Inconsistencias del MDT del IGN

El MDT del IGN presenta, en nuestro ámbito de estudio, dos tipos de inconsistencia que impiden su uso inmediato para cualquier labor de gestión hídrica de la cuenca.

La primera de estas inconsistencias se debe al solape entre hojas ya descrito en la sección anterior. Este hecho se puso de manifiesto al concatenar las hojas y encontrar que en las áreas de solape para una misma coordenada X e Y cada hoja podía dar sendas cotas distintas entre sí. Así los nodos afectados tenían asociadas dos cotas distintas, las que podían diferir entre sí hasta en 10 m (Figura

V.1). Esta distorsión es debido a que los MDT se han sido restituidos para cada hoja, con lo cual en ocasiones los resultados de las interpolaciones en particular en zonas en que las líneas de nivel se encuentran distantes entre sí no siempre coinciden de una hoja a otra. La repercusión de esta inconsistencia en la caracterización hidrogeológica del sistema sin ser desdeñable es relativa, teniendo estrictamente un impacto local.

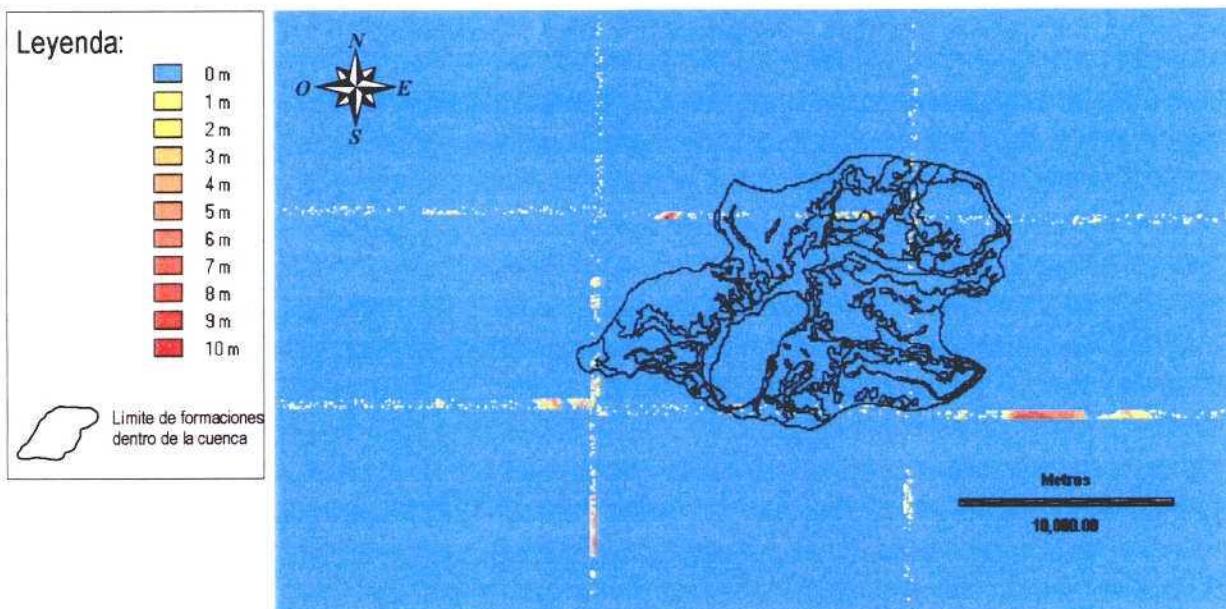


Figura V.1- Distorsión del MDT regional por concatenación de los MDT de las hojas 1:2.5000

La segunda inconsistencia que presenta el MDT del IGN tiene serias implicaciones desde el punto de vista de la caracterización hidrogeológica del sistema y de la gestión hídrica de la cuenca. En la Figura V.2 se observa que este MDT presenta en el vaso de la laguna una convexidad, alcanzando en el eje central de la laguna cotas de 419 a 418, que representan errores en torno a los 10 m en dichos puntos. Así topológicamente el vaso de la laguna en el MDT –similar al casco invertido de una embarcación, en el que la quilla coincidiría con el eje central de la laguna- es exactamente inverso al existente. La laguna es la única salida del sistema hídrico y esta descarga está controlada por la cota del vaso de la misma. Resulta obvio señalar la repercusión que tiene una distorsión de la topografía del vaso tan seria como la señalada. Por otro lado, en la vecindad de la laguna, en la zona de La Albina -cuenca baja del arroyo de Santillán y afluencia del de la Serafina-, el MDT del IGN presenta cotas que varían entre 420 y 422 m. Estos valores difieren hasta 10 m con los reales. El arroyo de Santillán es el principal curso de agua y tiene un importante rol en el funcionamiento del sistema en particular en su tramo bajo y desembocadura -zona de La Albina-. Además, es en este sector donde se sitúan las extracciones más importantes del sistema. Lo hasta aquí descrito da una idea de la repercusión negativa que tiene sobre la caracterización hidrogeológica del sistema la magnitud en la distorsión en las cotas que existe en la zona de la Albina.

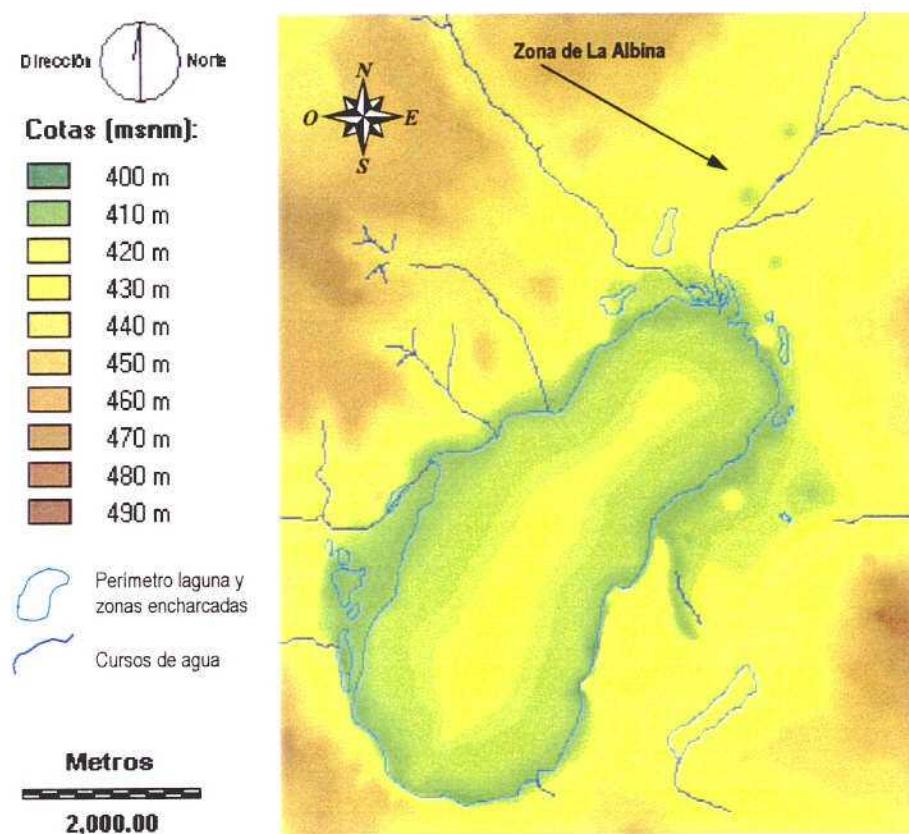


Figura V.2- MDT del IGN: vaso de la laguna y sector de La Albina

V.4.- Tratamiento de las inconsistencias del MDT del IGN y elaboración del MDT definitivo

Las distorsiones producidas por la superposición de las zonas de solape de los MDT correspondientes a las distintas Hojas 1:25.000 no se corrigieron, pero se procuró menguar sus efectos. Ello se realizó adoptando como cotas en las zonas de solape el promedio de las cotas correspondientes a las hojas correspondientes. Posteriormente, se procedió a suavizar las cotas resultantes en las zonas solape.

En la corrección de las cotas en el vaso de la laguna y en la zona de La Albina fue de inestimable ayuda la campaña topográfica que realizó la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía en la Reserva Natural. En esta campaña se establecieron las cotas de los siguientes puntos:

- Red Básica: esta red integra a los vértices Bermejo y La Mezquita de la Red Geodésica Nacional y a partir de ellos se situaron y nivelaron los restantes vértices de la red básica
- Puntos de Apoyo: se seleccionaron puntos de identificación estereoscópica clara, visitándose en campo y se nivelaron mediante transmisión de cotas por visuales reciprocas y simultáneas.
- Perfil longitudinal: a partir de los vértices Piquetes y Puente Arroyo de la Red Básica se definió un perfil longitudinal en el vaso de la laguna. Este perfil se niveló mediante transmisión de cotas por visuales reciprocas y simultáneas.

La corrección de la representación digital del vaso de la laguna y de la zona de Santillán se basó en:

- La información que ofrecían los puntos nivelados en la campaña topográfica de la Consejería de Medio Ambiente y un conjunto de puntos complementarios cuyas coordenadas y cotas se tomaron de la cartografía 1:25000 del IGN (ver Figura V.3).

- Asumir la hipótesis que la cota de 410 m en el perímetro de la laguna había sido correctamente asignada en el MDT del IGN. En este sentido, también se contrastaron la situación de los puntos con cotas asignadas de 409, 408, 411 y 412. Se consideró que la asignación de la cota 410 m es la de distribución espacial más coherente en las proximidades de la laguna (Fig. V.3).

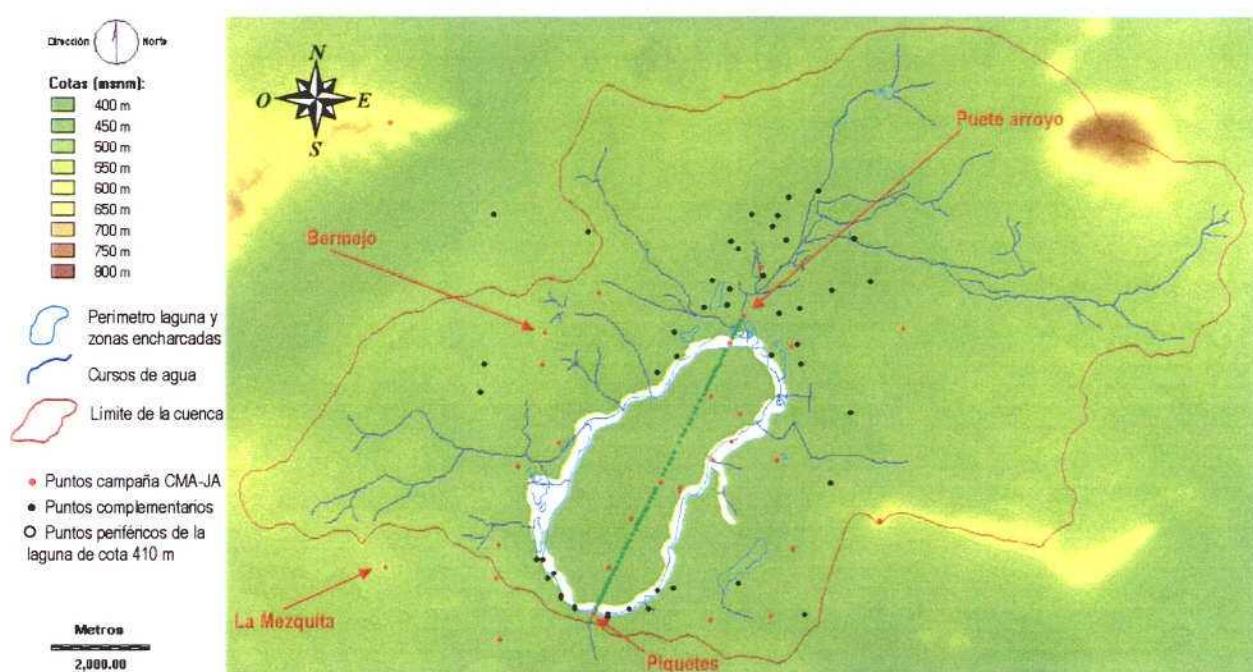


Figura V.3- Puntos auxiliares para la corrección del MDT del IGN

Finalmente, se interpolaron estos datos planialtimétricos para restituir la topografía del vaso de la laguna y de la zona de Santillán (ver Figura V.4). La necesidad de una nivelación del lecho de la laguna con un error conocido resulta evidente, aunque igualmente son notorias las dificultades de esta tarea - fangos del lecho de la laguna y modificación del mismo por las aportaciones sólidas de los arroyos-. A pesar que la corrección del MDT no se puede equiparar con la topografía resultante de una nivelación, se considera que el resultado alcanzado es aceptable y significa un notorio avance en cuanto a la topografía digital existente del vaso de la laguna y sector de La Albina. No obstante, debe contemplarse el carácter móvil del vaso debido al aporte de sedimentos y las labores que eventualmente se llevan a cabo en el mismo.

Por otro lado, la información procedente de la campaña de la Consejería de Medio Ambiente se utilizó para contrastar la bondad del MDT del IGN en otros ámbitos de la cuenca y zonas vecinas. En la Figura V.5 se expone el MDT desarrollado en el marco del presente Proyecto.

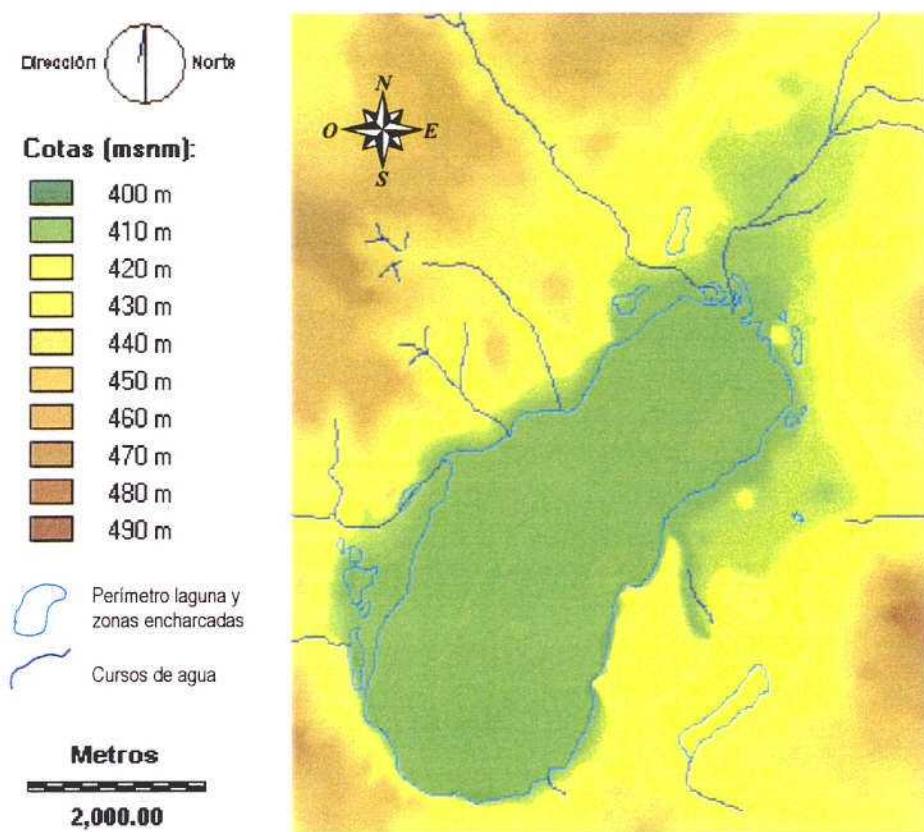


Figura V.4- MDT resultante: vaso de la laguna y sector de La Albina

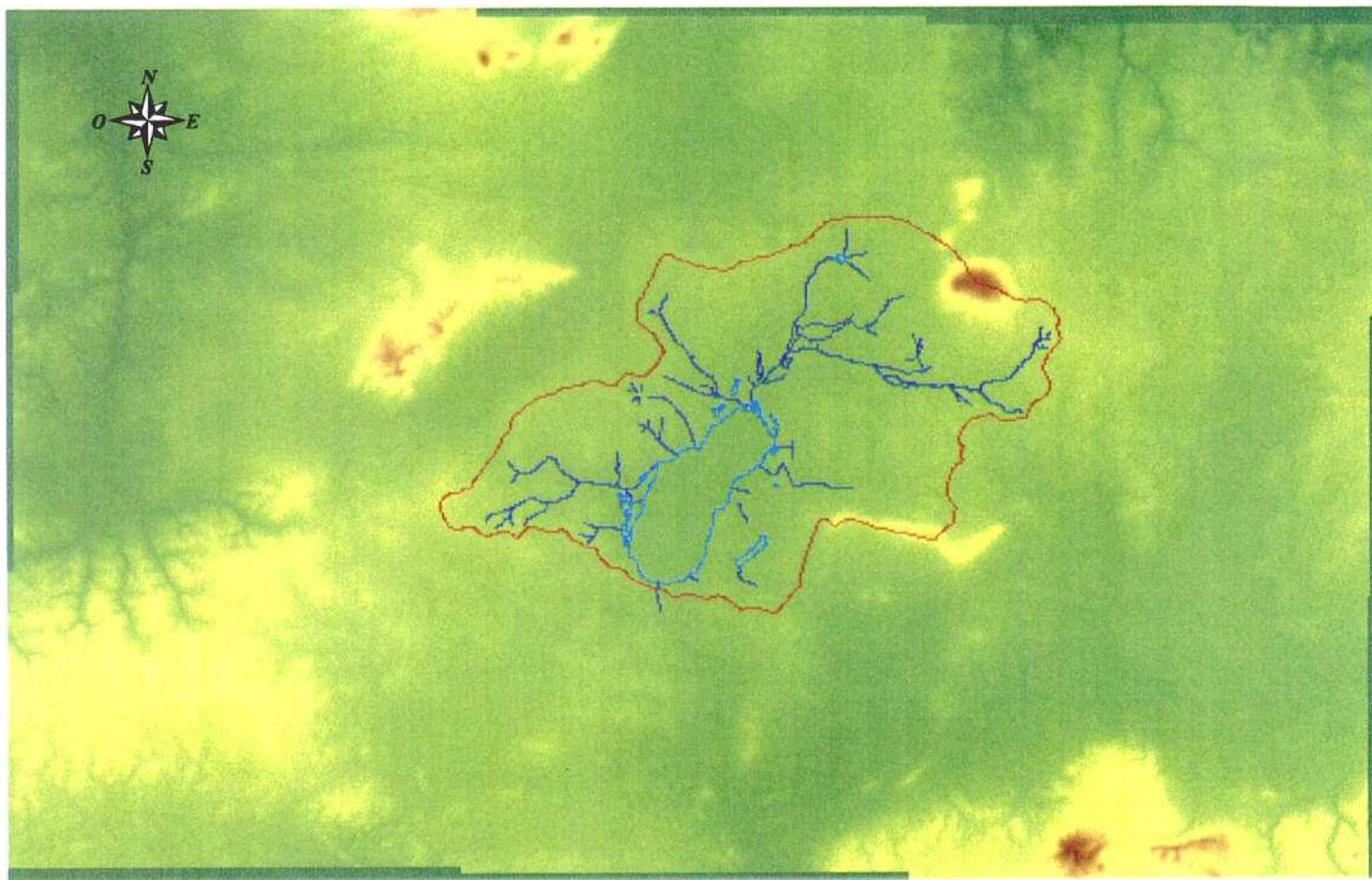
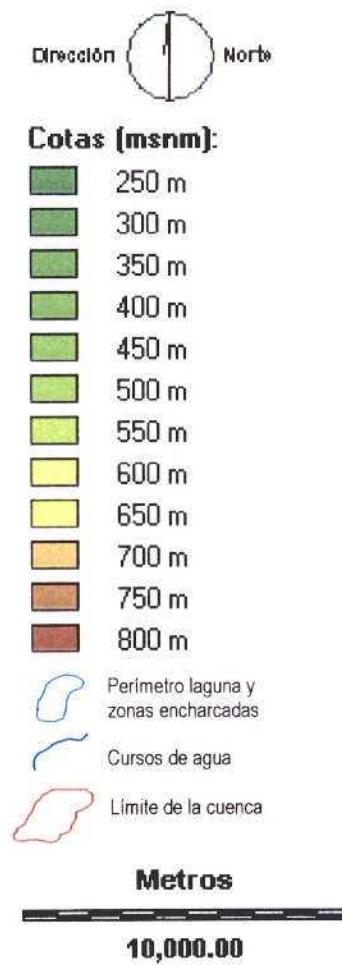


Figura V.5- Modelo Digital de Terreno resultante

VI. DETERMINACIÓN DEL MURO DEL MIOCENO SUPERIOR

VI.1- Introducción

Los materiales del Mioceno Superior conforman el acuífero más importante del sistema. Su relevancia radica en dos aspectos:

- La mayor parte del volumen de aguas subterráneas extraído en la cuenca procede de este acuífero y la práctica totalidad de los pozos existentes se emplazan en el mismo. El agua destinada a la agricultura, principal actividad económica en la región, y a la industria de transformación procede casi exclusivamente del mismo. Asimismo, estudios hidroquímicos e isotópicos realizados en este proyecto, sugieren que una fracción del agua para abastecimiento que se extrae de las calizas jurásicas proceden del acuífero mioceno, como resultado de una inversión del patrón de flujo natural.
- Los ya referidos estudios hidroquímicos realizados en este proyecto señalan que este acuífero presenta buenas propiedades hidráulicas y, el aspecto más relevante, que su recarga probablemente sea mayor a la estimada hasta el presente, siendo preponderante entre las entradas de la cuenca. La trascendencia de la recarga en este acuífero también fue sugerida en estimaciones aproximadas realizadas en el proyecto para las recargas de las distintas formaciones presentes en la cuenca.

Teniendo en cuenta las razones en que radica la importancia del acuífero Mioceno y la exigencia de una gestión hídrica adecuada de la cuenca, llama la atención la falta de estudios previos para determinar el muro del Mioceno Superior. Este acuífero se deposita sobre un paleorelief y la profundidad de su muro es un rasgo fundamental del sistema que se tiene como objetivo caracterizar. Para ello se partirá de la información litológica existente en el inventario de puntos aguas, así como de información indirecta de apoyo. La superficie del muro del acuífero se determinará a partir de la información litológica discreta y aplicando los métodos de interpolación de Kriging y el de medias móviles ponderadas (Universidad de Alcalá, 2004) soportados por el Sistema de Información Geográfica Idrisi 32 (Clark Labs, 2002). Finalmente, los resultados obtenidos mediante ambos métodos se analizarán, contrastarán entre sí y se discutirán.

Debe observarse que en el proceso de interpolación se trabajó en un dominio mayor que la cuenca de la laguna. Ello estuvo motivado por dos razones: incrementar la base de datos y atemperar la distorsión de la estimación en la zona perimetral de la cuenca. No obstante, una vez finalizado el proceso de interpolación, el resultado a analizar se circunscribió a la cuenca de la laguna, que es estrictamente el ámbito que nos interesa.

VI.2- Información disponible

La información dada por las columnas estratigráficas es limitada dado su escaso número -45 en toda la cuenca y en la zona vecina inmediata- y su distribución es heterogénea. Estrictamente, sólo 32 columnas se sitúan en la cuenca (Figura I.3). Entre las 45 columnas litológicas se identificaron 34 que se puede considerar que brindan una información rigurosa para definir el muro del acuífero mioceno, bien porque lo alcanzaban, bien porque el sondeo atravesaba en otra formación. En este último caso se asumía la profundidad del muro como nula. Ante el escaso número de datos y procurando acrecentarlo se realizó una revisión exhaustiva en el inventario del IGME correspondiente a la Hoja 1642. Así, se identificaron 21 puntos con columna litológica situados en el acuífero mioceno, de los cuales 17 ofrecían información de la profundidad del muro por haberlo alcanzado. Por lo tanto, se

contaba con un total de 51 puntos para abordar el proceso de interpolación. La situación de los puntos se exponen en la Figura VI.1 y se presentan en la Tabla VI.1.

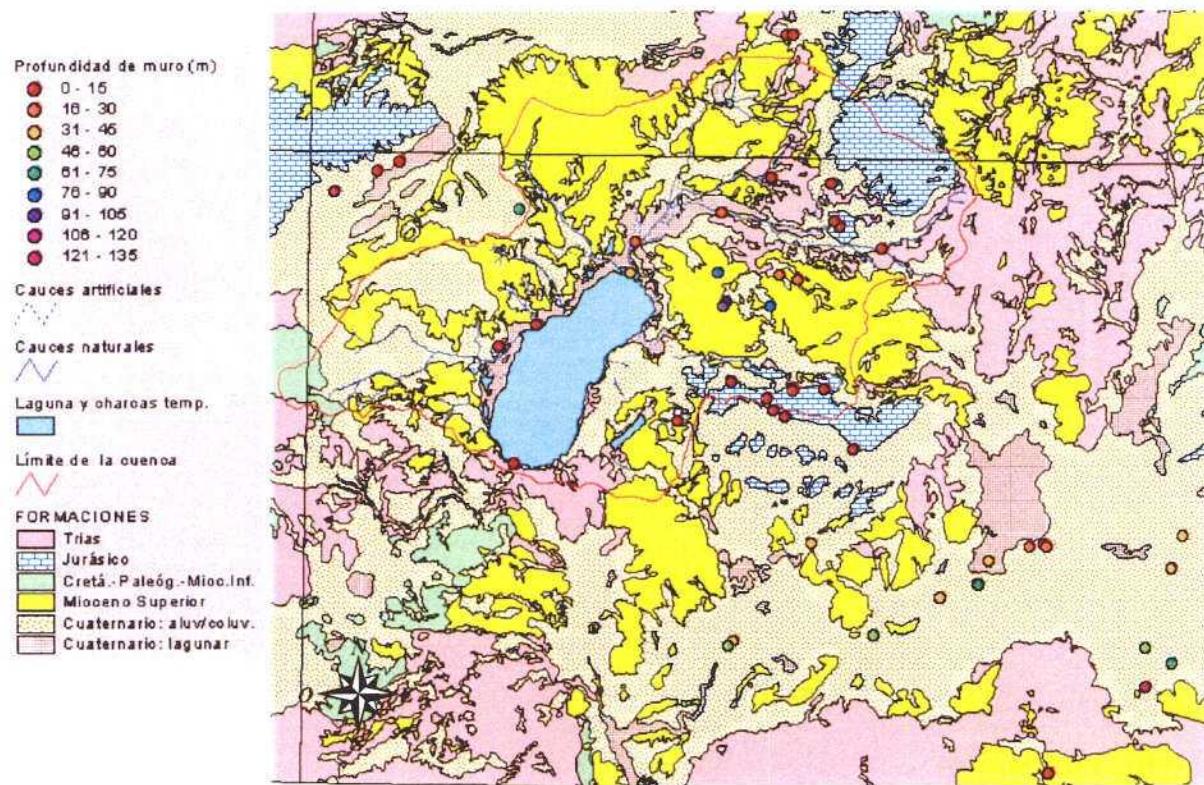


Figura VI.1- Puntos con información sobre la profundidad del muro del Mioceno Superior

Tabla VI.1- Puntos con información sobre la profundidad del muro del Mioceno Superior

Punto	X UTM (30N)	X UTM (30N)	Cota (msnm)	Profundidad	Muro
1641-6-32	349400	4118530	450	24	5
1641-6-33	349580	4118520	452	15	9
1642-1-6	337438	4114615	430	62	0
1642-1-7	336192	4113990	440	82	0
1642-1-53	341611	4113461	460	600	74
1642-1-55	338094	4114860	419	42	0
1642-1-72	341394	4106020	410	9	0
1642-1-73	342100	4110050	414	17	0
1642-1-74	340999	4109472	441	164	0
1642-2-257	349545	4108189	477	116	0
1642-2-258	348932	4114355	437	34	0
1642-2-259	349319	4107366	533	200	0
1642-2-260*	349319	4107366	533	70	0
1642-2-261*	349319	4107366	533	62	0
1642-2-262	349171	4111511	449	34	24

Obs.: * pozos depurados por inconsistencia en la información de sus fichas de inventario

Tabla VI.1- Puntos con información sobre la profundidad del muro del Mioceno Superior (continuación)

Punto	X UTM (30N)	X UTM (30N)	Cota (msnm)	Profundidad	Muro
1642-2-283	347484	4113349	424	35	30
1642-2-285	347371	4111575	461	82	82
1642-2-290	347617	4110723	449	99	99
1642-2-296*	349549	4108140	479	33	0
1642-2-302	348916	4110593	456	96	80
1642-2-308	348971	4107543	540	180	0
1642-2-311	348798	4107888	547	126	0
1642-2-313	344982	4112484	414	25	23
1642-2-314	347746	4108396	480	149	0
1642-2-320	344848	4111603	410	39	39
1642-2-324	349688	4111354	460	95	18
1642-2-325	347518	4110607	454	104	95
1642-2-326	346199	4107247	447	91	0
1642-3-103	352146	4112266	467	300	14
1642-3-104	350714	4114159	466	125	0
1642-3-105	350905	4112908	471	125	0
1642-3-109	350781	4113074	459	44	0
1642-3-110	350474	4108177	502	90	0
1642-6-ferr	351302	4106424	522	245	0
1642-6-119	347801	4100797	370	36	36
1642-6-120	347651	4100675	370	50	48
1642-7-57	351880	4100961	390	40	48
1642-7-71	356924	4096935	652	99	0
1642-7-77	350095	4103664	390	40	40
1642-7-85	353808	4102048	400	40	40
1642-7-92	355240	4103141	407	42	40
1642-7-93	354911	4102493	404	49	40
1642-7-94*	354911	4102443	404	70	70
1642-7-97	356843	4103609	413	40	29
1642-7-98	356892	4103534	413	40	29
1642-7-99	356393	4103561	411	40	29
1642-8-23	360874	4103843	430	38	32
1642-8-37	360537	4102893	423	48	38
1642-8-86	359763	4099452	460	143	135
1642-8-130	359772	4100562	442	66	50
1642-8-140	360519	4100108	445	70	70

Obs.: * pozos depurados por inconsistencia en la información de sus fichas de inventario

Ante la evidente escasez de datos, se procuró ampliar la información incorporando los datos de otro parámetro que se consideró correlacionable con la profundidad del muro del Mioceno Superior. El parámetro que se adoptó fue la profundidad de los pozos en explotación. El criterio que sustenta esta toma de decisión fue el siguiente: siendo el Mioceno Superior el único acuífero explotado en la región –

exceptuando las calizas jurásicas-, por tener las formaciones infrayacentes pobres propiedades hidráulicas y baja calidad de las aguas, es esperable que los sondeos hayan penetrado lo más posible en el acuífero a explotar. Así la profundidad de los pozos estarian indicando, la profundidad del muro del Mioceno Superior. Se seleccionaron los puntos bajo explotación perforados en el Mioceno que tenian una profundidad del mismo orden en los distintos ámbitos locales del dominio a interpolar. La adopción de este criterio permitió incorporar 103 nuevos puntos con datos (Figura VI.2 y Tabla VI.2), si bien se depuraron los 9 puntos por inconsistencias en la información que ofrecían sus fichas de inventario. Estos puntos se indican en las Tablas VI.1 y 2.

El proceso de interpolación se abordó a partir de dos bases de datos, una conformada exclusivamente por los pozos cuyo dato sobre la profundidad del muro del acuífero se basaba en su columna litológica y otra que incluía la anterior más los pozos en que la profundidad del sondeo se asumía como la profundidad del muro. Respecto a la primer base de datos nos referiremos como "*información litológica*" y "*información global*". En la exposición de la interpolación se discuten los resultados alcanzados a partir de cada base de datos.

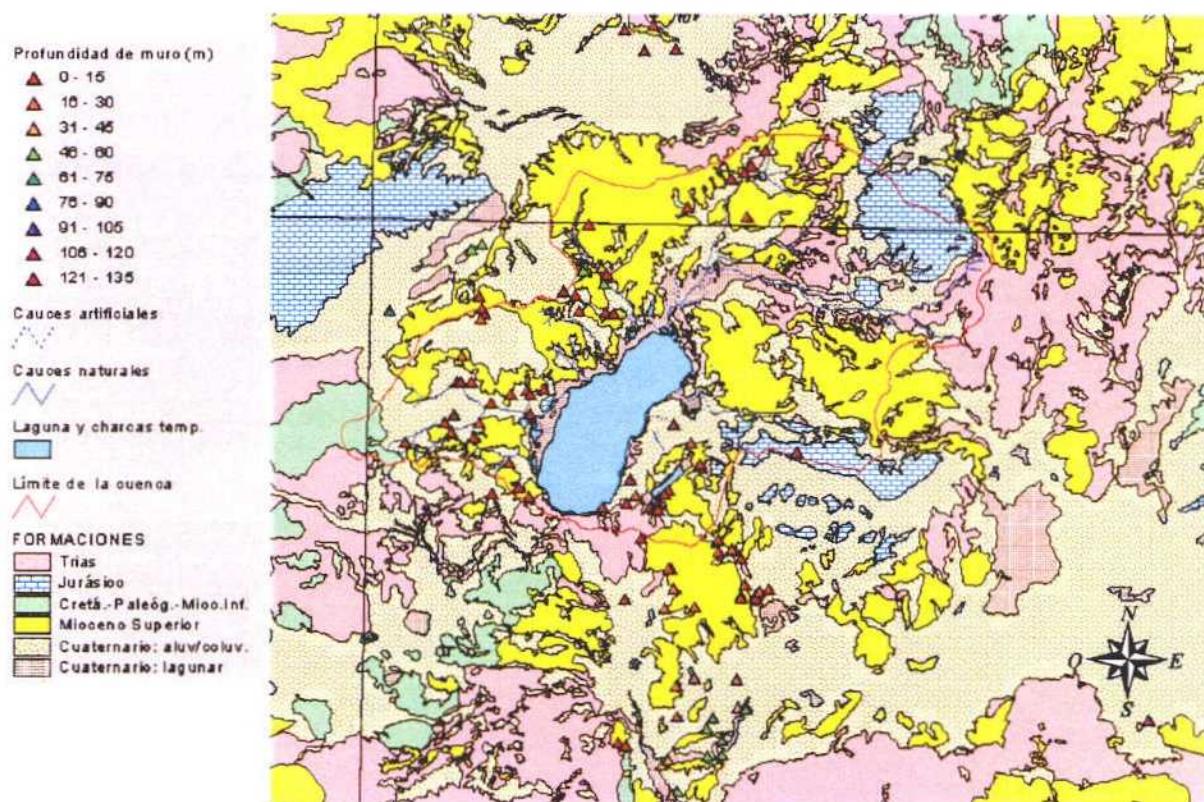


Figura VI.2- Puntos con información de apoyo sobre la profundidad del muro del Mioceno Superior

**Tabla VI.2- Puntos con información de apoyo sobre la profundidad del muro
del Mioceno Superior**

Punto		X UTM (30 N)	Y UTM (30 N)	Cota (msnm)	Profundidad
1641	6 3	347802	4117387	450	7
1641	6 6	347349	4116902	445	7
1641	6 8	347147	4116659	445	6
1641	6 9	346724	4116451	461	6
1641	6 13	345351	4115551	465	10
1641	6 15	347196	4115271	455	7
1641	6 24	344286	4121317	400	8
1641	6 25	344981	4120563	402	4
1641	6 26	343385	4121173	399	10
1641	6 27	343981	4120519	401	9
1642	1 4	342258	4115019	350	11
1642	1 9	342106	4113576	450	50
1642	1 13	341479	4112936	461	13
1642	1 15	338809	4112743	460	8
1642	1 16	341846	4112806	450	6
1642	1 17	341960	4112311	440	6
1642	1 18	338971	4112216	470	10
1642	1 19	338925	4112372	465	10
1642	1 20	338869	4112033	465	30
1642	1 24	338304	4110871	460	18
1642	1 26	338140	4110072	420	6
1642	1 27	338263	4110073	420	5
1642	1 28	338584	4110067	420	8
1642	1 30	340852	4109838	425	14
1642	1 34	339189	4109408	413	9
1642	1 36	339812	4109704	431	13
1642	1 37	340300	4109800	420	14
1642	1 38	340429	4109691	420	14
1642	1 39	337745	4108789	460	10
1642	1 40	338807	4108799	450	9
1642	1 41	340418	4109074	430	5
1642	1 42	336523	4108164	420	6
1642	1 43	337937	4108507	460	11
1642	1 45	338675	4108339	460	7
1642	1 47	338050	4109050	460	7
1642	1 48	339771	4107546	440	14
1642	1 49	340053	4106769	460	8
1642	1 50	339257	4106540	480	5
1642	1 51*	339257	4106540	480	5
1642	1 56	338590	4114253	430	50

Obs.: * pozos depurados por inconsistencia en la información de sus fichas de inventario

**Tabla VI.2- Puntos con información de apoyo sobre la profundidad del muro
del Mioceno Superior (continuación)**

Punto	X UTM (30 N)	Y UTM (30 N)	Cota (msnm)	Profundidad
1642 1 57	338891	4114402	430	50
1642 1 59	339595	4115047	430	45
1642 1 63	336028	4112313	425	70
1642 1 65	342819	4110945	460	38
1642 1 66	340414	4106469	460	8
1642 1 75	342731	4113169	440	50
1642 1 76	342656	4113646	440	38
1642 2 26	342844	4113439	440	10
1642 2 74	342787	4112234	430	7
1642 2 75	343027	4112226	430	6
1642 2 218	344930	4108748	445	10
1642 2 230	345463	4108148	420	30
1642 2 233	345747	4107498	440	11
1642 2 235	343589	4107012	415	10
1642 2 237	342709	4106133	410	6
1642 2 239	343451	4106244	420	7
1642 2 241*	344190	4106138	415	17
1642 2 242	344190	4106138	415	7
1642 2 243	344312	4106075	415	7
1642 2 244	344438	4106226	415	6
1642 2 245	344437	4106073	415	12
1642 2 264	343740	4106516	459	20
1642 2 265	344766	4106662	460	12
1642 2 266	344640	4106537	460	14
1642 6 2	343924	4105156	430	12
1642 6 3	346345	4105087	415	12
1642 6 4	346760	4104771	415	35
1642 6 5	346760	4104833	415	25
1642 6 6	346364	4104716	420	6
1642 6 7	347051	4104520	415	11
1642 6 10	344847	4104186	430	8
1642 6 11	344773	4104187	430	9
1642 6 12	344934	4103568	420	17
1642 6 14	347056	4103379	400	11
1642 6 15	347053	4103287	400	10
1642 6 16	347160	4103687	405	8
1642 6 20	347550	4103403	385	9
1642 6 21	347523	4103279	385	9
1642 6 23	343396	4103224	425	10
1642 6 25	344651	4102956	415	9

Obs.: * pozos depurados por inconsistencia en la información de sus fichas de inventario

**Tabla VI.2- Puntos con información de apoyo sobre la profundidad del muro
del Mioceno Superior (continuación)**

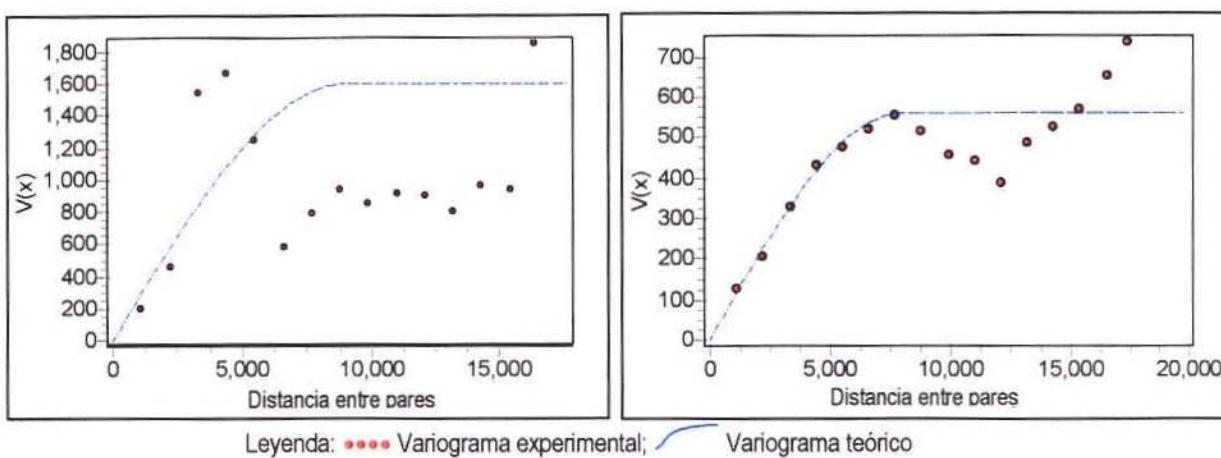
Punto	X UTM (30 N)	Y UTM (30 N)	Cota (msnm)	Profundidad
1642 6 26*	344651	4102956	415	30
1642 6 28	345616	4103002	420	20
1642 6 64	345027	4100515	420	18
1642 6 65*	345599	4100783	400	43
1642 6 66	345599	4100783	390	22
1642 6 73	346932	4100725	371	26
1642 6 82	346170	4099540	370	47
1642 6 85	346967	4099836	370	42
1642 6 93	345058	4099558	370	20
1642 6 96	343188	4098726	420	8
1642 6 97	343435	4098661	400	2
1642 6 100	346470	4098364	363	52
1642 6 104	344586	4098056	359	41
1642 6 106	345063	4097214	366	48
1642 6 107	344889	4097096	365	45
1642 6 110	347196	4099878	370	45
1642 6 111*	347220	4099828	370	46
1642 6 114	344785	4098189	380	40
1642 6 115	345992	4099183	380	50
1642 6 116	346036	4098308	380	50
1642 6 117	346489	4098831	380	47
1642 6 128	347619	4103475	400	17
1642 6 129	347920	4103574	400	14

Obs.: * pozos depurados por inconsistencia en la información de sus fichas de inventario

VI.3- Interpolación mediante el método de Krigin

La interpolación mediante el método de Krigin se realizó aplicando el Programa Gstat en la versión implementada en Idrisi 32. Este programa fue desarrollado en 1992 por E. Pebesma del Departamento de Geografía Física de la Universidad de Utrecht (Holanda); permite la modelización, la estimación y la simulación geostadística y es de libre difusión.

El primer paso para realizar la interpolación mediante el método de Krigin es la determinación del variograma experimental, para posteriormente ajustar -calibración- al mismo un variograma teórico, que es con el que finalmente se realizará la estimación de la variable -en este caso la profundidad del muro- para todo el dominio. En las Figuras VI.3 a y b se exponen los variogramas experimental y teórico que se ajustaron para la *información litológica* y para la *global*, respectivamente. En la Tabla VI.3 se indican para cada base de información los parámetros de los variogramas experimentales y teóricos. La estimación se realizó mediante Krigin ordinario.



a. Base de datos: información litológica b. Base de datos: información global

Figura VI.3. Variogramas experimentales y teóricos de la *información litológica* y *global*

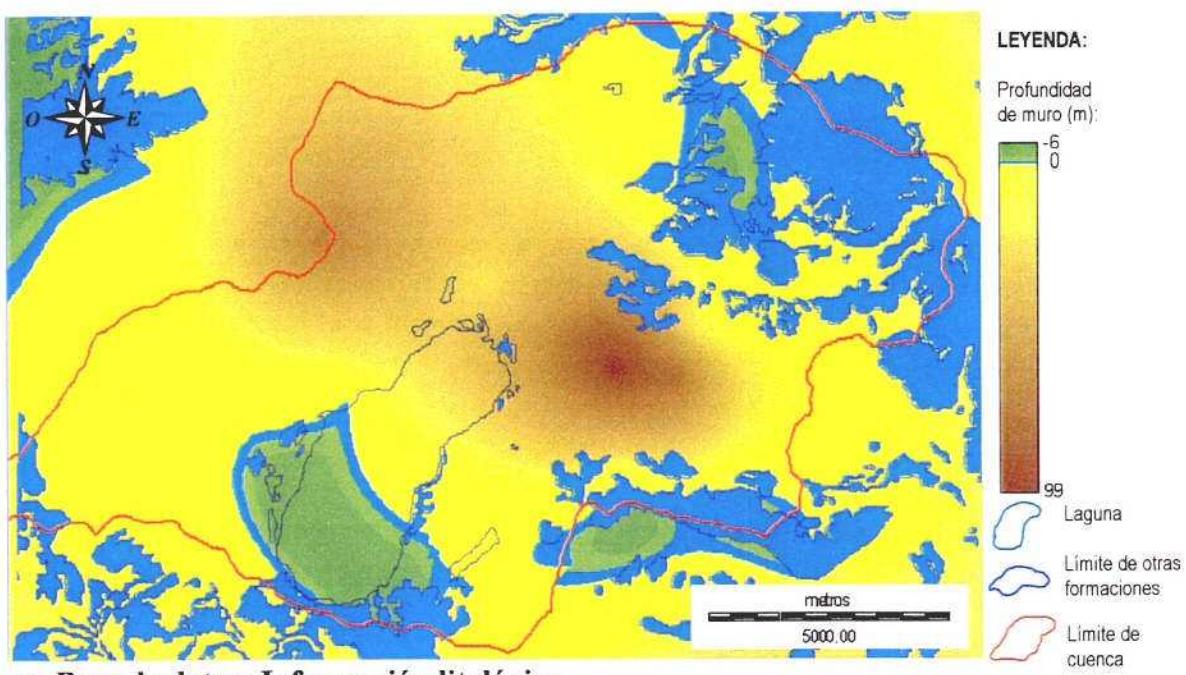
Tabla VI.3. Parámetros de los variogramas experimentales y teóricos de las *informaciones litológica* y *global*

Variograma	Parámetros	Información litológica	Información global
Experimental	Paso (m)	1100	1100
	"Holgura" (%)	50	50
Teórico	Modelo teórico	Esférico	esférico
	Pepita (m)	0	0
	Alcance (m)	9000	8000
	Meseta (m^2)	1800	570

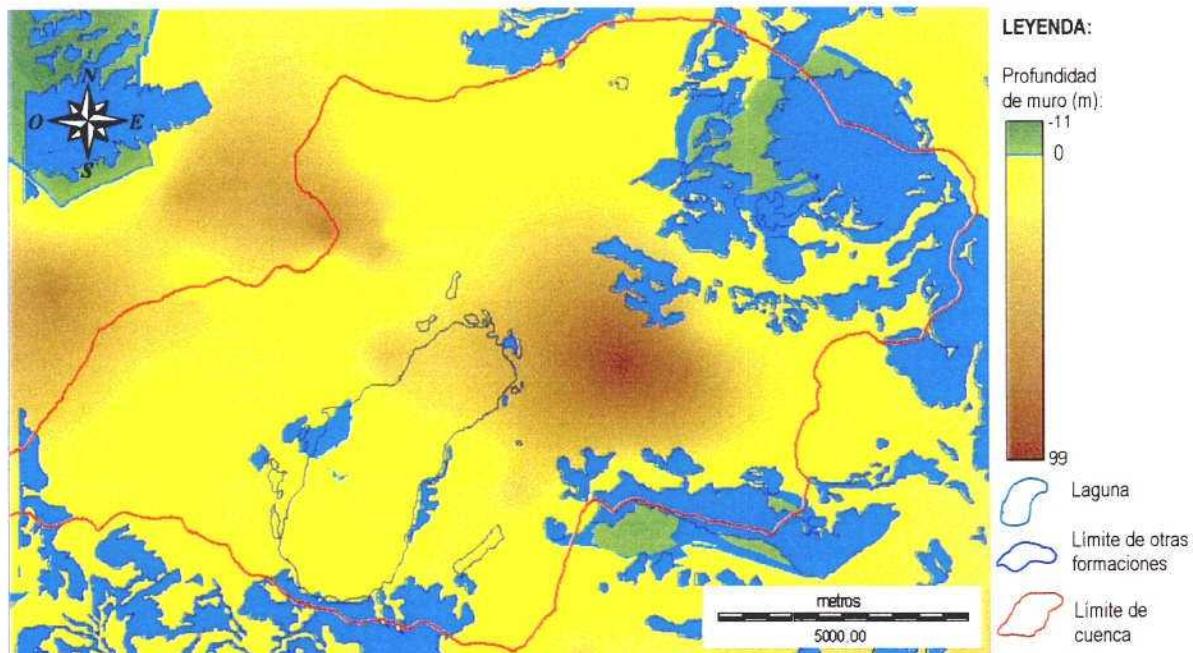
El resultados de las estimación de la profundidad del muro del Miocene Superior correspondientes a la *información litológica* y a la *global* se exponen en las Figura VI.4 a y b, respectivamente.

El contraste entre las interpolaciones de las dos bases de datos nos permite observar lo siguiente:

- Lo primero que se pone en evidencia en ambas interpolaciones es la coincidencia en señalar tanto un gran depocentro situado al noroeste de la laguna que alcanza casi los 100 m, como otro, algo menor, situado en el interfluvio oeste de la cuenca que alcanza los 75 m.
- En la estimación de basada en la *información litológica* aparecen un mayor número de zonas con valores negativos, algo incoherente con los valores que puede adoptar la variable tratada: la profundidad del muro. Ello se debe principalmente a la falta de datos. Si no se incrementa la base de datos, una de las opciones posibles es imponerle restricciones a la estimación, pero dado que el método de Kriging ordinario no permite esto, otra opción es realizar correcciones a la estimación.



a. Base de datos: Información litológica



b. Base de datos: Información global

Figura VI.4- Interpolación resultante mediante el método de Krigin

- Sin embargo, en alguna de las zonas en que la interpolación con la *información litológica* da valores negativos, la estimación con la *información global* da un espesor nulo del acuífero mioceno. Estas zonas coinciden con el pie de las sierras calizas de Yeguas, Mollina y el sur de la de Humilladero. Esto se debe a los numerosos sondeos situados en la sierra con valor de profundidad de muro nula.

- Otra zona notoria donde la interpolación basada en la *información litológica* da valores negativos es en el sur del vaso de la laguna. La estimación basada en la *información global* indica que en este sector el Mioceno Superior posee espesores muy someros.
- Respecto a las divisoria de aguas del acuífero mioceno en el oeste de la cuenca, ambas interpolaciones coinciden.
- La evolución hacia el oeste de la variable es completamente distinta para cada interpolación. La basada en la *información litológica* tiende a disminuir el espesor hacia Sa. de Yeguas. La estimación con la *información global* sitúa unos depocentros a los pie de dicha sierra e impone una divisoria de aguas al más al este respecto a la divisoria superficial –línea roja–.
- Se considera que la notoria diferencia entre la interpolaciones basadas en la *información litológica* y la *global* respecto a las zonas con valores negativos -algo incorrecto para la variable tratada-, así como las diferencia al definir el interflujo oeste del acuífero se debe la marcada diferencia de información entre una y otra.

VI.4- Interpolación mediante el método de medias móviles ponderadas

Se realizó la interpolación mediante medias móviles ponderadas aplicando la implementación del método que soporta Idrisi 32. Esta implementación se basa la utilización en general de 6 puntos de control. La ponderación utilizada es la inversa de la distancia el cubo, por tanto que fueron del orden 2 al 4 se optó por la utilizada por considerarse que ofrecía mejores resultados.

El resultados de las estimación de la profundidad del muro del Mioceno Superior correspondientes a la *información litológica* y a la *global* se exponen en las Figura VI.4 a y b, respectivamente y en ellas se observan los siguientes rasgos:

- Al igual que las interpolaciones realizadas con Kriging, las estimaciones para las dos bases ponen en evidencia la presencia de dos depocentros de similares características a las ya descrita. Sin embargo, en este método, en la interpolación correspondiente a la *información global* el depocentro situado al noroeste de la laguna presenta una entidad menor a los resultantes de las restantes interpolaciones.
- En estas interpolaciones no existen valores negativos como en el caso del krigead, ello es debido a que esta técnica no lo permite. No obstante, existen valores nulos en numerosas zonas de la interpolación basada en la *información litológica* a causa tanto de la escasez de datos, como al peso de los datos de profundidad nula. En este último caso se ven afectadas ambas interpolaciones por igual y es el caso de los puntos enclavados en los macizos de calizas.
- La divisoria de aguas este del acuífero coincide aproximadamente con la superficial para ambas interpolaciones y de forma análoga a las estimaciones realizadas con Kriging.
- Respecto al límite oeste de la cuenca, los resultados son disímiles entre una interpolación y otra. La basada en la *información litológica* incrementa la profundidad hacia el noroeste, en clara contradicción con el conocimiento del medio que se tiene. Esto no sucede en el caso de la *información global* pues a esta base se incorporaron las profundidades de los pozos bajo explotación de este sector, que son todos someros. Para esta última interpolación las divisorias de aguas superficial y subterráneas coinciden, aproximadamente.

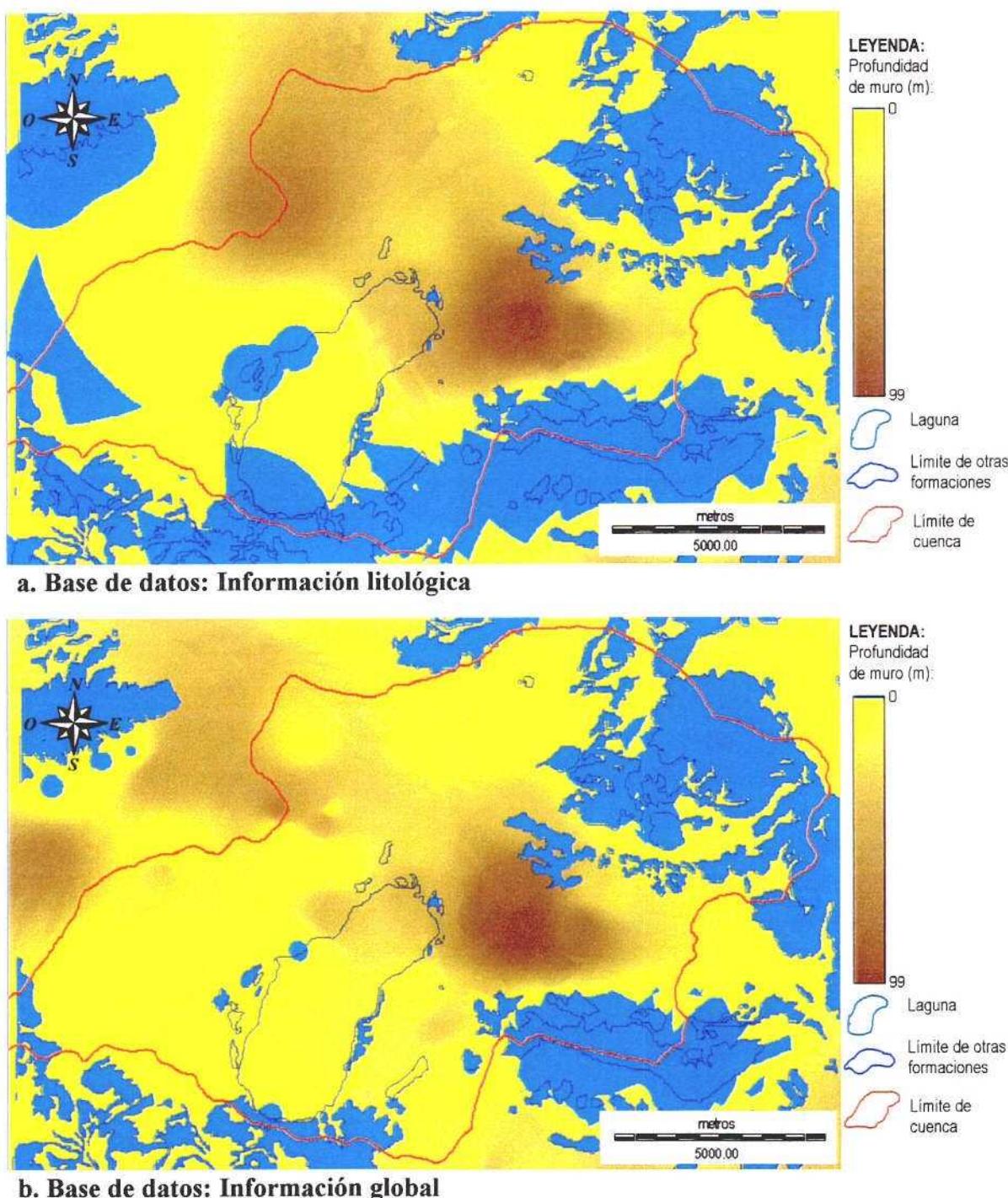


Figura VI.5- Interpolación resultante mediante el método de las media móviles ponderadas

VI.5- Conclusión

El determinar el muro del Mioceno Superior permitió identificar de forma consistente un depocentro situado al noreste de la laguna -en el paraje de La Coneja-, donde el acuífero prácticamente alcanza los 100 m. Asimismo los datos indican la existencia de otro depocentro situado al oeste de la laguna, en el interfluvio con la cuenca del arroyo de La Albina perteneciente a la cuenca del Guadiana –en el paraje de Buenavista- donde el acuífero alcanzaría los 75 m. Respecto a las divisorias de agua

subterráneas al este de la cuenca, todas las interpolaciones parecen sugerir que coincide con la divisoria de cuencas superficial. No parece ser el caso para la divisoria oeste en donde los resultados ofrece una mayor dispersión de una interpolación a otra.

En cuanto a la identificación general de la evolución en la cuenca del muro del Mioceno Superior, los resultados alcanzados presentan un aceptable grado de aproximación, si bien se considera pueden ser mejorables. Se entiende por mejora, no sólo una definición espacial más "natural" -"menos influenciada por las técnicas de interpolación"-, sino, fundamentalmente, de contar con un número mayor de datos con el fin de dotar a la interpolación de una consistencia mayor aún

VII. HIDROGEOQUÍMICA

VII.1- Introducción

Como parte de los trabajo desarrollados por el IGME para la caracterización del marco hidrogeológico en el entorno de la laguna de Fuente de Piedra (Málaga), se han realizado estudios hidrgeoquímicos y de isótopos ambientales. Como parte de los mismo se ejecutaron, con la colaboración del CEDEX, varias campañas de campo durante el año 2003. El trabajo de campo ha consistido fundamentalmente en realización de las siguientes actividades:

- realización de perfiles de conductividad y temperatura en pozos y piezómetros en la orilla de la Laguna y en puntos de mayor profundidad en la cuenca.
- medida *in situ* de parámetros físico-químicos.
- toma de muestras para análisis químicos e isotópicos $-^{18}\text{O}$, ^2H , ^{14}C y T- en algunos casos a diferentes profundidades y en época de estiaje y de lluvias.
- realización de ensayos de flujo en pozos y sondeos con trazadores, y
- testificación geofísica de varios pozos y piezómetros.

En este capítulo se presentan los resultados preliminares obtenidos en estas campañas, estando pendientes resultados tan relevantes como los análisis de isótopos estables o la datación con ^{14}C .

En la Tabla VII.1 se reseñan los puntos visitados en cada campaña indicándose las actividades llevadas a cabo en los mismos y en la Figura VII.1 se expone su situación.

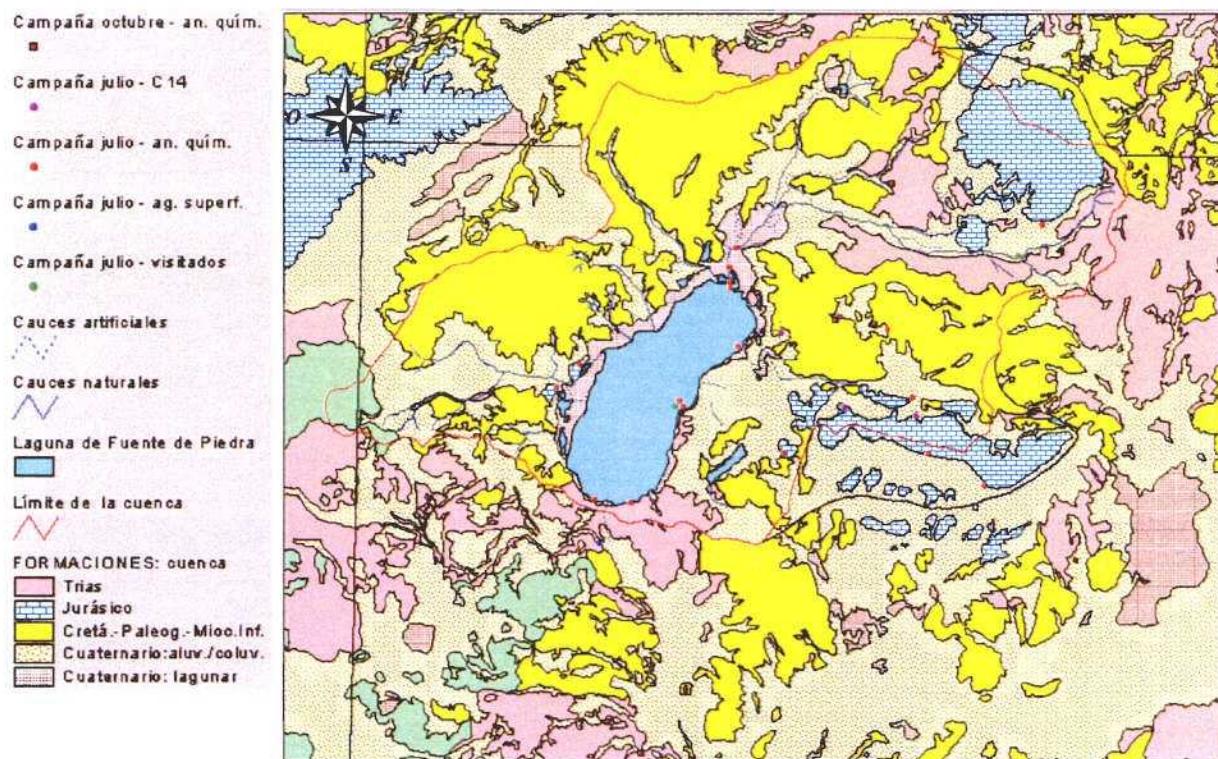


Figura VII.1. Puntos visitados en las campañas del año 2003

Tabla VII.1. Características de los puntos visitados en las campañas hidrogeoquímicas del 2003

Toponimia	Hoja	Oct	Punto	Utm_x	Utm_y	Cota	Prof	D int (mm)	Material	Ranuras	Litología	Nº Muest.	Perf Cond	Ens_dens	C ¹⁴	
ITGE nº 4 La Albina	1642	2	313	344982	4112484	414	25	110	PVC	Todo(?)	0-23 M, -25 T	2	S	S(B)		
SGOP nº 3 La Herriza	1642	1	74	340999	4109472	442	164.1	72	Hierro	24.0-164.0	0-155 C, -164 T	3	S	S(M)		
SGOP nº 4 La Victoria	1642	2	326	346199	4107247	447	90.5	72	Hierro	23.5-90.0	0-12 C, -90 J		S	S(B)		
UGr 1 laguna N	1642	2	309	344801	4111979	412	34	72	PVC	Todo	0-12 Cu, -35 M	3	S			
UGr 2 laguna N	1642	2	319	344835	4111440	410	34	72	PVC	Todo	0-16 Cu, -34 M	1	S	S(M)		
UGr 3 laguna N	1642	2	320	344848	4111603	410	39	72	PVC	Todo	0-12 Cu, -39 M, 39 T	1	S	S(M)		
UGr Las Latas	1642	1	72	341394	4106020	410	8.5	72	PVC	Todo	0-5 Cu, -8 T	1	S			
UGr Desembocadura de El Charcón	1642	2	322	345014	4109944	410	15.5	72	PVC	Todo	0-1 Cu, -15 M	1	S	S(M)		
La Madriguera *	1642	1		340395	4108899	420	6.5	2000	cemento	Todo	Cu, C(?)	2	S			
Limnigrafo laguna/noria del Ancón	1642	2	267	343438	4108408	410.5	4.2	2200x1050	Piedra		0-4 Cu	0	S			
Noria del Ancon (N)	1642	2	268	343528	4108556	410	3.65	2200x1050	Piedra	Todo	0-4 Cu	1	S			
UGr El Ancon	1642	2	323	343635	4108406	409	13.8	72	PVC	Todo	Cu, T(?)	1	S	S(M)		
Trias-Sur de la Laguna - Las Latas*	1642	1	0	342317	4105978	410	4.4	5000	s/reves	Todo	Cu, T(?)	1				
Mollina-pie de la sierra - Moll Nw 1*	1642	3	0	352727	4113096	489	90	400	Hierro	Todo	Cu, C(?)	1				
Villa Romero (La Herradura)	1642	2	303	348832	4110395	449	35		Hierro	Todo	M (?)	1				
Fermontas- Humilladero*	1642	2	0	349460	4108669	450	100		Hierro	Todo	Cu, M(?), T(?)	1				
IRYDA-Cortijo Vaquerizo	1642	3	103	352146	4112266	467	300	430	Hierro		0-14 M, -300 T	0				
Abast.Humilladero-Sa. Humilladero	1642	2	257	349545	4108189	477	116	400	Hierro	33-48, 57-110	0-116 C	1		S		
Fca. de aceitunas	1642	2	290	347617	4110723	449	99	350	Hierro	Todo	0-99 M, 99 T	1		S		
Abast. Fte de Piedra-S.Humilladero	1642	2	314	347746	4108396	480	149	260			122-149	0-12 Cu, 110 T, -150 C	1		S	
Llano Málaga*	1642	2	0	346141	4110305	421	100			Todo(?)	M (?)	1		S		
Pje. Ferradores-Sa. Humilladero*	1642	6	0	351302	4106424	522	245	250		Todo	C, M(?), T(?)	2	S	S(B)		
Pje.Sarco(Ganancia)-S.Humilladero*	1642	6	0	349866	4107241	547	200	400	Hierro	160-200	C, M(?), T(?)	1				
Orujera***	1641	6	35	348960	4114126	437	200		Hierro	Todo		1				
IGME nº 2 La coneja ***	1642	2	312	348517	4110539	447	45	110	PVC	Todo	0-45 M	1				
IGME nº 3 Mollina- Santillán***	1642	3	109	350781	4113074	459	44	160	PVC	Todo	0-44 C	1				
Ctjo.Mtemayor-manant (Cañaveralejo)***	1642	5	29	341745	4100327	399	Man.				T	1				
Ctjo.Mtemayor-abastecimiento***	1642	5	33	342582	4099555	396	Man.				M	1				
Alberq***	1642	6	24	342888	4102655	417	Man.				M(?),T (?)	1				
SGOP nº 2 Fuente de Piedra -37/74***	1642	2	325	347518	4110607	454	103.7	98	Hierro	20.7-103.7	0-95.2 C, -103.7 T	1				
Laguneto - UGr 3**	1642	2	0	344875	4111650	410						1				
Ayo. Las Tinajas**	1642	1	0	341525	4104918	411						1				
Laguna -La Madriguera**	1642	1	0	340415	4108860	425						1				

D int : diámetro interno del sondeo o pozo

Ens_dens: ensayos de densidad

LITOLOGÍAS: Cu, cuaternario; M, mioceno, C, calizas jurásicas; J, margas jurásicas; T, trias

* Puntos no inventariados

** Puntos de agua superficial

*** Puntos muestreados en Octubre

VII.2- Actividades y técnicas utilizadas

VII.2.1- Análisis de la distribución espacial de la salinidad de las aguas subterráneas: Perfiles de conductividad y temperatura

Se realizaron los perfiles de conductividad y temperatura del agua en varios pozos y sondeos utilizando la sonda de resistividad y temperatura de un equipo de testificación geofísica y también con un conductivímetro provisto de una sonda con un cable de 200 m de longitud. Los perfiles de estos dos parámetros han permitido evaluar la distribución espacial de las aguas subterráneas en diferentes sectores de la Cuenca de la Laguna de Fuente de Piedra. Los perfiles se ejecutaron desplazando la sonda de conductividad con saltos de un metro cuando se empleó el conductivímetro. Los errores típicos de medida de la conductividad dados por ambos instrumentos son del orden del $\pm 2\%$. Esta actividad se ha llevado a cabo en la mayor parte de los pozos accesibles.

VII.2.2- Ensayos de marcado de la columna de agua

Para la evaluación de la presencia y magnitud de los flujos de agua subterránea existentes se utilizó la técnica del marcado de la columna de agua, utilizando como trazador una solución saturada de sal común, y en el caso de las aguas subterráneas más salinas con una solución de ^{131}I . El procedimiento de marcado de la columna de agua es el siguiente:

1. Se introduce hasta el fondo del sondeo una manguera de plástico provista de un lastre para facilitar su introducción. La manguera posee un diámetro externo de 14 mm e interno de 11 mm. Por el extremo superior de la manguera, se inyecta un volumen de solución saturada de sal común (o de solución conteniendo el isótopo ^{131}I) igual al volumen interno de la misma, medido desde el nivel piezométrico hasta el fondo del sondeo. La inyección se realiza por simple vertido de la solución a través de un embudo.
2. Se extrae la manguera lentamente y a una velocidad constante. Como ésta se encuentra abierta por ambos extremos, la solución de sal común (o de isótopo) se distribuye a lo largo de la toda columna de agua del sondeo de una forma, más o menos, uniforme.
3. Una vez efectuada la inyección del trazador, se miden perfiles de conductividad (o la actividad de ^{131}I , con el detector de centelleo de la sonda de gamma natural) en intervalos periódicos de tiempo con el fin de estudiar la dilución del mismo como consecuencia de los flujos o difusión diferencial que pueda existir en el interior del sondeo, es decir, se determina la disminución de la conductividad (o de actividad, en cps) en función del tiempo. Para la medida de estos perfiles, se utilizó el mismo conductivímetro o la sonda de gamma natural mencionados en el apartado anterior.

Los cambios de conductividad (o de actividad de ^{131}I) producidos en función del tiempo a lo largo de la columna de agua proporcionan información cualitativa y, a veces, semicuantitativa sobre los flujos existentes dentro del sondeo.

Este ensayo permite identificar la existencia tanto de flujo horizontales como verticales que pudieran establecerse dentro del sondeo. La presencia de flujos verticales es habitual en pozos muy profundos e implica que niveles que anteriormente estaban desconectados hidráulicamente se conectan a través de las propias perforaciones. Estos flujos se pueden estudiar también mediante un micromolinete, ensayos de pulso térmico o mediante ensayos de inyección puntual de un trazador a la profundidad requerida.

En ausencia de flujos verticales, la disminución de la concentración de trazador (o de la conductividad) en función del tiempo tiene lugar según una ley exponencial. La pendiente de la recta obtenida es una medida de la velocidad horizontal (velocidad Darcy) del flujo subterráneo. Esta velocidad (v) se obtiene

a partir de la ley exponencial antes mencionada, la cual conduce, después de diversas transformaciones a la fórmula práctica siguiente:

$$v = \frac{1,81d}{\alpha t_{1/10}} \quad (1)$$

donde: d es el diámetro interno del sondeo, $t_{1/10}$ el tiempo necesario para que la concentración de trazador disminuya a la décima parte y α un coeficiente que es necesario introducir debido a la perturbación hidrodinámica del flujo subterráneo producido en el entorno del sondeo ya que el flujo a través del sondeo tiene una velocidad mayor que el existente en el acuífero. El coeficiente corresponde a la relación entre el caudal que circula por una sección del sondeo y el caudal que circula por la misma sección del acuífero. Dicho coeficiente depende de las características constructivas del sondeo, incluyendo la permeabilidad del tubo de revestimiento del mismo. Cuando la tubería de revestimiento tiene una permeabilidad mucho mayor que la del medio poroso y no existe relleno alguno de grava alrededor del sondeo, el valor de α es 2. En el caso presente, la ausencia de tubería de revestimiento, lleva adoptar el valor de 1.5.

VII.2.3- Toma de muestras para análisis químicos e isotópicos

Tras la obtención de las diografías (gamma natural, resistividad y potencial espontáneo), y la medida de parámetros físico-químicos se tomaron las muestras para la realización de los análisis químicos (iones mayoritarios) y de isótopos del agua ($O-18$ y D), tritio y carbono-14. Se utilizaron muestreadores de acero inoxidable equipados con un pequeño orificio para minimizar la mezcla de agua procedente de diferentes horizontes. En ciertos pozos y piezómetros se tomaron muestras a varias profundidades tras el análisis de los perfiles iniciales de conductividad.

VII.2.4- Análisis químicos e isotópicos

En la práctica totalidad de las muestras de agua tomadas en las campañas del año 2003 se han realizado análisis químicos de iones mayoritarios. Dichos análisis se han realizado en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX mediante cromatografía iónica. La validez de los análisis se verificó acorde con el control de calidad analítica de dicho laboratorio.

En las mismas muestras se han realizado análisis de los isótopos estables del agua (oxígeno-18 y deuterio), utilizando para ello, las métodos habituales de espectrometría de masas. Dichos análisis se han realizado igualmente en los laboratorios del CEDEX.

La composición isotópica del agua se expresa en la forma de desviaciones isotópicas (en tanto por mil, ‰) con respecto a un patrón internacional representativo del agua del mar, que se toma como cero de la escala y que se conoce por las siglas VSMOW (en inglés, *Vienna-Standard Mean Oceanic Water*). Este patrón es utilizado por todos los laboratorios del mundo con el fin de homogeneizar los resultados de los análisis. Mas concretamente, la desviación isotópica viene dada por la expresión:

$$\delta_m = \frac{R_m - R_{VSMOW}}{R_{VSMOW}} \times 10^3 \quad (2)$$

donde: R representa la relación entre el número de moléculas pesadas (moléculas del tipo DHO o ^{18}O) y ligeras (2H o ^{16}O) existentes en la muestra y en el patrón internacional. Valores negativos de esta desviación (en ‰) indican que el número de moléculas con la especie isotópica pesada en la muestra es inferior a la misma relación en el patrón. La incertidumbre analítica típica es de ±0,1 ‰ para $\delta^{18}O$ y ±1 ‰ para δD .

Para el estudio de la dinámica de las aguas subterráneas se procedió a la datación radiométrica de las aguas subterráneas, utilizando para ello el isótopo de hidrógeno de masa 3 (tritio) y la actividad del carbono-14 presente en el carbono inorgánico disuelto en el agua subterránea.

Debido a las bajas concentraciones de tritio que se encuentran en las aguas naturales, su medida sólo es posible mediante un proceso previo de concentración, que se realiza por vía electrolítica. En este proceso, se somete a electrólisis un volumen de agua de unos 500 ml y el proceso se interrumpe cuando el volumen de agua remanente es de unos 12 ml. En este volumen se encuentra, aproximadamente, el 80% del tritio. Los análisis de tritio han sido realizado en los laboratorios de Hidrología Isotópica del CEDEX, en Madrid.

Como es usual en Hidrología Isotópica, las concentraciones de tritio se expresan en unidades de tritio (UT). La unidad de tritio (UT) equivale a una relación ${}^3\text{H}/\text{H}$ igual a 10^{-18} en número de átomos de ${}^3\text{H}$ respecto a ${}^1\text{H}$. La incertidumbre analítica es del orden de 0,3 a 0,5 UT. Las equivalencias con otras unidades de radiactividad son:

$$1 \text{ UT} = 3.1927 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/m}^3$$

$$1 \text{ UT} = 0.11813 \text{ bequerelios/litro (Bq/l)}$$

Los análisis de carbono-14 se han realizado en los laboratorios del CEDEX tras la precipitación en el campo del carbono inorgánico disuelto en forma de CO_3Ba . El carbono presente en el precipitado se ha extraído en forma de CO_2 y éste se ha convertido en acetileno y finalmente, en benceno. La actividad de carbono-14 se ha determinado en el benceno generado tras añadir un coctail de centelleo. En la medida en el contador de centelleo líquido se ha comparando la actividad de cada muestra con la de patrones internacionales.

La actividad de carbono-14 en una muestra se expresa como porcentaje de carbono moderno, (pCM) con relación a un patrón internacional denominado "Carbono Moderno", cuya actividad se define como el 95% de la actividad de carbono-14 del patrón de ácido oxálico del *National Bureau of Standard* (NBS) en el año 1950. Este valor corresponde aproximadamente a la actividad de carbono-14 de la madera que crecía hacia 1890, es decir, en la época en que la actividad de carbono-14 en el ${}^{14}\text{CO}_2$ no estaba afectada de forma evidente por las emisiones de combustibles fósiles (carbón y petróleo). Dicha actividad equivale a, aproximadamente, 13.56 desintegraciones por minuto por gramo de carbono (dpm/g de C). La incertidumbre analítica suele ser inferior a ± 1 pCM.

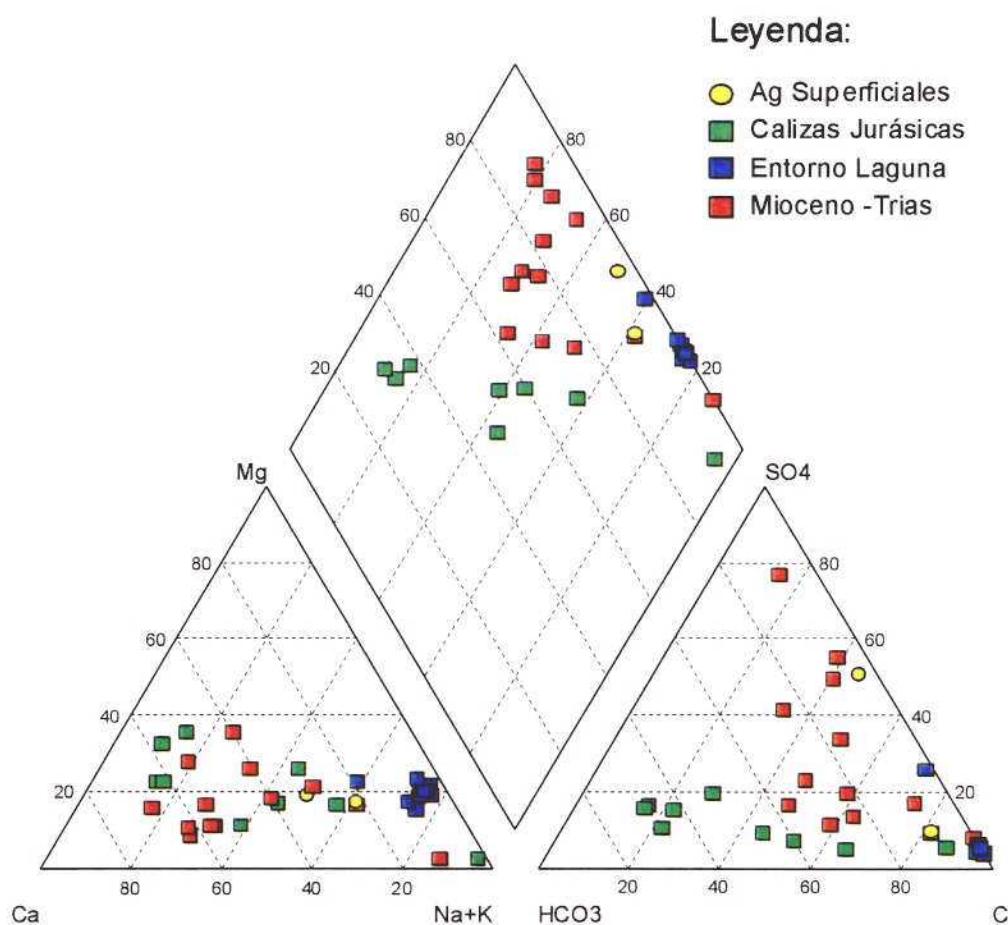
Finalmente, se ha determinado la desviación isotópica de carbono-13 en el carbono inorgánico disuelto de varias muestras. La abundancia de dicho isótopo se ha medido por espectrometría de masas utilizando el CO_2 generado a partir del precipitado de CO_3Ba obtenido en el campo. La concentración de carbono-13 se expresa en unidades δ , es decir, desviaciones en ‰ respecto a un patrón internacional denominado V-PDB (Vienna Pee-Dee Belemnite). De forma similar a los isótopos del agua, los contenidos de este isótopo estable se expresan de la siguiente forma:

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{R_m - R_p}{R_p} \times 10^3 (\text{‰}) \quad (3)$$

donde: R_m la relación ${}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ en la muestra, R_p la misma relación isotópica en un patrón internacional de carbono-13, al cual se le asigna por convención un valor $\delta^{13}\text{C}$ igual a 0‰. La incertidumbre analítica típica es del orden de ± 0.15 ‰.

VII.3- Familias de aguas identificadas

Los análisis de campo junto a los análisis químicos e isotópicos realizados en esta fase del estudio han estado dirigidos a caracterizar familias de agua en los diferentes ambientes o sectores de la Cuenca de Fuente de Piedra y su entorno. Los resultados de los análisis químicos de las muestras tomadas en las campañas de julio y octubre de 2003 se presentan en la Tabla VII.2. Las principales características de las aguas recopiladas hasta ahora se presentan mediante un diagrama de Piper (Figura VII.2). Las salmueras y las aguas situadas en el entorno próximo a la laguna presentan un claro predominio de las facies cloruradas sódicas. En el lado contrario se encuentran las facies bicarbontadas cálcico-magnésicas que corresponden a las aguas de los paquetes carbonatados jurásicos. En las zonas del mioceno se encuentran generalmente aguas de carácter intermedio y localmente aguas sulfatadas, que corresponden a puntos donde domina el proceso de disolución de yeso. Las observaciones referentes a las distintas familias identificadas se describen en las secciones siguientes.



FiguraVII.2. Diagrama de Piper mostrando las abundancias iónicas relativas de los diferentes tipos de aguas diferenciados en este estudio

Tabla VII.2. Composición química de las muestras de agua recolectadas en las campañas de Julio y Octubre de 2003.

ID MUESTRA	Ref	Date	Cond	PH	Na	K	Ca	Mg	F	Cl	NO2	Br	NO3	SO4	HCO3	CO3
Zona alta (relacionados con los paquetes de calizas jurásicas)																
ITGE-3 Mollina Santillán	3816	15/10/2003	630	8.11	21.7	1.3	69.0	29.6	0.4	36.5	0.0	0.0	27.3	50.0	262.3	0.0
MOLINA NW-1	3757	15/07/2003	730	7.62	18.4	1.8	92.8	31.6	0.4	38.8	0.4	0.3	19.3	52.7	292.8	0.0
Abast HUMILLADERO	3748	15/07/2003	749	7.42	23.9	1.2	95.8	20.7	0.4	48.9	0.0	0.4	30.9	31.1	257.4	0.0
Abast Fte Piedra	3756	15/07/2003	780	7.53	29.5	0.1	101.7	22.6	0.4	56.4	0.0	0.4	31.4	51.8	272.1	0.0
HUM-Ganancia 140M	3760	15/07/2003	885	7.44	129.1	2.0	40.0	20.6	0.6	86.9	0.0	0.8	7.4	79.2	270.8	0.0
HUM-Ferradores 120M	3764	15/07/2003	1300	7.42	132.3	4.9	105.9	27.7	0.7	229.3	1.9	1.1	13.9	40.6	301.3	0.0
HUM-Ferradores 210M	3765	15/07/2003	1700	7.61	221.5	15.3	94.2	34.9	1.1	392.1	2.1	1.2	10.9	41.8	311.1	0.0
Zona intermedia (sobre materiales miocenos y cuaternarios)																
Fábrica Aceitunas	3753	15/07/2003	1205	7.87	100.6	4.4	154.7	18.2	0.5	202.9	1.3	1.0	71.5	95.6	274.5	0.0
SGOP-2 (37)	3813	15/10/2003	1153	7.66	137.2	5.5	72.6	31.8	1.4	256.5	9.5	1.7	7.1	75.4	168.4	0.0
SGOP-2 (74)	3814	15/10/2003	1315	7.65	125.0	4.8	107.2	29.7	1.4	251.1	33.3	0.0	16.6	65.3	223.3	0.0
Villaromero (La Herradura)	3755	15/07/2003	1560	7.70	93.0	1.8	187.8	19.1	0.4	217.4	0.0	1.2	183.5	143.3	234.2	0.0
HUM-Fermonas	3763	15/07/2003	1900	7.11	140.8	1.0	217.7	25.5	0.8	354.4	0.0	1.6	115.7	159.0	234.2	0.0
ITGE-2 La Coneja	3815	15/10/2003	1969	7.90	132.9	4.5	260.7	21.0	1.2	282.2	165.1	0.0	29.5	258.6	162.3	0.0
Llano Málaga	3762	15/07/2003	2200	7.28	140.7	2.1	244.7	44.0	0.6	246.9	0.0	1.5	108.0	413.9	325.7	0.0
Orujera	3817	15/10/2003	4420	7.95	216.5	10.4	560.2	174.0	2.6	731.0	29.2	4.2	21.4	1221.6	330.6	0.0
SGOP-4 La Victoria (0-40)	3751	15/07/2003	5000	8.03	1066.4	4.8	22.7	14.6	3.2	1414.9	0.0	0.0	0.0	115.1	212.3	0.0
Las Latas	3752	15/07/2003	5500	7.37	416.9	9.7	454.0	175.5	3.1	672.8	0.0	3.4	58.3	1310.2	201.3	0.0
La Madriguera	3749	15/07/2003	6300	7.66	883.4	2.3	276.5	126.5	2.6	1577.7	0.0	7.0	106.8	236.7	307.4	0.0
Laguna La Madriguera	3750	15/07/2003	6500	7.65	908.2	2.4	283.9	136.1	2.6	1618.8	0.0	7.0	104.9	252.8	301.3	0.0
IGME 4 La Albina	3758	15/07/2003	7400	7.44	416.8	8.6	594.4	321.1	2.4	1747.2	0.0	9.9	55.9	532.1	356.2	0.0
Zona baja (junto a Laguna de Fte de Piedra)																
UGr-Las Latas (0-8)	3747	15/07/2003	40000	7.29	5277.2	15.0	1470.8	1078.0	12.5	10068.5	0.0	26.8	0.0	4850.8	490.4	0.0
SGOP-3 La Herriza (25-32)	3759	15/07/2003	20000	7.37	3386.5	73.0	382.7	370.3	11.9	6523.1	32.5	31.5	0.0	384.3	181.8	0.0
SGOP-3 La Herriza (80)	3761	15/07/2003	160000	4.57	28226.0	37.5	3430.0	3589.0	0.0	54783.0	0.0	125.0	0.0	2886.0	3.7	0.0
UGr-1 Laguna Norte (20)	3740	15/07/2003	250000	7.10	43760.0	105.0	3726.0	5856.0	0.0	89500.0	0.0	200.0	0.0	4883.0	281.8	0.0
UGr-2 Laguna Norte (8)	3742	15/07/2003	250000	6.99	41932.0	105.0	3211.0	5643.0	0.0	84322.0	0.0	169.0	0.0	4953.0	211.1	0.0
UGr-2 Laguna Norte (20)	3741	15/07/2003	350000	6.87	58779.0	110.0	2953.0	7640.0	0.0	116984.0	0.0	500.0	0.0	6216.0	225.7	0.0
UGr-3 Laguna Norte (20)	3744	15/07/2003	300000	7.31	50811.0	55.8	2793.0	7333.0	0.0	104106.0	0.0	327.0	0.0	5511.0	219.6	0.0
UGr- El Ancón (0-10)	3745	15/07/2003	250000	6.76	38742.0	90.8	2436.0	5558.0	0.0	73667.0	0.0	297.0	0.0	5879.0	212.3	0.0
UGr- El Charcón (0-4)	3746	15/07/2003	300000	7.15	46561.0	72.1	3054.0	8055.0	0.0	96314.0	0.0	323.0	0.0	7483.0	275.7	0.0
Noria El Ancón	3754	15/07/2003	300000	7.21	52764.0	266.0	2082.5	8020.0	0.0	102024.0	0.0	303.0	0.0	9297.0	246.4	0.0
Laguneto junto UGr3	3743	15/07/2003	250000	8.20	42780.0	92.6	3053.0	7040.0	0.0	86438.0	0.0	291.0	0.0	8062.0	275.7	12.0
Fuera de la Cuenca																
Alberquilla	3818	15/10/2003	935	7.81	79.2	3.0	92.6	12.4	0.4	135.9	0.0	0.7	41.2	37.8	240.3	0.0
Montermayor (Abast)	3819	15/10/2003	4826	7.76	190.3	11.1	706.5	98.6	3.6	253.8	45.0	0.0	12.1	1807.1	252.5	0.0
Arroyo La Tinaja	3766	15/07/2003	8900	7.52	1003.8	3.6	569.1	206.9	2.8	1304.8	0.0	7.8	79.4	1996.9	209.9	0.0
Manant Cañaveralejo	3820	15/10/2003	110000	7.69	22771.0	55.0	2451.5	317.0	278.0	35550.0	484.0	0.0	860.0	4154.0	284.3	0.0

VII.3.1- Aguas en los paquetes calizos jurásicos

En estos materiales se hallan las aguas con el menor grado de mineralización de la cuenca, en muchos casos, por debajo de 1 mS/cm y 1 g/l, ya que proceden de materiales carbonatados jurásicos, sierras de Humilladero y Mollina. Los pozos de extracción son los situados a mayor cota de la cuenca. Se trata de pozos que superan los 100 m de profundidad y se utilizan para abastecer las poblaciones de Fuente de Piedra y Humilladero o para riego. Su contenido de tritio es ligeramente inferior a los de la precipitación actual; ello, junto a valores de ^{14}C , sugieren edades superiores a las encontradas en los pozos del mioceno y mayores a las que se esperaría en este tipo rocas fracturadas. Igualmente, se han hallado contenido apreciables de nitratos, de 10 a 30 mg/l, en las aguas de estos pozos, no existiendo fuente alguna del mismo en estas sierras. Estos efectos posiblemente sean el resultado de la intensa explotación de esta agua de buena calidad, que ha llevado tanto a la extracción de aguas profundas de más lenta renovación, como a captar aguas del mioceno -donde se desarrolla la actividad agrícola-, invirtiendo el gradiente natural de las aguas subterráneas.

VII.3.2- Aguas de la zona intermedia

En esta zona donde predominan los materiales miocenos, y cuaternarios y posee un relieve suave, extendiéndose entre la laguna y las zonas elevadas que constituyen los materiales carbonatados de las sierras de Humilladero y Mollina. En el centro de esta zona se sitúa aproximadamente un depocentro del mioceno superior, donde los pozos pueden alcanzar los 100 m de profundidad. Los pozos son de uso agrícola o de industria de transformación. Estas aguas son geoquímicamente más evolucionadas, con salinidades que alcanzan los 3-5 g/l y valores de conductividad eléctrica entre 1200 y 7000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Además de la mineralización originada por disolución al atravesar una litología con sales solubles, dicha salinidad aumenta debido al retorno de riego (por evaporación e incorporación de nitratos). Los contenidos de tritio y nitratos son elevados. Ello corroboraría el alto potencial de recarga del mioceno. En la cuenca baja del arroyo Santillán, en aguas de salinidad elevada y niveles freáticos relativamente próximos a la superficie, resulta sorprendente la magnitud del flujo subterráneo. Sus velocidades son del orden de 5 m/d en estiaje y bajo la influencia de bombeos (07/2003) y en torno a 2 m/d en aguas altas (02/2004).

VII.3.3- Salmuera bajo y alrededor de la laguna.

Estas aguas subterráneas presentan una elevada salinidad, con contenidos de sales entre 20 y 250 g/l bajo la laguna y conductividades entre 40 y 300 mS/cm. En la orilla de la laguna se sitúan piezómetros y en su lecho hay norias excavadas durante la explotación salinera de la misma. La comparación entre los perfiles de conductividad y temperatura medidos en el entorno de la laguna con los medidos de la Universidad de Granada entre 1992 y 1998 (Benavente et al., 2003) pone en evidencia la similitud entre los perfiles. Ello sugiere una gran estabilidad espacio-temporal de la interfase agua dulce/agua salada existente en cada punto. Esta estabilidad se revela independiente del nivel de agua en la laguna, la influencia estacional o del ciclo. Sin embargo, si bien localmente -en vertical- la salinidad prácticamente no varía, sí se constata una evolución de la salinidad de la salmuera freática, con una clara disminución tanto N-S, como E-O (Figura VII.3). En la Herriza la diagrafía de gama natural (Figura VII.4) indica a 120 m de profundidad un nivel confinante notorio, aunque escasa potencia, por otro lado el ensayo de flujo con ^{131}I pone en evidencia la existencia de un flujo profundo con sentido ascendente entre los 140 y 120 m y de otro horizontal en torno a los 30 m, coincidente este con la cota del lecho de la laguna. Los datos de tritio disponibles indican que las salmueras en la desembocadura



FiguraVII.3. Variabilidad espacial de la salinidad de la salmuera en el perímetro de la laguna, en TDS (g/l)

del Santillán carecen de tritio, ello refleja la lenta dinámica en dicho sector. Sin embargo, en las salmueras delas norias situadas en el vaso de la laguna se han medido valores superiores a 1 UT.

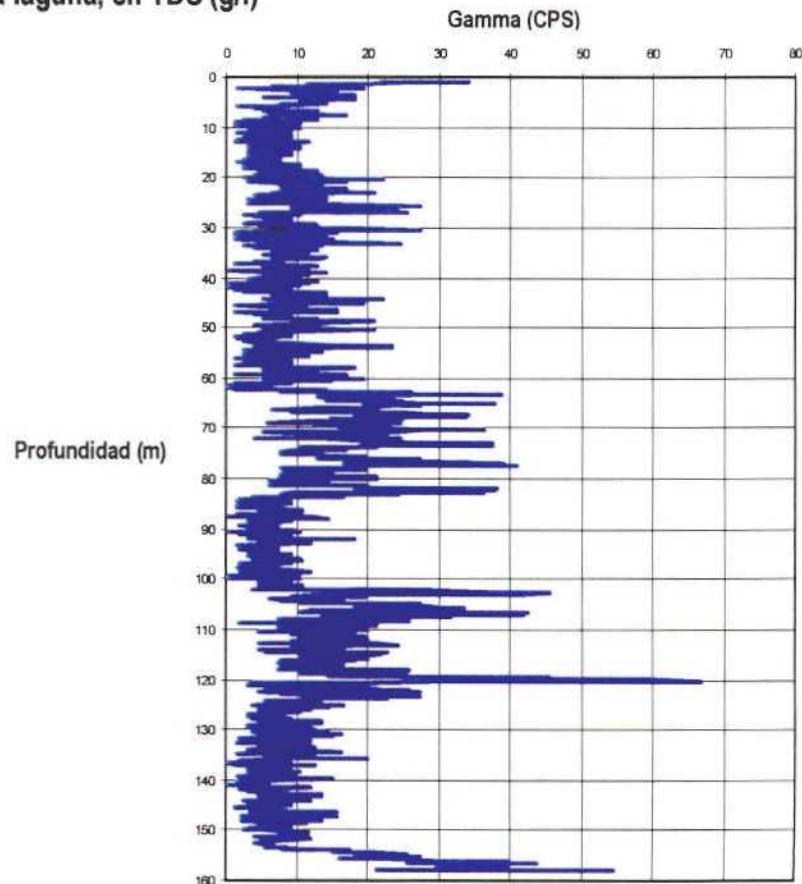


Figura VII.4. Diagrafía de gamma natural en el sondeo SGOP nº 3 La Herriza

VII.3.4- Aguas de zonas situadas fuera de la Cuenca de Fuente de Piedra.

La investigación de posibles flujos profundos ha llevado a considerar como zonas de interés que pudieran constituir puntos de descarga de dichos sistemas. Estos puntos se sitúan fuera de la cuenca de la laguna y están siendo investigado actualmente. Las aguas muestreadas y analizadas presentan un gran contraste de salinidad entre sí.

VII.4- Datación de las aguas- Resultados de los análisis de tritio

Los resultados de los análisis de tritio obtenidos se presentan en la Tabla VII3. La interpretación general de los mismos ya se ha realizado en párrafos anteriores. Una interpretación se realizará más adelante junto al resto de datos de isotópos estables y carbono-14.

Tabla VII.3. Contenidos de tritio de las muestras de agua

Muestra	Punto	Contenido de tritio (U.T.)	Incertidumbre analítica (U.T.)
Ugr-Ch 0-4m	1642-2-322	0.27	0.33
Ugr 3 - 20m	1642-2-320	0.34	0.34
Ugr 1-20m	1642-2-309	0.77	0.36
Ugr-An 0-10m	1642-2-323	1.00	0.37
Ugr-LI 0-8m	1642-1-72	1.30	0.38
Molina nw-1	No inventariado	1.30	0.38
ferradoras 120m	No inventariado	1.42	0.39
SGOP 3 La Herriza 80m	1642-1-74	1.56	0.39
Abast.Fuente de Piedra	1642-2-314	2.24	0.42
Abast Humilladero	1642-2-290	2.40	0.43
Fbca. de aceitunas	1642-2-290	3.43	0.47
Noria Ancon	1642-2-268	3.64	0.48
Ctjo. Mtemayor-abaste.	1642-5-33	4.00	0.40
Las Latas	No inventariado	4.54	0.51
La Madriguera	No inventariado	4.55	0.51
Ctjo.Mtemyor-Cañaveralejo	1642-5-29	4.90	0.40

Las concentraciones de tritio en la precipitación sobre la zona objeto del estudio han sido superiores a unas 3-4 U.T. durante los últimos 50 años, habiendo alcanzado un valor máximo de unas 1.500 U.T. en el año 1963, debido a la gran cantidad de tritio emitido a la atmósfera durante los años 1962 y 1963, a partir de las explosiones termonucleares. Si se consideran las concentraciones de tritio corregidas por desintegración radiactiva hasta el momento de la toma de muestras, puede decirse, igualmente, que las concentraciones de las aguas infiltradas posteriormente al año 1956 serían en el momento presente superiores a unas 3-4 U.T. Por otra parte las concentraciones medias corregidas por desintegración han variado muy poco durante el periodo 1985 a 2002, con un valor medio igual a 4.5 U.T.

VIII. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO PROPUESTAS

El objetivo inicial de este Proyecto fue el desarrollo de un modelo numérico del sistema hidrogeológico de la laguna de Fuente de Piedra. El fin del modelo era su uso como herramienta de apoyo a la gestión hídrica de la cuenca. La estructura de este modelo se basaba en el modelo conceptual vigente hasta ese momento. Sin embargo, dicho modelo que en muchos aspectos ofrecía aspectos de interés, presentaba inconsistencias serias, así como incertidumbres y falta de actualización en la información sobre algunos aspectos del sistema.

Las inconsistencias detectadas se centraban en la variabilidad de la densidad del flujo del sistema. En revisión sucinta se señala que:

- Siendo la variabilidad de la densidad del flujo un rasgo del sistema por todos conocido y aceptado, el patrón de flujo que se asumía era el de un modelo Todd gobernado en exclusivo por el gradiente hidráulico, amén del eventual control geológico que pudiera ejercer la heterogeneidad del medio. Este planteo, evidentemente se basa en considerar a la densidad del flujo como constante.
- Si bien se habían realizado estudios sobre la salmuera freática bajo el lecho de la laguna y en su vecindad, sólo existía un conocimiento muy limitado de la evolución espacio-temporal de la misma.
- Si bien existían distintas hipótesis sobre el/los mecanismo/s de enriquecimiento en sales de la salmuera, ninguna de las mismas se hallaba contrastada ni por observaciones o ensayos de campo. Asimismo, alguna de ellas no podían explicar por sí mismas observaciones realizadas en el transcurso de este proyecto.
- No existían los datos hidrogeoquímicos necesarios para le desarrollo de un modelo de numérico que contemple la variación de la densidad del flujo.

Las incertidumbres y falta de actualización se correspondían a los siguientes aspectos del sistema:

- Los marteriales del Mioceno Superior conforman el acuífero más importante del sistema, en él se sitúan la casi totalidad de las explotaciones del sistema -excluyendo a los bombeos para abastecimientos-. Acerca del muro -y con ello de la potencia- de esta formación no existía siquiera una estimación de su evolución dentro de la cuenca, sólo se tenía la apreciación que en el oeste su potencia era somera y en el este más espesa. La recarga de esta formación estaba infravalorada.
- Las calizas jurásicas es la formación con el agua de mejor calidad de la cuenca y en las que se sitúan en exclusiva los bombeos de abastecimiento. Sobre la potencia de las mismas existe un total desconocimiento y el control de la calidad y cantidad de las aguas que se explotan es inexistente.
- Una variación de la lámina de agua en la laguna de un orden decimétrico puede tener un impacto importante en la colonia de flamencos. Debido a ello la gestión hídrica de la laguna es de una extrema sensibilidad. El Modelo Digital del Terreno, MDT; más preciso –el del Instituto Geográfico Nacional, IGN- presentaba un error máximo en el vaso de la laguna que superaba los 9 m y un error medio que superaba los 5 m. Este MDT en la cuenca baja del arroyo de Santillán -área estrechamente vinculada a la laguna y de muy importante en la gestión hídrica- presentaba errores de igual magnitud que en el vaso.

- La evaluación de las explotaciones se hallaba claramente desfasadas respecto a su evolución, tanto por los cambios de actividades económicas y uso del suelo, como len los acaecidos en las prácticas agrícolas.
- La red piezométrica que se media si bien demandaba un gran esfuerzo, no era la más adecuada para caracterizar ni para monitorizar el sistema hidrogeológico. La red de calidad era inexistente.

Habida cuenta del estado del conocimiento del medio antes descrito se fijó como nuevo objetivo del Proyecto el avanzar en la caracterización del sistema hidrogeológico de la Laguna de Fuente de Piedra, en pos de poder definir un modelo conceptual consistente.

Se procuraría que el modelo conceptual considerase la variación de la densidad del sistema de flujo y la influencia sobre el patrón de flujo y el balance hídrico del sistema. Este requerimiento respondía a la necesidad de desarrollar en futuro un modelo numérico del sistema que contemple la variación de la densidad del flujo. El modelo debería contribuir mediante la simulación de escenarios de estudio a establecer una gestión sostenible de la cuenca.

Atendiendo a las carencias en el conocimiento del medio y procurando responder al nuevo objetivo trazado se realizaron interesantes avances basados tanto en actividades de campo como de gabinete. Entre las aportaciones realizadas es de interés destacar las siguientes:

- Se realizó una exhaustiva revisión del conocimiento geológico de la cuenca, procurando actualizarlo y establecer vínculos con el complejo olitostrómico subbético vecino -sedimentos de origen triásico removilizados en el Mioceno Medio, anteriormente cartografiado como Trias de Antequera-.
- Se desarrolló un Modelo de Digital del Terreno sobre la base del MDT del IGN. El nuevo modelo presenta un error en el vaso de la laguna que no excede los 50 cm, así como una notable mejora en la representación altimétrica de la cuenca baja del arroyo Santillán.
- El determinar el muro del Mioceno Superior permitió identificar de forma consistente un depocentro situado al noreste de la laguna -en el paraje de La Coneja-, donde el acuífero prácticamente alcanza los 100 m. Asimismo los datos indican la existencia de otro depocentro situado al oeste de la laguna, en el interflujo con la cuenca del arroyo de La Albina perteneciente a la cuenca del Guadiana -en el paraje de Buenavista- donde el acuífero alcanzaría los 75 m. En cuanto a la identificación de la evolución en la cuenca del muro del Mioceno Superior, los resultados alcanzados presentan un aceptable grado de aproximación, si bien se considera pueden ser mejorables. Se entiende por mejora, no sólo una definición espacial más "natural" -"menos influenciada por las técnicas de interpolación"-, sino, fundamentalmente, de contar con un número mayor de datos con el fin de dotar a la interpolación de una consistencia mayor aún.
- Los estudios hidrogeoquímicos e isotópicos han permitido realizar importantes avances en la caracterización del sistema, así como en la valoración de la gestión hídrica que se realiza en la cuenca. Los resultados más relevantes son los siguientes:
 - Se identificaron 4 familias de aguas en: los paquetes calizos jurásicos; los sedimentos detriticos Miocenos y Cuaternarios; la salmuera bajo y alrededor de la laguna y los manantiales fuera de la Cuenca de Fuente de Piedra.
 - El fuerte y abrupto contraste de densidades entre la salmuera de la Laguna de Fuente de Piedra y las aguas de los acuíferos Miocenos y Cuaternarios indican la existencia de dos sistemas de flujo independientes y estratificados debido al contraste de la densidad. En este sentido, la variación espacial de la salinidad y la invariabilidad

temporal de la interfase, sugiere que los flujos salinos presentan una dinámica totalmente disociada a la de las aguas subterráneas dulces.

- El sistema de agua dulce en la cuenca está asociado a las formaciones Jurásicas, Miocenas y Cuaternarias. El acuífero Mioceno presenta buenas propiedades hidráulicas y su recarga probablemente sea mayor a la estimada hasta el presente. El escaso contenido de tritio y la presencia de nitratos en las aguas extraídas en las calizas jurásicas para abastecimiento, sugerirían una sobreexplotación de dicho recurso.
- La datación de las salmueras como las más antiguas entre las aguas muestradas, resulta coherente para identificar a la laguna como punto de descarga del sistema. Asimismo, se identificaron por primera vez flujos profundos de aguas de elevada salinidad y de sentido ascendente en el ámbito de la laguna.
- La gran diferencia hidroquímica e isotópica entre las salmueras de la laguna y los manantiales salinos de la cuenca del Guadalhorce, podrían indicar la inexistencia o un vínculo irrelevante entre ambos sistemas.
- El inventario selectivo de puntos de agua en la cuenca ha permitido proponer dos redes, una de control piezométrico y otra de calidad de las aguas. Los puntos propuestos, conjuntamente a los identificados en los trabajos de campo de este proyecto serán la base sobre la que se definirán las futuras redes de control

Por otro lado, en el marco de este proyecto se desarrollaron las siguientes actividades:

- Se organizó con el apoyo de las autoridades de la Reserva Natural de la Laguna de Fuente de Piedra en Febrero del presente año una Jornada Taller sobre la *"Hidrogeología de los sedimentos tríasicos y su control sobre los sistemas lagunares del norte de la provincia de Málaga"* a la que concurrieron destacados investigadores de las Universidades de Granada, Málaga, Sevilla, Almería y Politécnica de Cataluña; consultores privados y técnicos de la Confederación Hidrográfica del Sur; así como investigadores y técnicos propios.
- Se emprendió una acción comercial financiada por la Consejería de Medioambiente de la Junta de Andalucía a través de la empresa pública EGMASA, bajo la supervisión del IGME, mediante la cual se ejecutó el *"Inventario selectivo de puntos agua y carga de información sistema de Información Geográfica (SIG) en la cuenca de Fuente de Piedra"*. Esta actividad se hallaba planificada en el Proyecto, acorde a la redefinición de su objetivo.

Resulta evidente que la caracterización del medio dista de haberse conseguido, aunque se considera que se avanza en una línea correcta. Debido a ello los trabajos que se contemplan desarrollar y, que de hecho, actualmente se ejecutan se corresponden con las técnicas aplicadas. Listando algunas de estas actividades son:

- Aplicar técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas para continuar la caracterización del sistema.
- La ejecución de sondeos profundos con el fin de obtener información litológica como nuevos puntos para estudio y ensayos.
- Establecer y comenzar a medir en las redes de control piezométrica y de calidad propuestas, con el fin de comenzar a colectar datos para el futuro modelo numérico que considere la variabilidad de la densidad de sistema de flujo.
- Estudiar los distintos componentes de balance hídrico con el fin de actualizar y reducir la incertidumbre en la evaluación de los mismos. Se prestará atención a la nueva cartografía de uso del suelo que elabora en la actualidad la Consejería de Medio Ambiente, se identificará las

nuevas industrias que se asientan en la cuenca, así como el fuerte crecimiento demográfico. Se estudiará con mayor detalle la recarga en las distintas formaciones y ámbitos de la cuenca.

- Se seguirá trabajando en pos de mejorar el Modelo Digital del Terreno en el vaso de la laguna.
- Se procurarán nuevos datos litológicos tanto para mejorar la consistencia de la identificación de la evolución del muro del mioceno, como para abordar la estimación de la geometría de los bloques calizos jurásicos.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Benavente Herrera, J.-, Rodríguez Rodríguez, M., y Almécija Ruiz, C. (2003) Aguas subterráneas salinas en el entorno de la laguna de Fuente de Piedra: Revisión, interrogantes y datos experimentales. En Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: Países Mediterráneos. IGME. Madrid 2003.
- Clark Labs (2002) *Idrisi 32 v 132.22 The Idrisi Project*. Worcester MA, USA
- CEDEX. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (1997). Estudio del acuífero triásico que alimenta el manantial de Meliones, embalse de Guadalhorce (Málaga). Informe Técnico.
- Durán, J.J., G. De Domingo, A., Linares, L., López Geta, J.A. y Martínez Arias, A. (2001). Modelos geológicos en los acuíferos kársticos del norte de la provincia de Málaga: Implicaciones hidrogeológicas. V Simposio sobre el agua en Andalucía. Almeria, septiembre 2001.
- García-Cortés, A., Mansilla, H., y Quintero, I. (1991). Puesta de manifiesto de la Unidad Olistostrómica del Mioceno Medio en el sector oriental de las Cordilleras Béticas. Boletín Geológico y Minero. Vol. 102-4. (524-535)
- IGME (1986) Mapa geológico de España. Escala 1:50.000 nº 1023. Antequera.
- IGME-INYPSA-Junta de Andalucía (2001). Estudio hidrogeológico de probabilidades de mejora de los abastecimientos urbanos del norte de la provincia de Málaga. Tomo XIV Sierra de Mollina.
- IGME-INYPSA-Junta de Andalucía (2001). Estudio hidrogeológico de probabilidades de mejora de los abastecimientos urbanos del norte de la provincia de Málaga. Tomo XIII Sierra de Humilladero.
- Linares, L. (1990) Hidrogeología de la Laguna de Fuente de Piedra (Málaga) Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 343 p.
- Linares Girela, L. Y Rendón Martos, M. (1998) La laguna de Fuente de Piedra (Málaga), un área endorreica de interés ecológico ligada al karst yesífero-salino. En Karst en Andalucía . J.J Durán y J. López Martínez (Eds.) pp. 165-172. IGME, 1998, Madrid.
- Martín Algarra, A. (1991) Informe sobre la geología de la región comprendida entre Bobadilla, Campillos, el embalse del Guadalhorce y la Sierra Chimenea (Málaga). Contrato de investigación nº 207 entre la Universidad de Granada y Dragados y Construcciones S.A. Informe interno.
- Pérez-López, A. y Sanz de Galdeano, C. (1994) Tectónica de los materiales triásicos en el sector central de la zona Subbética (Cordillera Bética). Rev. Soc. Geol. España, 7 (1-2): 141-153
- Pérez-López, A. y Pérez-Valera, F. (2003) El diapirismo como factor principal de la resedimentación de las rocas del Triásico durante el Terciario en las Zonas Externas de la Cordillera Bética. Geotemas 5, 2003.
- Peyre, Y. (1974). Géologie d'Antequera et de sa région. Travaux du Laboratoire de Géologie Méditerranéenne. Institut National Agronomique Paris-Grignon.

- Sánchez Navarro, J.A., Martínez Gil, F.J., de Miguel, J.R. y San Román, J. (1989) Hidrogeoquímica de la zona endorreica de las lagunas de los Monegros, provincias de Zaragoza y Huesca. Boletín Geológico y Minero, 100-5, 160-169.
- Universidad de Alcalá de Henares-Departamento de Geografía (2004) CURSO DE INTRODUCCIÓN A IDRISI 32. Release Two. 241 pp.