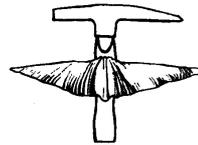


UNIVERSIDAD
DE OVIEDO



FACULTAD DE
GEOLOGÍA

***MODELIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA
DE LOS ACUÍFEROS
CARBONATADOS DE LA MASA DE
AGUA 012.005 EN EL ENTORNO DE LA
CIUDAD DE GIJÓN***

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER OFICIAL EN RECURSOS GEOLÓGICOS Y GEOTECNIA

ANDRÉS GONZÁLEZ QUIRÓS

JULIO 2011

D. Andrés González Quirós, autor del Trabajo Fin de Máster titulado “Modelización hidrogeológica de los acuíferos carbonatados de la masa de agua 012.005 en el entorno de la ciudad de Gijón”, certifica que constituye un trabajo original y solicita su presentación.

En Oviedo, a 11 de julio de 2011

Fdo. Andrés González Quirós

D. Eduardo Menéndez Casares y Dña. Beatriz González Fernández, Doctores en Geología del Departamento de Explotación y Prospección de Minas de la Universidad de Oviedo, certifican que han dirigido y revisado el Trabajo Fin de Máster titulado: “Modelización hidrogeológica de los acuíferos carbonatados de la masa de agua 012.005 en el entorno de la ciudad de Gijón”, realizado por D. Andrés González Quirós, y autorizan su presentación.

En Oviedo, a 11 de julio de 2011

Fdo. Eduardo Menéndez Casares

Fdo. Beatriz González Fernández

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo determinar los parámetros hidrogeológicos de los niveles acuíferos carbonatados del Jurásico Inferior en el entorno de la ciudad de Gijón. Estos niveles acuíferos han sido explotados durante los últimos 40 años por la Empresa Municipal de Aguas mediante sondeos hidrogeológicos realizados sin una adecuada planificación técnica previa lo que ha dado lugar a algunos problemas y ha impedido un aprovechamiento más eficiente de las aguas subterráneas. El presente estudio profundiza en las características de dichos acuíferos mediante la realización de un inventario de puntos de agua, diferentes pruebas in situ (diagráfias de gamma natural y ensayos de bombeo), y un modelo hidrogeológico de simulación de tipo MODFLOW. Se han obtenido unos valores y unas pautas de comportamiento que pueden servir como referencia para un futuro estudio en profundidad, previo al aprovechamiento de las aguas subterráneas de la zona de una manera más eficiente. Los resultados confirman la existencia de dos niveles acuíferos de tipo kárstico dentro de la Fm. Gijón separados por un acuitardo y clasificados como de tipo medio-bueno en función de su permeabilidad.

ABSTRACT

This paper has the objective of determinate the hydrogeological parameters of the carbonate karstic aquifers from the Lower Jurassic near the city of Gijón. These aquifer levels have been exploited for the last 40 years by the City Council Water Enterprise (EMA) without previous technique studies. This lack of studies has made that some problems have been produced and prevented the effective exploitation of the ground waters. This work is focused on the hydrogeological characteristics and has been carried out with the realization of water sources mapping, site tests (gamma-ray logging and pumping tests) and one hydrogeological model using MODFLOW. The values obtained could be a start point for future studies in order to improve the exploitation of groundwater in this area in an efficient way. The results confirm the existence within the Gijon Fm. of two karstic aquifer levels separated by an aquitard, and qualified as medium-good.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Aspectos generales	3
1.2. Antecedentes en el estudio de los acuíferos jurásicos.	3
1.3. Antecedentes en el aprovechamiento de los acuíferos jurásicos.	7
2. OBJETIVOS.....	12
3. METODOLOGÍA.....	13
3.1. Recopilación bibliográfica y de datos aportados por empresas.....	13
3.2. Trabajo de campo	13
3.2.1. <i>Repaso de la cartografía geológica e hidrogeológica</i>	14
3.2.2. <i>Inventario de puntos de agua</i>	14
3.2.3. <i>Testificación geofísica</i>	15
3.2.4. <i>Toma de muestras en manantiales y sondeos</i>	17
3.2.5. <i>Ensayos de bombeo</i>	20
3.3. Trabajo de laboratorio y gabinete.....	21
3.3.1. <i>Integración de datos en un GIS</i>	21
3.3.2. <i>Preparación de muestras para análisis isotópicos</i>	23
3.3.3. <i>Análisis e interpretación de resultados</i>	24
3.4. Modelización hidrogeológica	24
3.4.1. <i>Fundamentos de los cálculos</i>	25
3.4.2. <i>Desarrollo del modelo de simulación</i>	26
4. MARCO GEOGRÁFICO.....	35
4.1. Situación geográfica	35
4.2. Orografía.....	36
4.3. Hidrografía.....	36
4.4. Climatología	37
4.4.1. <i>Aspectos generales</i>	37
4.4.2. <i>Precipitaciones</i>	39
4.4.3. <i>Temperaturas</i>	40
4.4.4. <i>Insolación</i>	42
4.4.5. <i>Vientos</i>	42
4.4.6. <i>Evapotranspiración potencial, evapotranspiración real y lluvia útil.</i>	43

5. MARCO GEOLÓGICO	47
5.1. Estratigrafía	48
5.2. Estructura.....	51
5.3.1. <i>Pliegues</i>	51
5.3.2. <i>Fallas</i>	51
5.3. Geomorfología.....	52
6. MARCO HIDROGEOLÓGICO	53
6.1. Rasgos generales.....	53
6.2. Características de la Masa de Agua 012.005 Villaviciosa.....	54
6.3. El acuífero inferior carbonatado	55
6.3.1. <i>Acuífero inferior de la Fm. Gijón.</i>	56
6.3.2. <i>Acuífero superior de la Fm. Gijón.</i>	67
6.3.3. <i>Acuitardo</i>	76
6.4. Características hidrogeoquímicas	76
7. MODELO HIDROGEOLÓGICO	78
7.1. Diseño	78
7.2. Simulación de bombeo	80
7.3. Valoración del modelo hidrogeológico	80
8. CONCLUSIONES.....	82
9. RECOMENDACIONES	84
AGRADECIMIENTOS.....	86
BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXOS	

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Aspectos generales

Desde época romana, la importancia de los recursos hídricos subterráneos ha sido indiscutible en el abastecimiento a las poblaciones del municipio de Gijón, bien a través de fuentes o manantiales, o, en época más reciente, por medio de captaciones de aguas subterráneas por sondeos.

Estos últimos fueron realizados en los años 60-70 sin una adecuada planificación científico-técnica, y, pese a que han proporcionado importantes caudales, representando más del 20% total del abastecimiento de la ciudad a mediados de la década de 1990, no han estado exentos de problemas de naturaleza hidrogeoquímica (altos contenidos en sulfatos, mezcla de aguas de distintas calidades, etc) e hidrogeológica (abatimiento de niveles freáticos, secado de cauces o manantiales, etc.), que evidencian la necesidad de una adecuada campaña hidrogeológica previa.

De entre los acuíferos existentes en el subsuelo del municipio gijonés, el de naturaleza carbonatada de la Formación Gijón (Triásico Superior-Jurásico Inferior), de tipo fisural y kárstico, perteneciente a la unidad hidrogeológica 1.19 (más recientemente denominada Masa de Agua 012.005 Villaviciosa) ha sido uno de los más explotados y estudiados dentro de la cuenca jurásica asturiana.

1.2. Antecedentes en el estudio de las aguas subterráneas de los acuíferos jurásicos.

Las primeras menciones sobre las aguas subterráneas del subsuelo de Gijón se deben a Guillermo Schulz (1858), quien aborda la temática hidrogeológica, detallando la existencia de dos fuentes sobre materiales del “*Lias*”, como son los manantiales de Tremañes, y la Peña de Francia, junto a Deva.

En los años 1866-67, los catedráticos del Instituto Jovellanos, Emilio Cuesta y Francisco Javier Junquera y Plá, realizan una serie de análisis sobre la calidad de las aguas más utilizadas por la población, que aparecen publicados en los periódicos “El Faro Asturiano” (26 y 28 de septiembre y 5 de octubre de 1866) y “El restaurador Farmacéutico” (6 y 13 de enero de 1867). Este estudio evolucionó desde una primera fase (recogida de muestras en junio de 1866) en la que se controlaron 8 fuentes y 2

pozos de abastecimiento, hasta una segunda etapa (agosto de 1867) donde la investigación se amplió hasta completar 47 manantiales (Gutierrez Claverol *et al.*, 2002).

A principios de la década de 1960, y ante una perspectiva de impulso económico y aumento de la población que podría dar lugar a grandes problemas de abastecimiento de agua, el entonces presidente de la Diputación Provincial de Oviedo, José Manuel López Muñiz, fomenta e impulsa la búsqueda de una solución al problema, para lo cual encarga, en 1961, una estimación previa al Dr. Fricke del “Instituto Federal de Alemania para Investigaciones del Subsuelo” (*Bundesanstalt für Bodenforschung*). En base a este estudio, se constituye un consorcio en el que participan los principales ayuntamientos de la zona central de Asturias, entre ellos el de Gijón, y que a mediados de 1962 firma un acuerdo para encargar un estudio sobre “Hidroeconomía e Hidrogeología” de la región a la “Oficina de Ingenieros de Hidroeconomía” (*German Water Engineering*) de Essen (Alemania). Este estudio, circunscrito a los acuíferos mesozoicos, estima un caudal medio utilizable del orden de 740 l/s.

A lo largo de las décadas de los 60 y 70 se realizan una serie de sondeos directos prospectivos, que aún careciendo de una adecuada planificación científico-técnica, que evitase fenómenos de sobreexplotación o contaminación futuros, proporcionan una gran cantidad de datos de interés para el estudio de la zona.

Rodríguez González realiza en 1977 un estudio hidrogeológico de los alrededores de Gijón para la Empresa Municipal de Aguas (EMA), en el que diferencia por primera vez dos sistemas acuíferos: Cabueñes-Deva (describiendo 46 sondeos, 25 fuentes y 42 pozos) y Llantones.

El “Instituto Geológico y Minero de España” (IGME) efectuó un meritorio estudio de las cuencas hídricas asturianas en colaboración con la “Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A.” (ENDAMISA). La revisión detallada del denominado Sistema Acuífero nº1, al que pertenece la cuenca gijonesa, comenzó en mayo de 1979, dentro del marco global del “Plan de Investigación de Aguas Subterráneas” (PIAS).

Este estudio abordó en una primera fase (etapa 1979-1980) la definición de los sistemas hídricos mediante una campaña de cartografía hidrogeológica y el inventario de los puntos de agua; en una segunda época (1981) se reconocieron los mismo en base

a la ejecución de algunos sondeos, ensayos de bombeo, controles piezométricos, análisis hidroquímicos y aforos.

El resumen de toda esta labor prospectiva fue presentado por Martínez Fresneda (1980) en las Jornadas Minero-Metalúrgicas celebradas en Huelva, como anticipo de un posterior informe técnico del IGME, que abordó los principales rasgos del entorno gijonés, incluyendo sus recursos y reservas. El estudio realizado por el IGME comprende dos monografías (1982 y 1984) (Figura 1), en las que se hace una completa revisión y actualización de diferentes aspectos de las aguas subterráneas, tanto desde el punto de vista científico y técnico, como de su calidad.

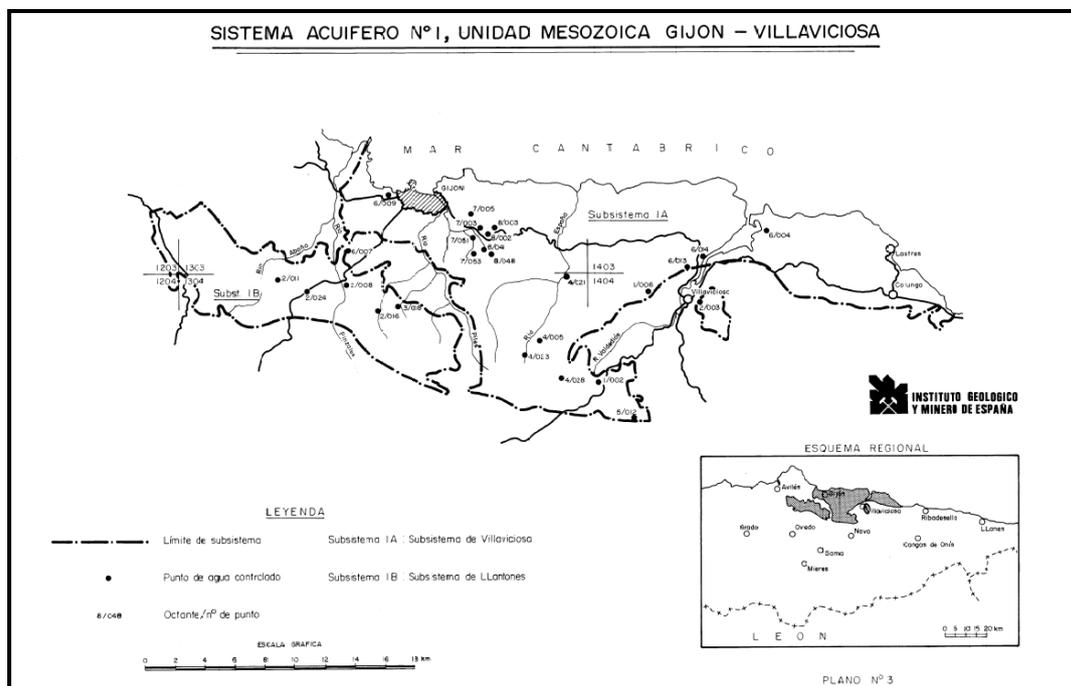


Fig.1.- Extensión de la unidad mesozoica Gijón-Villaviciosa y delimitación de los subsistemas de Villaviciosa y Llantones (IGME, 1984)

El IGME prosiguió su trabajo en los años siguientes dentro del “Plan Hidrogeológico Nacional” y, muy específicamente, en el Plan de Gestión, Conservación y Planificación de los Acuíferos” (PGCA), prestando singular atención al control de eventuales contaminaciones en profundidad (IGME, 1986, 1990, 1993 y 1996). Con este fin se implantó una red de estaciones de observación (sondeos y manantiales) donde se recogen y analizan periódicamente muestras de aguas.

En 1993, la empresa IDRENA realiza un informe en el que recoge los resultados de diferentes ensayos realizados en los sondeos hidrogeológicos de la Empresa de Aguas

en las cercanías de la Fuente Deva. En el mismo se señala que el bombeo no afecta prácticamente al manantial, y que “*ello parece indicar que ... no existe conexión hidrodinámica entre el sistema kárstico que se descarga por la fuente Deva y el tramo acuífero captado por los sondeos de la EMA*”. (IDRENA 1993)

En el año 2002, Gutierrez Claverol, Torres Alonso y Luque Cabal, en su obra el Subsuelo de Gijón, hacen un compendio de los estudios anteriores, en el que, además, recogen nuevos datos procedentes de investigaciones más recientes, especialmente geotécnicas, llevadas a cabo en el municipio.

A principios del siglo XXI, tiene lugar la construcción del túnel ferroviario suburbano (Metrotrén), cuyo estudio realizado por la empresa INECO, aún siendo restringido a las primeras decenas de metros, proporciona numerosos datos geológicos a través de más de 30 sondeos mecánicos y numerosos ensayos.

En 2004, Menéndez Casares *et al.* realizan un estudio de los acuíferos jurásicos de Asturias, diferenciando dos acuíferos de naturaleza carbonatada en la Formación Gijón. Así mismo, se procede a su caracterización hidrogeoquímica, dando una explicación a la problemática de los puntos con exceso en la concentración de sulfuros. Sobre este tema se pronuncian también Ortuño *et al.* (2004), que presentan una relación entre las características litológicas e hidrogeoquímicas de todo el Principado de Asturias dentro de la Red de Calidad.

Con la entrada en vigor de la Directiva Marco del Agua aprobada en el año 2000 (Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de acción en el ámbito de la política de agua) y la introducción del concepto de Masa de Agua, el acuífero jurásico es objeto de nuevos estudios que amplían el conocimiento sobre el mismo.

Del mismo modo la Empresa Municipal de Aguas del Ayuntamiento de Gijón realiza análisis químicos periódicos de la calidad de las aguas de diferentes manantiales y sondeos del concejo.

1.3. Antecedentes en el aprovechamiento de los recursos hidrogeológicos del subsuelo de Gijón.

El aprovechamiento de los recursos hidrogeológicos del subsuelo de Gijón ha ido ligado, irremediabilmente, al desarrollo urbano de la villa.

Las primeras fuentes de abastecimiento de las que se tiene constancia las constituyen los manantiales del entorno de los asentamientos romanos de la Campa Torres, donde recientes excavaciones arqueológicas han puesto de manifiesto la utilización de estas aguas, e incluso, la realización de pequeñas obras de ingeniería hidrológica como aljibes o conducciones.

De entre las fuentes de Gijón, se tiene como la más antigua la fuente de La Fontica, que ya a mediados del siglo 1 d. de C. abastecía las cercanas termas de Campo Valdés. Esta fuente, junto a otros manantiales resultaron suficientes para el abastecimiento urbano de la ciudad durante más de mil quinientos años.

A mediados del siglo XVII el desarrollo urbano evidencia la necesidad de aumentar los recursos hídricos. Es en esta época cuando se realiza la toma de agua conocida como La Matriz (o La Guía), que enlazaba el casco urbano con un pozo abierto a 3 km en las cercanías de Las Mestas, y vertía en las fuentes de La Barquera y San Lorenzo.

Hasta finales del siglo XIX Gijón se abastecerá de estas fuentes y otros manantiales situados en los bordes de la población como la Fontica, la Benedita, la Fuente Vieja o la Vizcaína, así como de numerosos pozos abiertos en el casco urbano (Fig. 2).

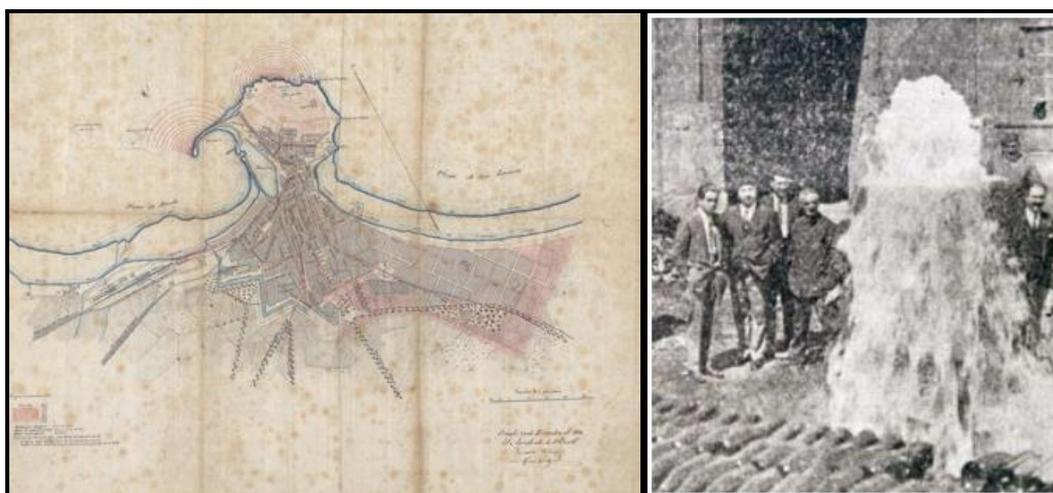


Fig. 2.- Izda) Mapa del abastecimiento de aguas del año 1874. **Dcha)** Pozo artesiano realizado en la Fábrica de Vidrios en 1926 (Fuente: Empresa Municipal de Aguas / Ayuntamiento de Gijón)

Desde mediados del siglo XIX, aún habiéndose realizado importantes mejoras en la red de distribución, la carencia de agua potable sigue constituyendo uno de los mayores problemas de la ciudad, siendo un tema de elevado interés y polémica. En 1890 se inaugura la conducción desde el manantial Llantonos a la fuente de Begoña, que proporcionaba un suministro de 86400 litros por hora (Rato y Rocas, 1895).

En 1925 el ingeniero Fernando Casariego propuso al Ayuntamiento el aprovechamiento de la Fuentona de Los Arrudos, ubicada en el municipio de Caso, a unos 50 km de Gijón.

Esta idea es completada por el ingeniero municipal Guillermo Cuesta, quien propone vincular a dicha traída el agua proveniente de otros dos manantiales situados en el concejo de Nava.

El proyecto es aprobado en 1927, y, a pesar de que las primeras aguas de la traída llegan a Gijón en diciembre de 1930, diferentes crisis económicas y la Guerra Civil paralizan la obra en diferentes periodos, de manera que no es hasta 1950 cuando se dan por concluidos los trabajos.

En la década de 1950 y primera mitad de 1960, las dificultades para el mantenimiento de la red, así como para la resolución de los problemas técnicos y administrativos sobrepasan al Servicio Municipal de Aguas. Por aquella época más del 60% del agua captada se perdía por simples fugas y eran habituales contar con más de nueve horas de restricciones.

En 1963 se contrata la asistencia técnica de una empresa alemana, German Water Engineering, que entre sus conclusiones incluye la creación de una empresa municipal especializada en el abastecimiento de agua potable.

En el año 1965 es constituida la Empresa Municipal de Aguas de Gijón (EMA), que nace con el propósito de resolver el problema de suministro de agua y mejorar la red general de distribución. A pesar de que en pocos años fue posible mejorar el rendimiento en el abastecimiento, las restricciones siguen sucediéndose, por lo que se plantea una mejora basada en tres puntos: perfeccionamiento de las conducciones de los antiguos manantiales y puesta en marcha de la captación del Güeyu de Deva (años 60), inicio de la captación de aguas subterráneas y, finalmente, con la constitución del “Consortio para el Abastecimiento de Agua y Saneamiento de Asturias” (CADASA).

En la actualidad las necesidades del concejo son cubiertas por unos 26-28 millones de metros cúbicos de agua anuales, de las que, en porcentajes aproximados, el 56% proviene del alto Nalón y es suministrado por CADASA, un 29% es aportado por la traída de aguas de Perancho-Los Arrudos, un 5% llega de la toma de Llantonos y el 10% restante se toma de los acuíferos jurásicos de la zona oriental del municipio, mediante sondeos o manantiales (Fig. 3).

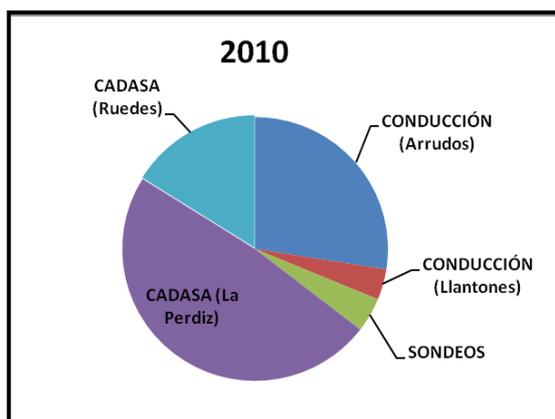


Fig. 3.- Porcentaje representado del origen de agua de consumo en Gijón en el año 2010 sobre un total de 26 hm³ (Fuente: EMA)

El consumo de esta agua corresponde en algo más del 50% al abastecimiento doméstico (aunque sólo un 2% es ingerido directamente por la población), un 25% se destina a usos industriales y comerciales, un 11% corresponde a pérdidas en la red (la media en España es de 19% y en Asturias del 17,9%) y el resto es destinado a servicios municipales como riego de jardines o limpieza de calles.

Los sondeos hidrogeológicos de la EMA.

La captación de las aguas subterráneas por medio de sondeos de los acuíferos jurásicos del entorno de la ciudad, en los que se centra el presente trabajo, representaron una de las soluciones adoptadas por la EMA para resolver el problema de abastecimiento en la década de los 60 y 70. Se realizaron así un total de 17 sondeos (Tabla 1) (mapa en anexos) entre 1965 y 1980, que se ponen en explotación entre 1966 y 1982, y que, si bien fueron realizados sin una adecuada planificación técnica ni atendiendo a criterios hidrogeológicos, han proporcionado importantes caudales y una contribución destacable al suministro de aguas, llegando en el año 1995 a representar el 20% del total utilizado, con un aporte de más de 5 hm³ en dicho año.

Sondeo	Nombre	Prof. (m)	Fecha inicio explotación	Caudal bomba (l/s)	Coordenadas (UTM)		Cota (m.s.n.m.)
					X	Y	
S-1	U. Laboral	Desc	Anterior 1965	Abandonado	288717	4822042	25
S-1 Bis	Las Mestas	40	1967	Abandonado	286900	4823141	7
S-2	Residencia	100	1966	Abandonado	289442	4822231	43
S-3	Molinín	80	1969	30	289267	4821965	34
S-4	Pecuaría	74	1970	50	288360	4822729	18
S-5	Suncia	127	1973	50	288822	4822866	24
S-6	Infanzón bajo	80	1974	Reco./Aband	289745	4821499	43
S-7	Infanzón Alto	110	Enero 1975	50	289818	4821504	45
S-8	Deva	92	Feb. 1976	Abandonado	289437	4821193	36
S-9	Isabel II	175	Sept. 1975	38	290315	4821965	65
S-10	Rinconín	100	Junio 1977	55	289444	4820616	44
S-10 Bis	Rinconín-Bis	122	Mayo 1979	Reconoc.	289104	4820564	53
S-11	Güeyu	100	Junio 1978	55	289625	4820369	47
S-12	Cefontes	106	Junio 1979	50	288817	4821233	40
S-13	La Ería	192	Mayo 1980	20	288893	4820222	68
LL	Llantones	Desc	-	Abandonado	282458	4816292	111
S-14	Ñales	163	Dic. 1982	40	290049	4821134	67
S-15	Olla	208	Julio 1977	Reco/Aban	Desc.	Desc.	Desc.

Tabla 1.- Sondeos hidrogeológicos de la Empresa Municipal de Aguas.

En los últimos años, y con el creciente peso en el total otorgado a CADASA (superior al 60%), esta forma de abastecimiento se ha ido relegando de manera progresiva, con el abandono de algunos de los sondeos, y con una explotación poco continuada, lo que ha hecho que el aporte al total del suministro por parte de las aguas subterráneas haya descendido hasta menos de 1,5 hm³ anuales en los años 2008, 2009 y 2010, constituyendo una fracción casi anecdótica del 5% en el total (Figs. 4 y 5).

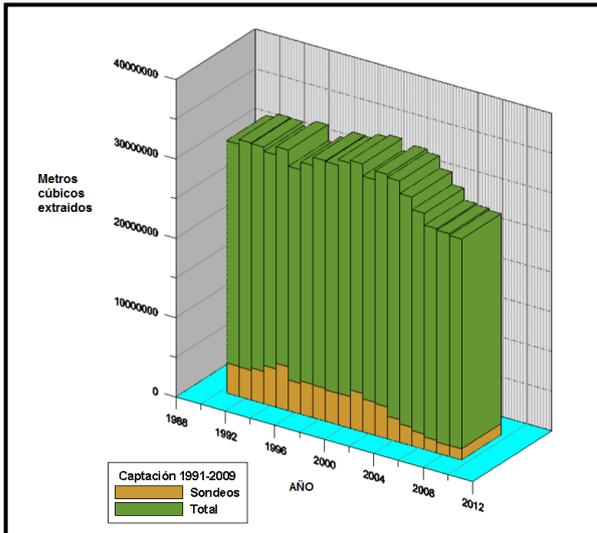


Fig. 4.- Captación de la Empresa Municipal de Aguas en el periodo 1991-2009 y porcentaje sobre el total representado por las extracciones mediante sondeos.

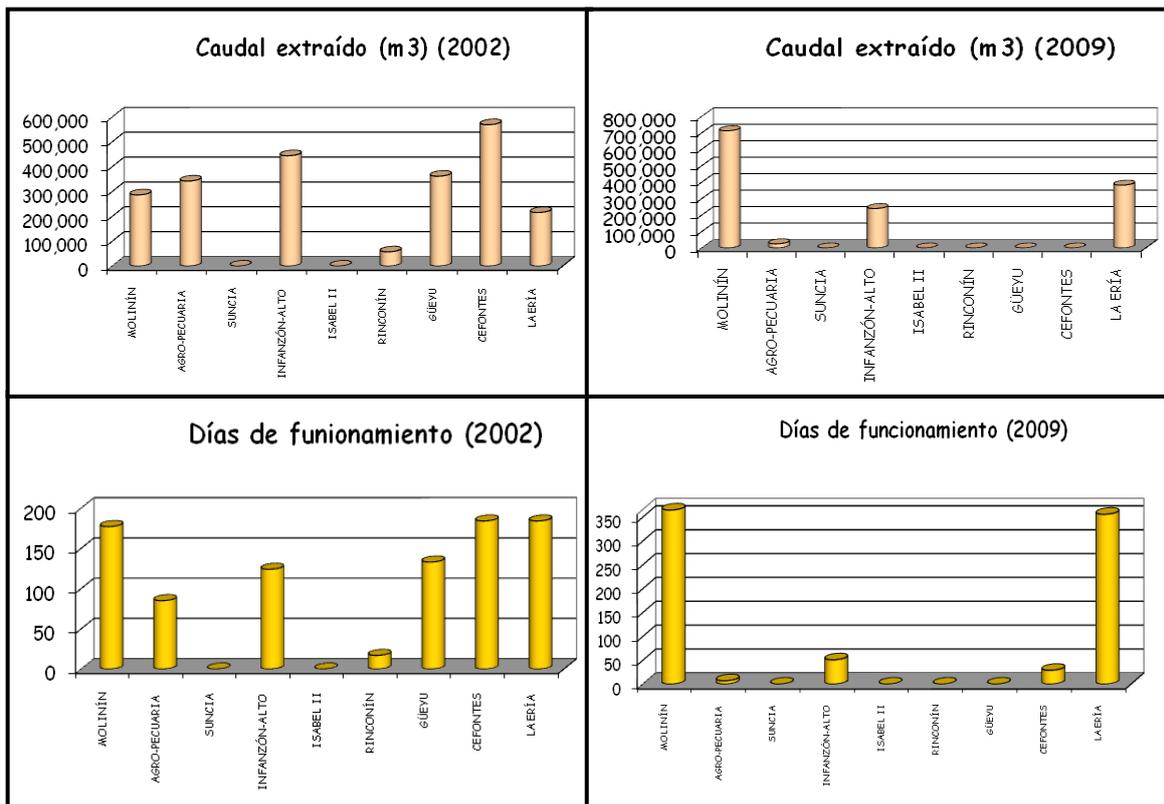


Fig.5.- Gráficas comparativas de: **Arriba**) Caudal extraído en 2002 (izda.) y 2009 (dcha); y **abajo**) Días de funcionamiento en 2002 (izda.) y 2009 (dcha) de los diferentes pozos de la EMA.

2. OBJETIVOS

El presente trabajo tiene tres objetivos fundamentales que son:

1. Determinar los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos que forman parte del denominado acuífero inferior de la Masa de Agua 012.005 Villaviciosa (definida por el Ministerio de Medio Ambiente en el año 2005 para adaptarse a la Directiva Marco del Agua)
2. Establecer el modelo conceptual de funcionamiento de estos acuíferos.
3. Elaborar un modelo hidrogeológico de los mismos.

La Masa de Agua 012.005, que abarca una superficie de casi 300 km², se extiende desde el valle del río Aboño, en su zona más occidental, hasta la ría de Villaviciosa, que constituye su límite oriental, y hacia el sur, hasta las cercanías de Sariego y el Alto la Campa.

Para su estudio y caracterización ha sido realizada una extensa campaña de campo, con una revisión de la cartografía geológica e hidrogeológica, un inventario de puntos de agua con recogida de muestras, y diferentes ensayos de caracterización *in situ* como diagráfias gamma natural y ensayos de bombeo.

Posteriormente los datos han sido procesados en el laboratorio con el fin de obtener unos parámetros que permitan caracterizar el sistema acuífero en sus diferentes miembros, así como conocer su funcionamiento bajo determinados factores, para lo cual se ha utilizado un programa de modelización hidrogeológica basado en el código MODFLOW desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos.

El objetivo final es presentar unas recomendaciones basadas en estos resultados que permitan predecir el comportamiento futuro del sistema acuífero, así como explicar las causas de errores pasados durante su explotación.

3. METODOLOGÍA

3.1.- Recopilación bibliográfica y de datos aportados por empresas

El paso previo al trabajo de campo es la recopilación bibliográfica de datos precedentes en la zona de estudio. La fuente principal de información es la Empresa Municipal de Aguas, que facilitó abundante bibliografía histórica, datos recopilados desde los años 60 y resultados de análisis químicos.

El Instituto Geológico y Minero proporcionó bibliografía, fichas de puntos de agua (sondeos y manantiales), resultados de análisis y abundantes artículos y estudios, algunos de ellos inéditos. Así mismo permitió el acceso a datos de testificación geofísica que el Institut de Ciènces de la Terra Jaume Almera (CSIC) realizó en la zona de Cabueñes.

La Confederación Hidrográfica del Cantábrico cedió datos de ensayos de bombeo, análisis químicos y características hidrológicas de la zona de estudio.

Se han consultado así mismo, abundante información referente a artículos geológicos de la zona, la mayoría de los cuales han sido realizados por el profesorado de la Universidad de Oviedo. Otros artículos se han podido consultar gracias a la base de datos con que la Universidad de Oviedo cuenta en su portal web.

Destacar como libro de referencia el publicado en 2002 por Gutiérrez Claverol, Torres Alonso y Luque Cabal, de título “El subsuelo de Gijón: Aspectos geológicos” del que se han extraído numerosos datos.

Los datos meteorológicos y climatológicos se han obtenido de las bases de datos de la Agencia Estatal de Meteorología, MeteoAsturias y MeteoGijón.

3.2.- Trabajo de campo

El trabajo de campo ha comprendido una parte importante en la realización del presente estudio. En total, se han contabilizado 40 días de campo, de los cuales 4 corresponden a salidas con el objetivo del repaso de la cartografía geológica e hidrogeológica, unos 22 días a la realización del inventario de puntos de agua y la toma de muestras, 2 días al seguimiento y planificación de las pruebas de diagráffas, y 12 días a la realización y seguimiento de los ensayos de bombeo y medidas de niveles piezométricos.

3.2.1.- Repaso de la cartografía geológica e hidrogeológica.

Tomando como referente el mapa geológico del Jurásico de Asturias (Menéndez-Casares y González-Fernández, 2010) se han realizado diversas salidas de campo, con el fin de redefinir algunos contactos geológicos, así como añadir nuevos datos.

Los datos hidrogeológicos (manantiales, sondeos hidrogeológicos, niveles piezométricos, etc.), recopilados en las salidas de campo han sido agregados a la cartografía, lo que sirve como base en la caracterización hidrogeológica de la zona.

3.2.2.- Inventario de puntos de agua.

Se han visitado en la zona de estudio unos 130 puntos de agua (Fig. 6), de los cuales 15 corresponden a los sondeos de la Empresa Municipal de Aguas y el resto a manantiales repartidos por todo el municipio de Gijón. En estos últimos se ha realizado una primera toma de datos in situ, con medidas de caudal; conductividad, pH y temperatura, utilizando para ello un sistema portátil de medición de la marca comercial *HACH* (HQ30d Portable Multi-Parameter Meter); diversas fotografías y un esquema de situación para su posterior digitalización en GIS.

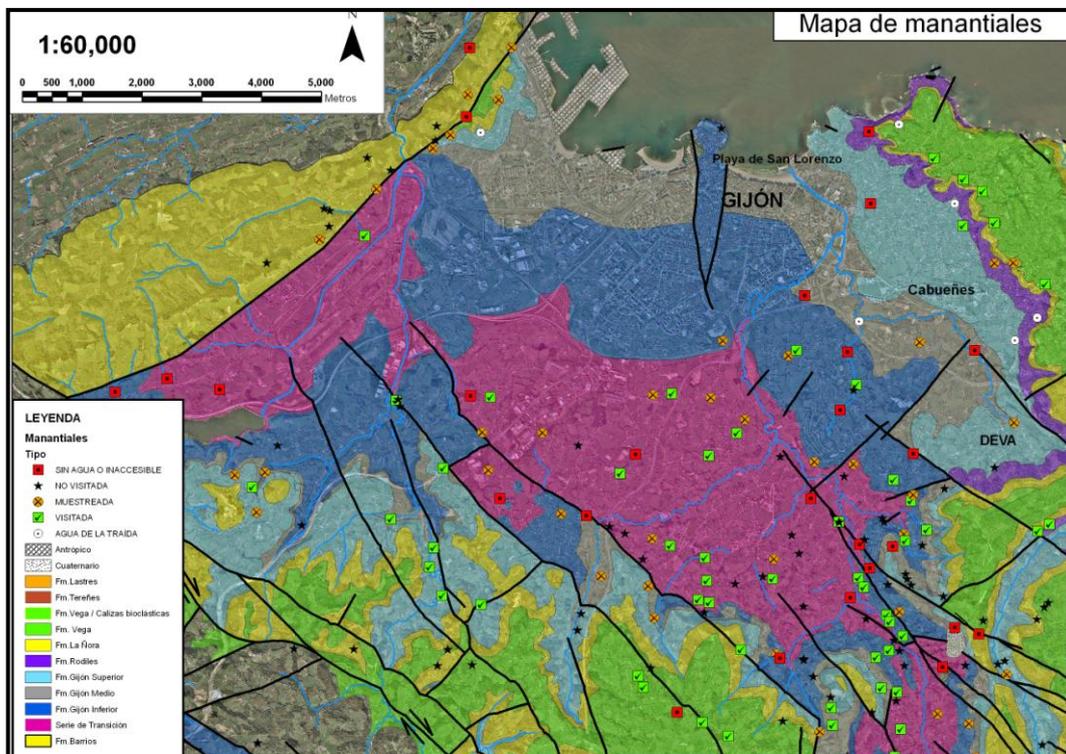


Fig. 6.- Mapa de situación de manantiales en la zona de estudio.

3.2.3.- Testificación geofísica.

Los sondeos utilizados para el abastecimiento urbano fueron realizados entre los años 60 y 70, sin una adecuada planificación hidrogeológica ni testificaciones geológicas, por lo que en la actualidad son muy escasos los datos, tanto de los materiales atravesados, como de la disposición de las paredes de entubación (tramos con rejilla y tramos ciegos).

Se propuso por ello la realización de diagráfias para la testificación gamma natural de cuatro sondeos. Este tipo de ensayos se pueden realizar en sondeos entubados, por lo que de entre los sondeos existentes, se escogieron cuatro (S-8 Deva, S-10-bis Rinconín-bis, S-14 Ñales y S-5 Suncia) repartidos homogéneamente (con el objetivo de obtener una visión más amplia del subsuelo). Así mismo, la elección se restringe a que se encuentren desprovistos de bomba u otros tubos, lo que permite el paso de la sonda, facilita la maniobrabilidad y evita enganches o pérdidas.



Fig. 7.- Izda.) Sonda descendiendo por el interior del sondeo S-5 Suncia. Dcha.) Disposición del trípode y la sonda lista para su descenso en el exterior del sondeo S-10 Rinconín-Bis.

La sonda “Gamma natural” mide la radiactividad natural de las formaciones geológicas. Esta radiación es energía electromagnética emitida espontáneamente por los elementos radiactivos que contiene el terreno y es originada como parte del proceso de desintegración nuclear.

Dado que cada isótopo radioactivo presenta unos niveles de emisión característicos, es posible establecer una relación entre la energía emitida por una formación y la concentración en peso del material radioactivo que contiene. Los principales elementos radioactivos son Uranio, Torio y Potasio. En materiales sedimentarios el isótopo predominante es el ^{40}K que forma parte de la estructura de micas, illitas, y otros minerales arcillosos.

En las rocas sedimentarias, como es el caso, estos isótopos se localizan principalmente en las arcillas, mientras que las arenas limpias, las calizas y las dolomías poseen una emisión limitada de rayos gamma. La presencia de yesos implica una muy baja actividad (Fig. 8).

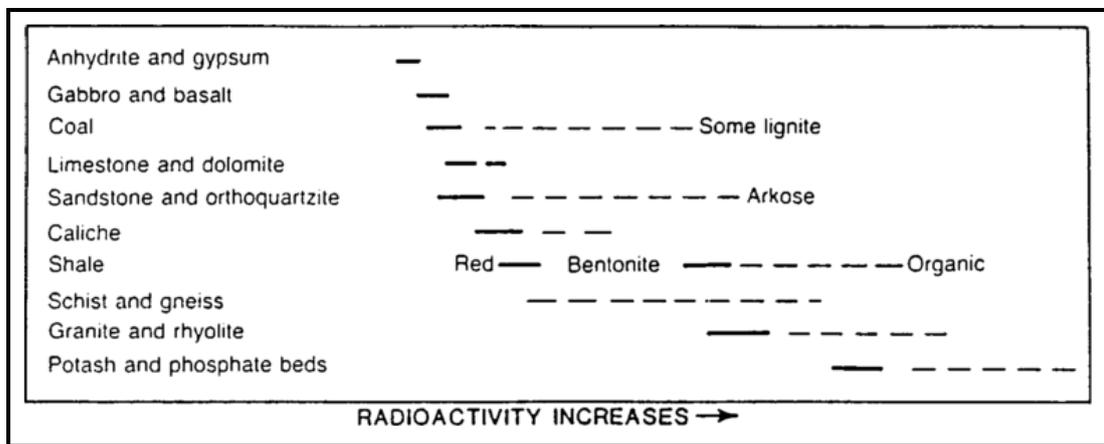


Fig. 8.- Incremento de radioactividad gamma. Anhidrita y yeso (gypsum) poseen los valores más bajos. Calizas (limestone) y dolomías (dolomite) tienen valores bajos, mientras pizarras y materiales arcillosos ofrecen valores altos de radioactividad. (Extraído de ASTM, 1998)

Descripción del equipo

La sonda está constituida por un cilindro metálico en el que se aloja un detector (cristal de INa), que convierte las radiaciones en impulsos eléctricos, y un contador de centelleo, que contabiliza estos impulsos por unidad de tiempo. La medida se puede realizar en c.p.s (cuentas por segundo) o en unidades API.

La sonda se introduce por el pozo a una velocidad constante con la ayuda de un cable (que soporta la sonda y envía la señal a la unida receptora) y un cabestrante con motor que regula la velocidad de ascenso y descenso. Un trípode colocado sobre el emboquille del sondeo (Fig. 7) hace la misión de soporte. La velocidad de ascenso y descenso debe

ser acorde tanto a las características geológicas del medio como a las del sondeo, pero suele oscilar entre 1 y 6 m/min.

El equipo registrador situado en el exterior (por lo general un ordenador personal con el software adecuado), incluye los elementos de control y comunicación de la sonda, el registro de datos para su posterior tratamiento y su impresión en tiempo real.

Resultados

Los resultados (fig. 9) se obtienen en curvas donde se muestra el valor en c.p.s con respecto a la profundidad. Para su correlación se utilizó el registro del sondeo que el Instituto geológico y Minero realizó en las proximidades del sondeo S-14 Ñales, y que corta las formaciones Rodiles y Gijón en sus miembros superior y medio.

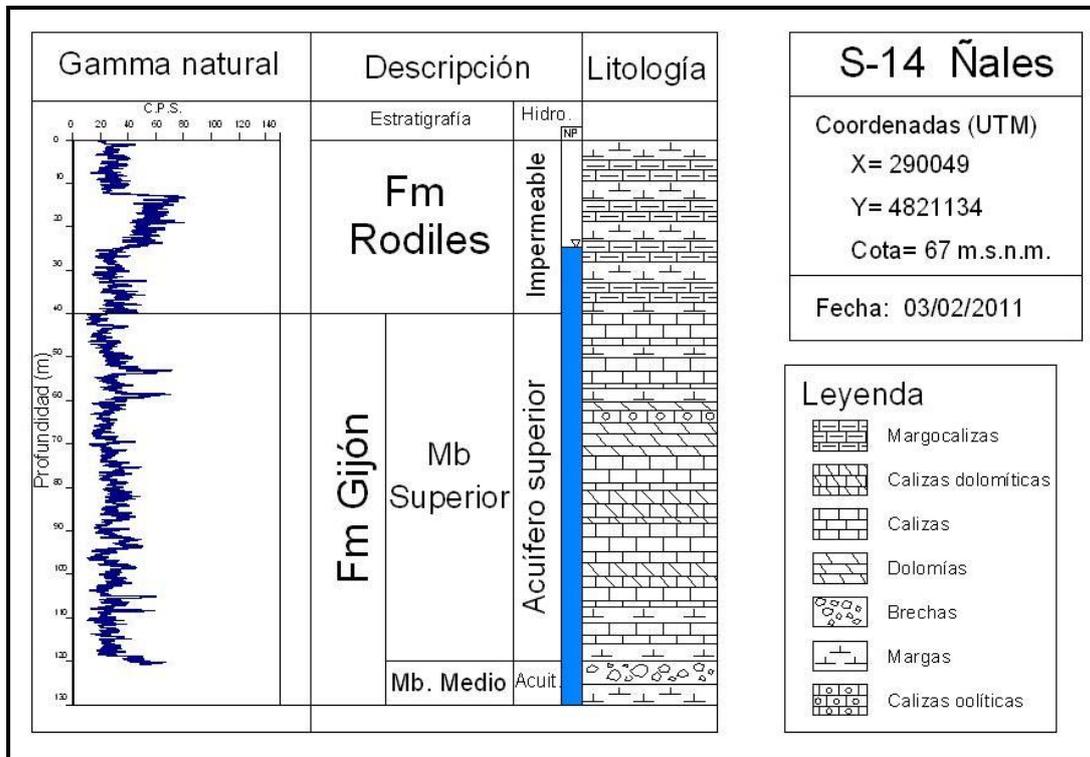


Fig. 9.- Registro de Gamma natural en el sondeo S-14 Ñales.

3.2.4.- Toma de muestras en manantiales y sondeos

.Se han seleccionado 42 de los manantiales inventariados para su muestreo (Fig. 10), tratando de obtener la mayor representatividad posible, tanto por su distribución

espacial, como por su situación geológica, con el fin de lograr una correlación entre la hidroquímica y las características de los diferentes miembros acuíferos.

El objetivo es realizar diferentes análisis de cationes, aniones, presencia de metales pesados y análisis isotópicos de oxígeno, deuterio y azufre. De ellos a continuación se explican los referidos a los análisis isotópicos de ^{18}O y D, siendo el resto objeto de análisis y estudio del trabajo de Pablo Cruz Hernández: “*Caracterización hidrogeológica e hidroquímica de las aguas subterráneas de Gijón. Impacto de las actividades industriales en su calidad*”.

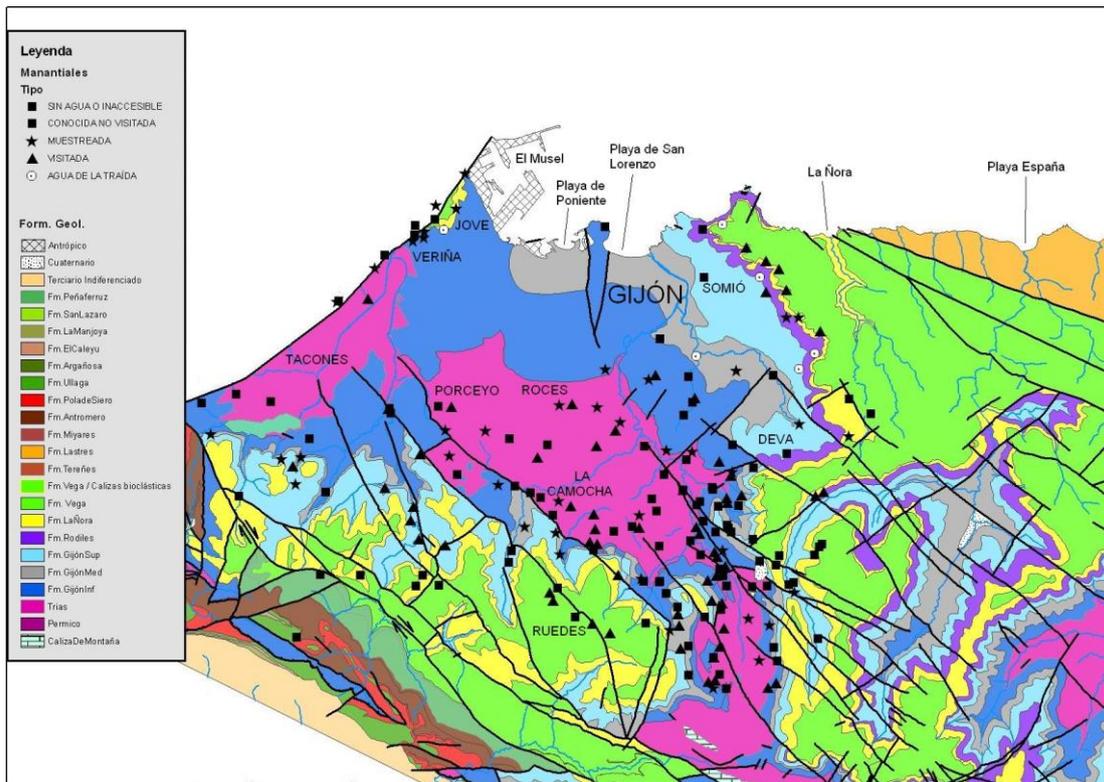


Fig. 10.- Mapa geológico de la zona con la situación de los principales manantiales.

Análisis isotópicos de ^{18}O y D

Dentro de las aplicaciones de las técnicas isotópicas en hidrología, uno de los principales campos de aplicación se refiere al origen y la mezcla del agua subterránea y los constituyentes naturales y antrópicos disueltos.

La información se obtiene de la abundancia de los isótopos estables, que se miden de forma rápida y barata, y se pueden utilizar de forma razonable con trazadores conservativos (Gat y Gonfiantini, 1981).

Principios físicos

Los isótopos más abundantes del oxígeno, ^{16}O (99,76%) y ^{18}O (0,2%), y los del hidrógeno, ^1H (99,985%) y ^2H (o deuterio, D) (0,015%), crean al combinarse moléculas de agua con diferentes masas moleculares, entre 18 y 22. De todas ellas las más abundantes son $^1\text{H}_2\ ^{16}\text{O}$, $^1\text{H}\ ^2\text{H}\ ^{16}\text{O}$ y $^1\text{H}_2\ ^{18}\text{O}$, que pueden ser usados como trazadores conservativos al formar parte de las moléculas de agua.

Las relaciones atómicas naturales son:

$$^2\text{H} / ^1\text{H} = ^2\text{R} = 1,5 \cdot 10^{-4}$$

$$^{18}\text{O} / ^{16}\text{O} = ^2\text{R} = 2 \cdot 10^{-3}$$

Estas relaciones se expresan en función de los valores de delta ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$):

$$\delta = (\text{R muestra} / \text{R estándar}) - 1$$

El agua oceánica, con valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de ± 0 se ha elegido como estándar V-SMOW (Standard Mean Ocean Water). Las aguas más dulces tienen valores negativos.

Efecto de la altitud

El efecto de la altitud permite conocer la altitud de recarga de los manantiales teniendo en cuenta el gradiente orográfico de $\delta^{18}\text{O}$.

Al decrecer la temperatura cuando aumenta la altitud, los valores de delta correspondientes disminuyen. Trabajos anteriores (Gat y Gonfiantini, *op. cit.*) han observado gradientes de $\delta^{18}\text{O}$ desde -0,15‰ hasta -0,40‰, mientras que los gradientes de $\delta^2\text{H}$ pueden ser 8 veces mayores.

Muestreo y análisis

Las muestras de agua para los ensayos isotópicos de deuterio-oxígeno se recogieron en botes de 60 ml, convenientemente cerrados y etiquetados, y se almacenaron refrigeradas para evitar fraccionamiento isotópico por evaporación.

Para su análisis fueron enviadas al laboratorio del Servicio Interdepartamental de investigación de la Universidad Autónoma de Madrid.

A fecha de entrega del presente trabajo los resultados no se encontraban disponibles por lo que serán objeto de una publicación posterior.

3.2.5.- *Ensayos de bombeo.*

Para la obtención de los parámetros hidrogeológicos se realizaron dos ensayos de bombeo aprovechando los pozos existentes pertenecientes a la Empresa Municipal de Aguas.

Así, para el acuífero inferior, se seleccionó como pozo de bombeo el sondeo hidrogeológico N°13 (Sondeo La Ería) que cuenta con bomba en buen estado y actualmente en funcionamiento. Como piezómetro fijo de medida continua se utilizó el sondeo N°10-bis (Rinconín-bis), situado 400 m al NNE del primero. Así mismo se realizaron medidas puntuales de los sondeos S-12 (Cefontes) y S-10 (Rinconín), situados a 1015 y 685 m respectivamente del pozo de bombeo, con el fin de conocer el radio de influencia del bombeo.

En el acuífero superior el pozo de bombeo correspondió al sondeo S-3 Molinín, mientras que como piezómetros se utilizaron los sondeos S-4 Pecuaría (situado a 1056 m) y S-5 Suncia (situado a 810 m).

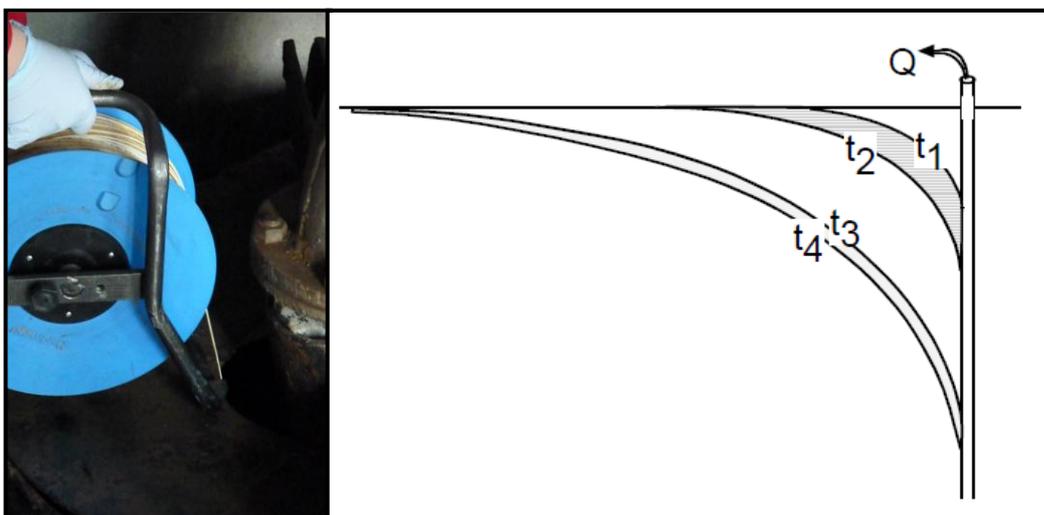


Fig. 11.- a) (izda) Medida con hidronivel y b) (dcha) descensos en función del tiempo (entre t1-t2 hay el mismo tiempo que entre t3-t4) (Extraída de Sánchez, 2004))

Las medidas de los niveles piezométricos se realizó mediante registros puntuales con hidroniveles (Fig. 11a), excepto en el sondeo S-5 Pecuaría, donde la EMA tiene instalado un equipo de medida continua.

Las mediciones se hacen siguiendo un patrón de tiempo creciente entre ellas, ya que, como el caudal extraído no varía y el radio es cada vez mayor, el descenso es más pequeño en cada incremento de tiempo (Fig. 11b).

3.3.- Trabajo de laboratorio y gabinete

3.3.1. Integración datos en un GIS

Los datos recopilados, tanto en el campo como procedentes de la bibliografía, son introducidos en un Sistema de Información Geográfica (SIG) -en inglés *Geographic Information System* (GIS)-, lo que facilita su manejo y visualización.

Los Sistemas de Información Geográfica permiten gestionar y analizar datos espaciales, de manera que no sólo se almacena en el mismo la información acerca de la localización de los elementos en el espacio (conocido como georreferenciación), sino también la relación existente entre unos elementos y otros (topología) (Gutierrez Puebla y Gould, 1994).

El término SIG ha sido definido de maneras muy diversas y desde diferentes puntos de vista por numerosos autores. De esta forma, algunas definiciones se refieren a su potencial como base de datos: *“Un caso especial de sistema de información en el que la base de datos consiste en observaciones sobre los elementos, actividades o sucesos distribuidos espacialmente, que se pueden definir en el espacio como puntos, líneas o áreas. Un SIG manipula los datos sobre puntos, líneas y áreas, recuperando los datos para preguntas ad hoc y análisis”* (Dueker, 1979); *“Un sistema de base de datos en el cual la mayor parte de datos están indexados espacialmente y que dispone de un conjunto de procedimientos para responder a cuestiones sobre las entidades espaciales de la base de datos”* (Smith et al, 1987); *“Una base de datos computerizada que tiene información espacial”* (Cebrián, 1988).

Otras definiciones acentúan sus funcionalidades: *“Un potente conjunto de herramientas para recolectar, almacenar, recuperar a voluntad, transformar y presentar datos espaciales procedentes del mundo real”* (Burrough, 1986); *“Un sistema computerizado para la captura, almacenamiento, recuperación, análisis y presentación de datos espaciales”* (Clarke, 1986); *“Un sistema de hardware, software y procedimientos diseñado para realizar la captura, almacenamiento, manipulación,*

análisis, modelización y presentación de datos referenciados espacialmente para la resolución de problemas complejos de planificación y gestión” (NCGIA, 1990).

Por último, algunos autores destacan su potencial como Sistema de Apoyo a la Decisión: *“Un sistema de ayuda a la decisión que integra datos referenciados espacialmente en un contexto de resolución de problemas” (Cowen 1988).*

A pesar de que conceptualmente nada se opone a que los Sistemas de Información Geográfica puedan ser computerizados o no - *“Un conjunto de procedimientos manuales o computerizados usado para almacenar y tratar datos referenciados geográficamente” Aronoff (1989)-*, en la actualidad al hablar de un SIG se hace referencia a los sistemas computerizados.

En el presente trabajo, el GIS utilizado ha sido el de la marca comercial ESRI: ArcGIS 9.2. Del mismo se han usado sus tres módulos principales: ArcMap (donde se realiza todo lo relacionado con la cartografía, el análisis de mapas y la edición), ArcCatalog (donde se organizan y administran todos los datos) y ArcToolbox (que contiene infinidad de herramientas para usar en geoprocesamiento de datos).

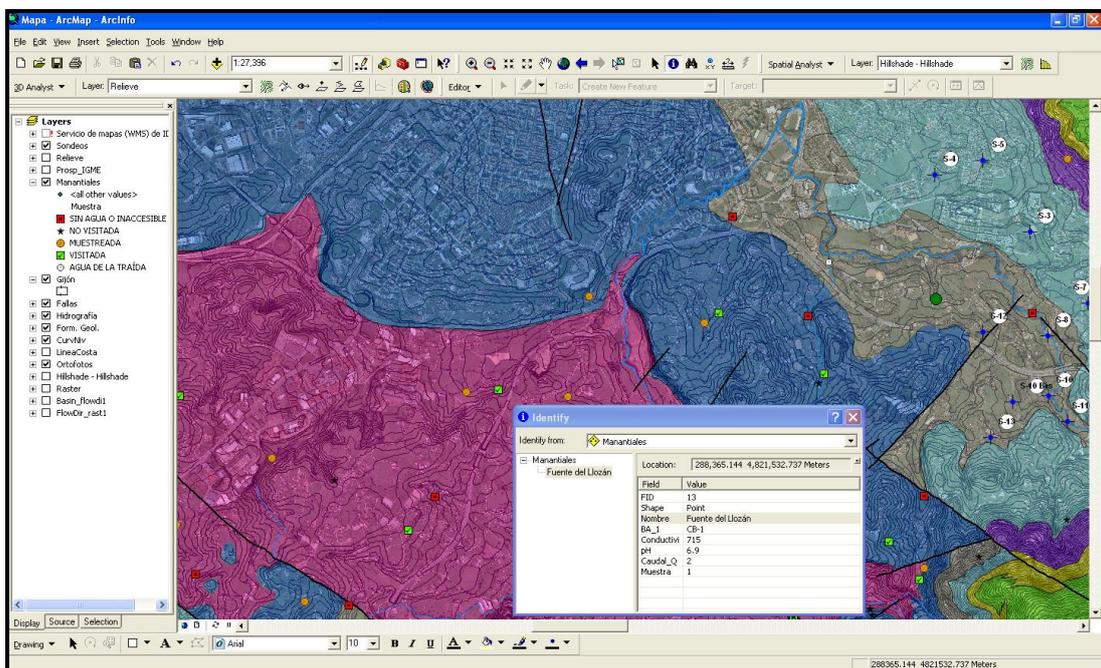


Fig.12.- Ejemplo de visualización de los datos para la Fuente del Llozán.

La metodología seguida se inicia con la introducción del mapa topográfico base y las ortofotos (todo ello convenientemente georreferenciado), sobre el que se importa el mapa

geológico del Jurásico (Menéndez Casares y González Fernández, 2010) (inicialmente en archivo .dwg de AutoCAD) que posteriormente se irá editando y modificando. También se utiliza el servidor WMS disponible en la página web del ayuntamiento de Gijón.

Los puntos de agua se añaden en diferentes capas (manantiales, prospecciones históricas y sondeos de la EMA). Estas capas constan de diversos campos (p. ej. nombre, referencia, conductividad, pH, caudal, etc. para los manantiales) (Fig. 12) que se completan tras cada jornada de medidas en campo.

La creación de un *raster* de elevaciones a partir de las curvas de nivel es de mucha utilidad posterior para el modelado en Visual MODFLOW. Así, se parte de este raster y se convierte en un fichero ASCII, que posteriormente se abre en SURFER (Fig. 13). Procesando adecuadamente se pueden importar estas elevaciones al modelo hidrogeológico como se verá mas adelante.

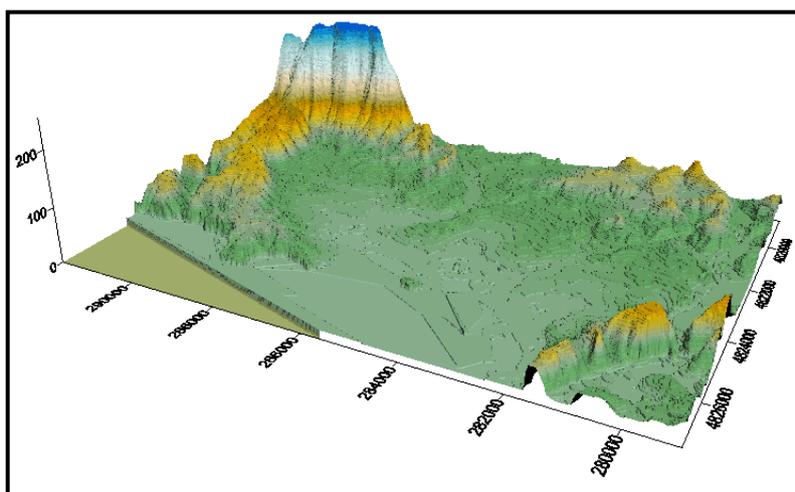


Figura. 13.- Modelo tridimensional de elevaciones (con la escala vertical exagerada) hecho con el programa SURFER

Finalmente, desde el ArcMap es posible realizar multitud de salidas gráficas en forma de mapas, con sus correspondientes datos de interés, leyenda, escala, etc. varios de los cuales se utilizan para ilustrar este trabajo.

3.3.2.- Preparación de muestras para análisis isotópicos de ^{34}S , ^{32}S , O^{18} y D

Las muestras recogidas en el campo son llevadas al laboratorio convenientemente refrigeradas y cerradas.

Una vez en el laboratorio, las muestras que van a ser utilizadas para el análisis isotópico de sulfatos se tratan convenientemente, acidificando con HCl 0.05M hasta pH=2 aprox. Posteriormente se lleva la muestra a ebullición y se le añade cloruro de bario al 5% para la formación de precipitado de sulfato de bario. Se deja enfriar y reposar la mezcla, se filtra y se seca en estufa 2-3 horas a 120 °C. El precipitado resultante es enfrascado y convenientemente etiquetado para su posterior análisis.

Las muestras de O-D se mantienen refrigeradas y cerradas herméticamente hasta su análisis para evitar el fraccionamiento isotópico por evaporación.

3.3.3.- Análisis e interpretación de los resultados (otros programas utilizados)

Los resultados de la testificación geofísica deben ser procesados, ya que se reciben en formato .LAS (Log ASCII Standard) y posteriormente se realizan las curvas de profundidad con Microsoft Excel.

También con Microsoft Excel se interpretan los resultados de los ensayos de bombeo y se realizan las gráficas correspondientes para su interpretación.

Para la realización de figuras y cortes geológicos se utilizó el programa AutoCAD.

La conversión de la topografía necesaria para la realización del modelo se llevó a cabo con el conversor de archivos en formato .dxf de AutoCAD en coordenadas XYZ incluido de serie en el paquete Visual MODFLOW.

3.4.- Modelización hidrogeológica

El modelo se ha realizado utilizando como base el código de simulación MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) desarrollado por el U.S. Geological Survey, compilado en la adaptación comercial de *Schlumberger Water Services*, **Visual MODFLOW 2010**.

Esta adaptación comercial permite desarrollar, en una interfaz más sencilla que en el código original, el modelado en tres dimensiones de los problemas de flujo y transporte en aguas subterráneas por el método de las diferencias finitas.

3.4.1.- Fundamento de los cálculos

Para simplificar se expone suponiendo el funcionamiento para una sola capa horizontal que se ha discretizado por un conjunto de celdas cuadradas de lado Δx y altura Δh .

Así, entre dos celdas adyacentes (Fig. 14) circulará un caudal que aplicando la Ley de Darcy será:

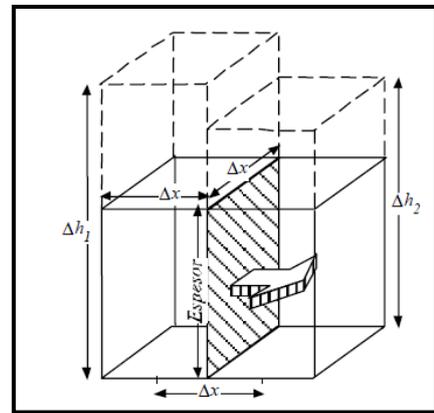
$$Q = \text{Sección} \times K \times \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (1)$$

siendo K =conductividad hidráulica

Al suponer celdas de base cuadrada ($\Delta x = \Delta l$), la sección será igual al lado (Δx) multiplicado por el espesor:

$$Q = \Delta x \times \text{espesor} \times K \times \frac{h_1 - h_2}{\Delta x} \quad (2)$$

Fig.14- Representación del cálculo del caudal que circula entre dos celdas adyacentes (Figura extraída de Sánchez (2004))



Y como la transmisividad es igual al espesor multiplicado por la conductividad hidráulica, simplificando se obtiene:

$$Q = T \times (h_1 - h_2) \quad (3)$$

Si se considera el balance de entradas y salidas de agua en una celda con coordenadas x e y conocidas para un incremento de tiempo determinado Δt :

$$\sum \text{entradas} - \sum \text{salidas} = \Delta \text{almacenamiento} \quad (4)$$

donde las entradas y salidas (Fig. 15) se expresan mediante caudales [$Q = T \times (h_1 - h_2)$] y la variación en el almacenamiento es el cambio de volumen en un tiempo determinado:

$$\Delta \text{almacenamiento} = \frac{\Delta \text{volumen}}{\Delta \text{tiempo}} \quad (5)$$

Y la variación de volumen es la variación del nivel piezométrico por la base de la celda (Δx^2) y por el coeficiente de almacenamiento (S).

$$\Delta \text{almacenamiento} = \frac{(h^{t_x} - h^{t_{x-1}}) \times \Delta x^2 \times S}{\Delta \text{tiempo}} \quad (6)$$

Sustituyendo en la ecuaciones (4) los términos de entradas y salidas expresadas en caudales según la ecuación (3) y el almacenamiento según la ecuación (5) es posible obtener el balance para una celda (x,y).

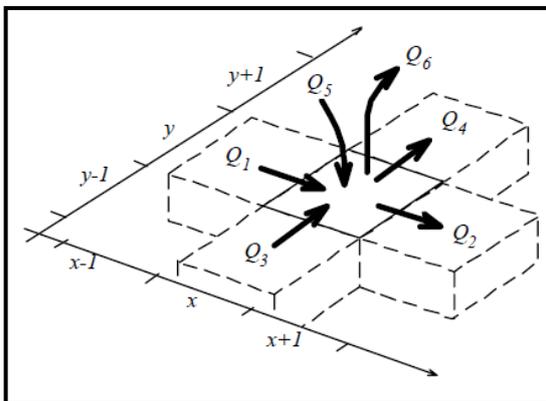


Fig.15.- Representación de las entradas (Q_1 , Q_3 y Q_5) y salidas (Q_2 , Q_4 y Q_6) expresadas en caudales para una celda (x,y). (Figura extraída de Sánchez, 2004).

Esta explicación se refiere a una sola capa horizontal. Si se suponen varias capas superpuestas se debe añadir al balance de cada celda el flujo de aquellas que se encuentran por encima y por debajo, lo que hace más complejo el cálculo.

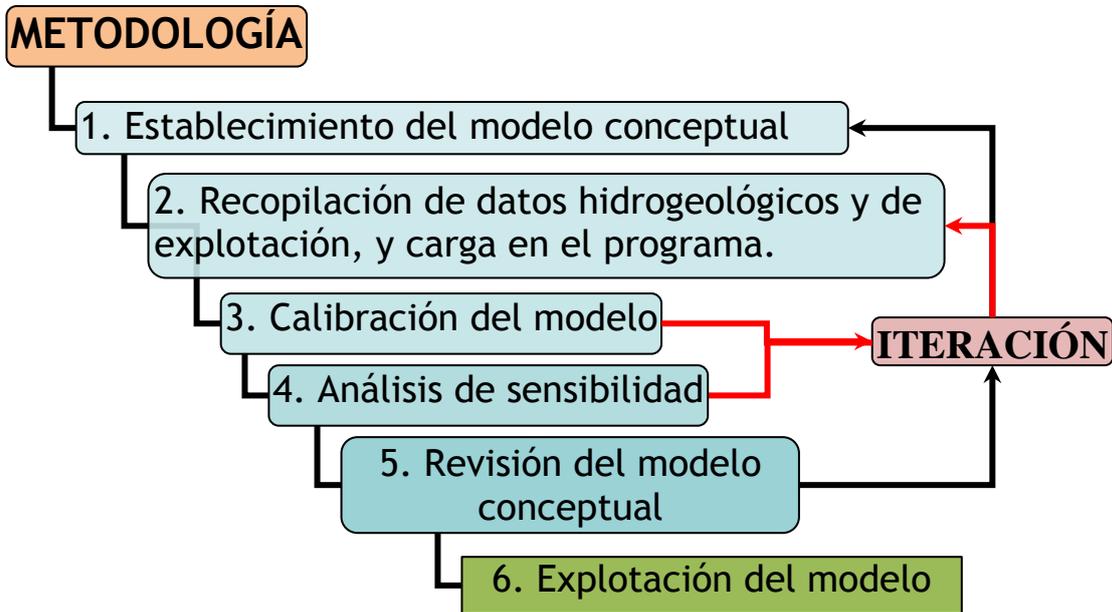
* La anterior explicación de los cálculos tiene como referencia los expuestos por Sánchez (2004), basados a su vez en Prickett y Lonquist (1971).

3.4.2.- Desarrollo del modelo de simulación.

Los modelos de simulación se basan en la asunción del hecho de que, si son capaces de reproducir situaciones pasadas de un sistema físico cuyos parámetros conocemos, es bastante presumible que será capaz de predecir situaciones futuras, permitiendo anticipar la solución del sistema y establecer en su caso las medidas oportunas de control, corrección, etc.

La metodología para garantizar el cumplimiento de la premisa anterior requiere una serie de pasos indispensables para que el modelo alcance una calidad mínima. Esta

metodología consta de una serie de pasos que se esquematizan en la figura siguiente y son desarrollados a continuación:



1. Establecimiento del modelo conceptual

El modelo es una aproximación de la realidad, de tal manera que representa de manera simplificada las características, tanto físicas como hidrogeológicas del sistema, a la vez que todas las acciones externas (precipitación, explotación por bombeos...) que actúan sobre él.

La primera acción a realizar es establecer las dimensiones y los límites del modelo, teniendo siempre en consideración que dicho modelo constituye una porción de un sistema físico que se encuentra en equilibrio dinámico con el resto de elementos del sistema en el que está inmerso.

En MODFLOW el modelo está constituido por una malla de celdas irregulares que cumple una serie de requisitos:

- **Orientación.**- Es recomendable que la malla esté orientada en planta según las direcciones principales de flujo (si estas son conocidas). En un medio isótropo (o en la mayoría de medios en que se asume una isotropía razonable) este factor pierde importancia, pudiendo orientarse la malla indistintamente.

- Densidad, tamaño y número de celdas.- En general cuanto más densa sea la malla mayor será la precisión obtenida en los resultados. Tanto la densidad como el tamaño y número de las celdas presenta una gran variación en función de los datos disponibles, el tamaño del modelo, el grado de detalle, etc. El criterio general es buscar la mayor densidad de celdas, así como las de menor tamaño en las zonas donde pueda existir una mayor variación de parámetros o en zonas de interés (p. ej. en las cercanías de pozos de bombeo).
- Relación con datos disponibles.- Un mayor número de datos (siempre que estos sean de calidad) implica una mejora del modelo, permitiendo afinar en los resultados y llegar a una solución más aproximada a la realidad (Fig. 16).

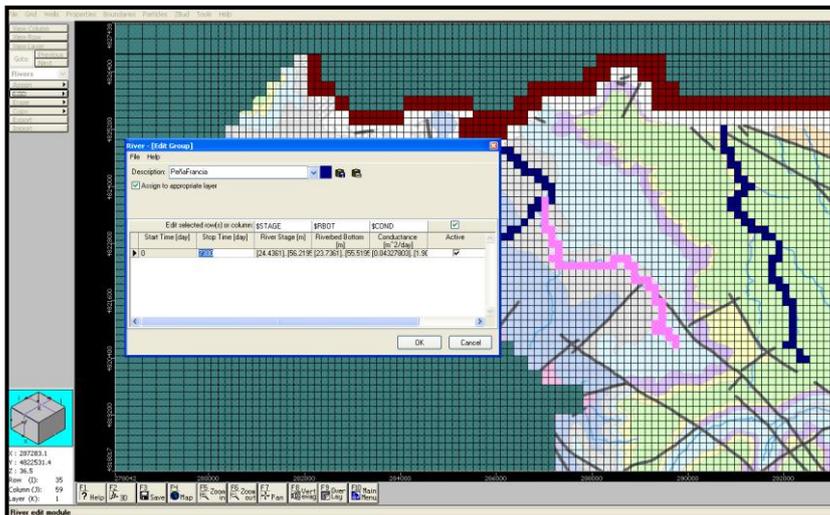


Fig.16- Edición de los datos del arroyo Peña Francia en el modelo.

Visual MODFLOW permite introducir un mapa de referencia o foto sobre la que superponer la malla, lo que facilita la introducción de los datos. Esta capa, utilizada como mapa base debe ser georreferenciada (el programa permite utilizar coordenadas reales basadas en un sistema de coordenadas reconocido o coordenadas locales para el modelo).

La georreferenciación de la malla y el mapa base hace posible utilizar archivos de GIS o SURFER, muy útiles especialmente para generar la topografía del modelo, en especial cuando este consta de numerosas celdas (Fig. 17).

Los límites del modelo presentan un factor clave en el desarrollo del modelo, dado que constituyen las zonas donde tendrán lugar las acciones y reacciones entre el modelo

y el resto del sistema. Estos límites se conocen como condiciones de contorno, y pueden ser de dos tipos (el resto de condiciones de contorno pueden asimilarse a las anteriores operando adecuadamente):

1. Condiciones de flujo conocidas en el contorno (de magnitud y variación temporal).
2. Condiciones de piezometría conocidas en el contorno (de magnitud y variación temporal).

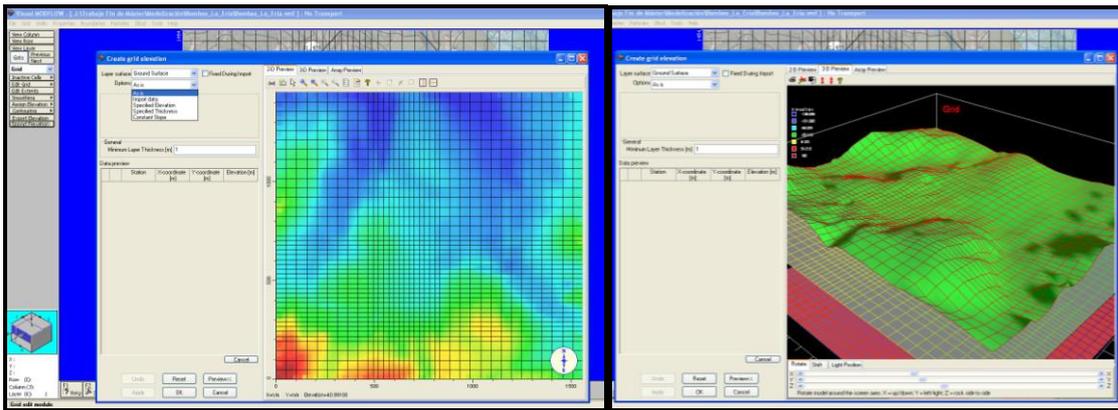


Fig.17.- Introducción de la topografía para el modelo del bombeo de La Ería con visualización en 2D (izda) y 3D (dcha).

Por tanto, y atendiendo a las condiciones de contorno, es posible determinar los bordes de nuestro modelo que pueden ser de dos tipos:

a) Bordes de tipo físico.- Representan la mejor opción al ser estables en el tiempo (al menos en la escala utilizada en el modelo) y fácilmente identificables. Son este tipo de bordes, por ejemplo, los materiales impermeables, de tal manera que constituyen una condición de flujo conocida cuya magnitud es estable en el tiempo e igual a cero.

b) Límites hidráulicos.- Variables en el tiempo y el espacio, deben utilizarse con mucho cuidado, al influir y poder ser influenciados por los cambios que sobre ellos ejercen las condiciones de explotación del sistema. Este tipo de bordes lo constituyen por ejemplo las líneas de flujo, que son ortogonales a las líneas isopiezas, y por definición presentan a ambos lados la misma piezometría, por tanto el gradiente es igual a cero.

De la misma forma es posible establecer las condiciones de contorno referidas al flujo y la piezometría, si bien la segunda es más sencilla de medir en el campo y establecer en el modelo con una menor comisión de errores.

Una vez establecidos los límites en planta y la geometría del modelo, debe concretarse la extensión del mismo en profundidad. El modelo está constituido por diferentes capas (unidades hidroestratigráficas), cada una de las cuales es tal que los materiales que la componen poseen unas características similares desde el punto de vista hidrogeológico (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, porosidad, etc.).

Debe haber al menos tantas capas como unidades hidroestratigráficas, pero si una unidad es de elevado espesor se puede dividir en varias capas diferentes a efectos de la modelización.

Al igual que en la delimitación en planta del modelo, es posible introducir las cotas topográficas de los límites entre capas y de la superficie topográfica, siendo posible el espesor variable de las capas, pero cumpliendo la condición de que deben presentar continuidad en toda la superficie del modelo (si una capa desaparece en el modelo se le introduce un espesor pequeño, pero no nulo).

2. Recopilación de datos hidrogeológicos y de explotación, y carga en el programa.

Un condicionante esencial para la realización del modelo es la disponibilidad adecuada de datos, en número y calidad, correspondientes al sistema físico estudiado. Estos datos comprenden no solo los parámetros que caracterizan física e hidrogeológicamente nuestro sistema (geometría, características hidrogeológicas,...) sino también las medidas de diversa índole correspondientes a las acciones externas a las que se ve sometido (explotaciones, recarga de lluvia,...) y la propia evolución temporal de las variables ambientales, como la piezometría.

La correcta introducción de los datos es un proceso de extrema importancia, ya que toda la simulación se basa en un mínimo de información de calidad, y sin la misma, aún pudiendo desarrollar un modelo y obtener unos resultados, estos carecerán totalmente de sentido y de aproximación a la realidad.

La manera de introducir los datos (*Input*) en Visual MODFLOW es siguiendo el menú superior de izquierda a derecha (*Grid, wells, properties, boundaries, etc*) y dentro de cada una de estas pestañas en orden hacia abajo.

La primera pestaña (*grid*) permite definir el tamaño de las celdas, (haciéndolas más pequeñas en puntos de interés o mayores donde contemos con pocos datos o sea menos relevante), la densidad de las mismas, asignar las celdas activas e inactivas y definir la elevación y geometría de las capas.

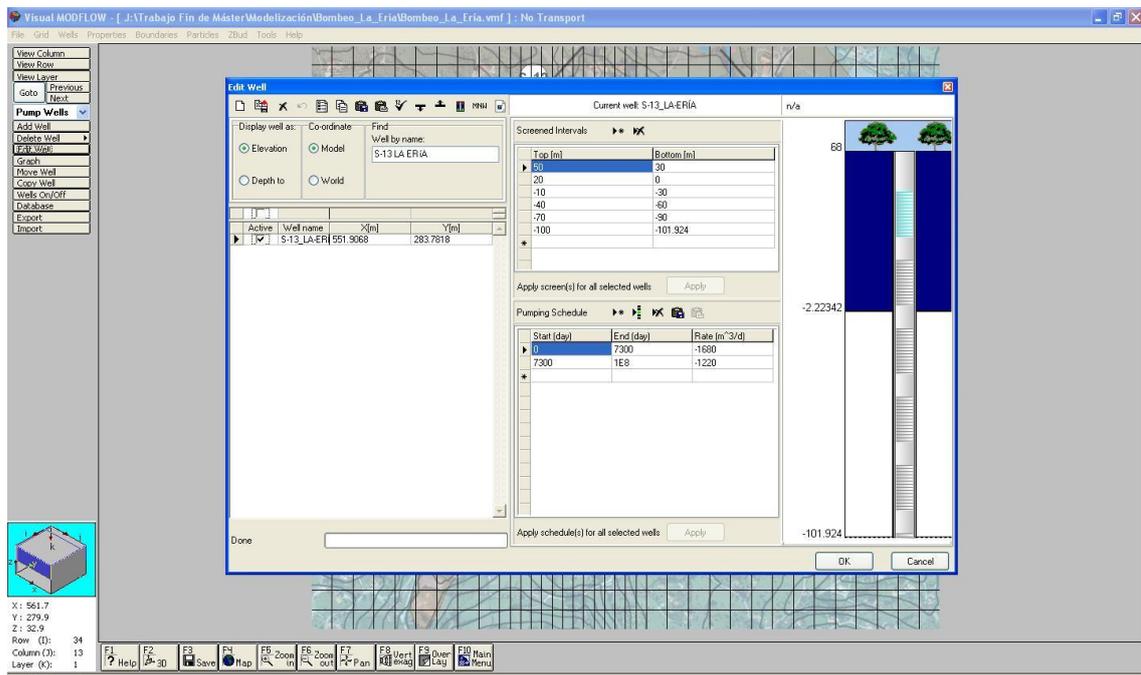


Fig.18.- Visual MODFLOW da la posibilidad de limitar las zonas de entubación con rejilla y las tasas de bombeo en los intervalos de tiempo seleccionados. En la imagen la introducción de datos para el pozo de La Ería.

El apartado *wells* se utiliza para añadir y editar los pozos de extracción (o inyección) y asignar sus parámetros (Fig. 18), su profundidad, delimitar sus tramos de rejilla, seleccionar la tasa de bombeo (o de inyección) y en que periodos de tiempo se produce, etc. También desde la pestaña *wells* se pueden situar los pozos de observación e introducir los niveles tomados en el campo que más tarde serán usados para la calibración.

En el campo *properties* se introducen los valores característicos de los materiales, como son la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento, etc. y los niveles iniciales.

En la pestaña *boundaries* se seleccionan y sitúan las condiciones de contorno (niveles constantes, niveles generales, río, dren...) y las tasas de recarga y evapotranspiración. Este es el apartado más crítico de la modelización, puesto que sin unas condiciones de contorno adecuadas difícilmente se llegará a una solución adecuada.

Junto con estas pestañas principales en la definición del modelo, Visual MODFLOW cuenta con otras como son *particles* (donde se pueden situar una serie de partículas que el programa suplementario MODPATH utilizará para dibujar trayectorias de flujo) o *zone budget* (que permite calcular los balances entre zonas seleccionadas previamente).

Una vez se han introducido todos los parámetros al modelo, mediante la pestaña *run* del menú principal (*main menu*) se ejecuta el modelo, cuyos resultados deberán ser calibrados y sometidos al consiguiente análisis de sensibilidad. Estos resultados se pueden visualizar desde la pestaña *output*.

3. Calibración

La calibración y el análisis de sensibilidad constituyen la fase más crítica en el desarrollo del modelo. Durante el proceso de calibración deben realizarse multitud de simulaciones diferentes de los sistemas, variando los datos de partida y analizando los resultados obtenidos en el modelo en cada caso. Es por tanto imprescindible, en este proceso, disponer de datos históricos reales correspondientes a las condiciones de explotación del sistema y a la piezometría alcanzada como resultado de las mismas.

Estos datos históricos pueden proceder de diferentes fuentes, lo que hace que su credibilidad pueda variar, desde aquellas de credibilidad muy alta (como medidas directas de niveles piezométricos) a aquellos con una menor bondad, que pueden proceder de estudios previos, estimaciones o fuentes bibliográficas.

La fase de calibración tiene como objetivo mejorar la credibilidad de estos parámetros y consiste en introducir datos disponibles al sistema, ejecutar el modelo y comparar los resultados obtenidos con la información histórica disponible para la zona

modelizada. Si la discrepancia entre los resultados obtenidos y los observados en la realidad es elevada, se deben volver a modificar los datos de partida. La calibración finaliza cuando la diferencia entre los resultados modelizados y los datos observados está por debajo de un valor de cierre o error asumido.

La manera más sencilla de visualizar la calibración es a partir de los puntos de observación con un nivel conocido que hemos introducido previamente en el modelo. Al ejecutar el *output*, es posible ver gráficas (Fig. 19) donde se presentan los valores calculados frente a los observados.

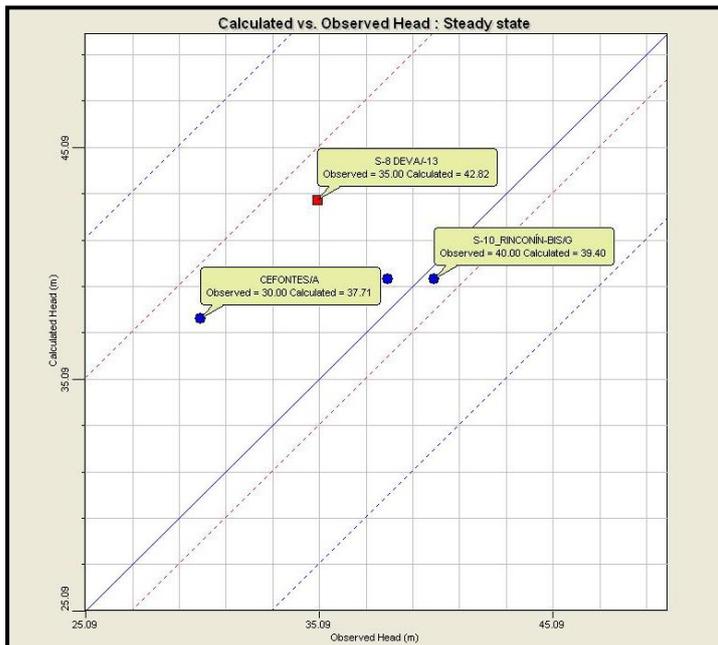


Fig. 19.- Gráfica de medidas calculadas frente a observadas en diferentes pozos de observación.

4. Análisis de sensibilidad.

Es posible que la solución obtenida no sea única, de manera que dos conjuntos de parámetros diferentes puedan dar el mismo resultado. Para determinar cual de ellos es el que con mayor probabilidad define el sistema modelizado se procede al análisis de sensibilidad, que tiene como objetivo descartar aquellas soluciones caracterizadas por una mayor inestabilidad. Para localizar estas soluciones de mayor inestabilidad, se realizan ligeras modificaciones en los datos de partida, de tal manera que las soluciones más inestables presentan grandes variaciones tras pequeños cambios en los datos de partida, lo que no es frecuente en el medio natural.

5. Revisión del modelo conceptual.

Es posible llegar a situaciones durante el desarrollo de un modelo en que no es posible calibrar el modelo de manera adecuada, o en que las situaciones alcanzadas presentan un inestabilidad manifiesta en la fase de análisis de sensibilidad. Si esto ocurre cuando todas las fases del proceso se han seguido de una manera correcta, es posible que la causa del problema sea un inadecuado modelo conceptual del sistema que deseamos modelizar.

Cuando se da esta circunstancia, la única solución consiste en realizar un nuevo modelo conceptual, realizando nuevamente todo el proceso.

6. Explotación del modelo.

Una vez finalizadas satisfactoriamente las etapas anteriores, el modelo está en condiciones de simular situaciones hipotéticas. En esta etapa se hacen no solo predicciones anticipadas en el tiempo, sino también simulaciones anteriores, como por ejemplo, conocer el origen de un determinado contaminante. También es posible caracterizar el sistema, es decir, cuantificar mediante su uso la magnitud de determinados parámetros del sistema estudiado, lo que se asemeja a la etapa de calibración, de manera que se aumenta el grado de credibilidad de los parámetros al generar resultados que se asemejan más o menos fielmente a los valores observados del sistema.

Una explotación continuada del modelo permite ampliar la información histórica disponible y mejorar progresivamente la calibración del modelo.

4. MARCO GEOGRÁFICO

4.1. Situación geográfica

El trabajo se ha desarrollado principalmente en el Municipio de Gijón, Asturias, que limita con los concejos de Carreño y Corvera al oeste, Llanera al suroeste, Siero al sur y Villaviciosa al este. Así mismo, se encuentra unido al concejo de Sariego en un único punto, la Peña de los Cuatro Jueces, donde confluyen además Siero y Villaviciosa. Al norte se sitúa el Mar Cantábrico.

El área elegida se debe a cuestiones puramente geológicas, correspondiendo a los afloramientos más occidentales de uno de los cuatro sectores en que Menéndez Casares *et al.* (2004) dividieron la cuenca jurásica asturiana atendiendo a razones hidrogeológicas: el Sector Valle de Caldones-Ría de Villaviciosa. Siendo los sectores restantes (de Oeste a Este): Salinas-Valle del río Aboño, Valle del río Aboño-Valle de Caldones y Ría de Villaviciosa-Arenal de Moris (Fig. 20).

Así pues, si bien este sector queda limitado al Norte por el Mar Cantábrico, al Sur por los materiales del Permotriás, al Oeste por el Permotriás y por el Paleozoico, y al Este por la ría de Villaviciosa, la zona de estudio se restringe a los afloramientos más occidentales del Jurásico Inferior que aparecen en el entorno de la ciudad de Gijón.

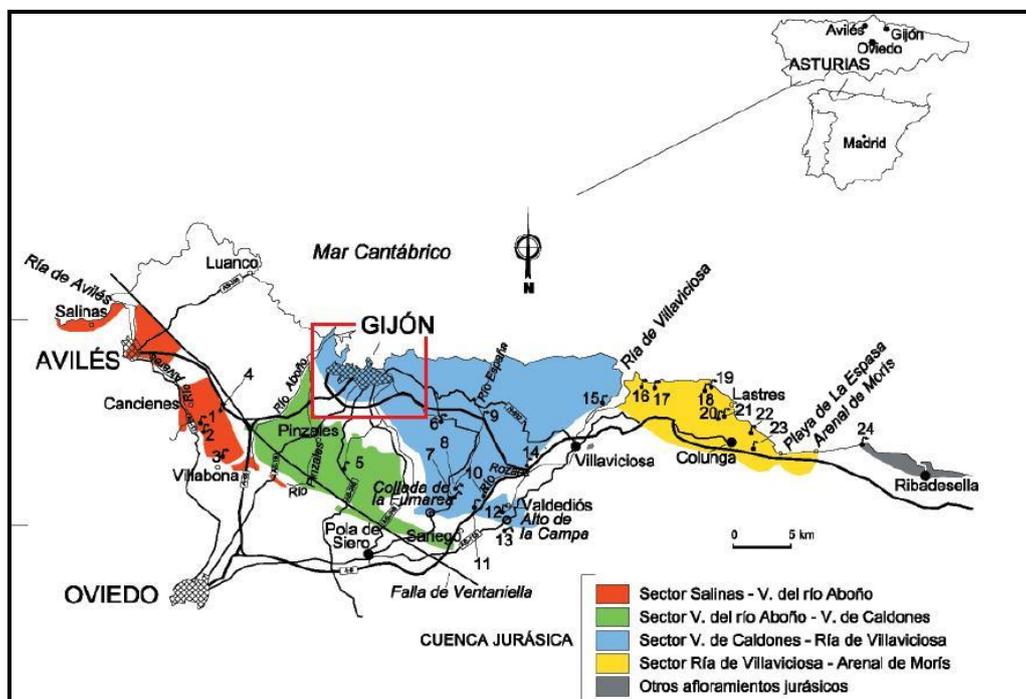


Fig.20.- Situación geográfica de la zona de estudio. (Modificado de Menéndez Casares *et al.*, 2004)

4.2. Orografía

La orografía de la zona es suave, consecuencia de la estratificación casi horizontal de los materiales jurásicos. Los afloramientos de la Fm. Gijón, se sitúan por lo general por debajo de los 500 m, y en el entorno de la ciudad de Gijón y bajo el mismo núcleo urbano entre el nivel del mar y los 150 m.s.n.m.

Bordeando la planicie abierta al mar aparecen las mayores altitudes del municipio, de manera que al oeste se sitúa la Campa Torres (128 m), el Alto de Veriña (163 m), el Monte Poago (169 m), el Monte Arco (192 m) y el Monte Areo (264 m). Al sur se sitúan las elevaciones del Pico San Martín (519 m), el Pico del Sol (439 m), El Xigal (562 m), el Pico Daljuín (440 m) y la Peña del Huergo (428 m). Hacia el SE se encuentran la Peña de los Cuatro Jueces (662 m), el Monte del Llagón (571 m) y La Cuesta (551 m).

4.3. Hidrografía

Los diferentes ríos y arroyos presentes en la zona de estudio pertenecen a la vertiente hidrográfica cantábrica, caracterizándose por ser de corto recorrido y caudales poco importantes resultado del drenaje de pequeñas cuencas.

De Oeste a Este, las cuencas hidrográficas de mayor importancia del municipio de Gijón son las siguientes:

- **Cuenca Aboño-Pinzales.**- El río Aboño desemboca en la Ría del mismo nombre, en el municipio de Carreño, prácticamente en su límite con el concejo de Gijón. Este río, que nace en el municipio de Llanera y discurre en la mayor parte de su recorrido por los términos más occidentales del municipio gijonés, tiene como principal afluente al Río Pinzales, en su margen derecha, que drena todas las aguas de esta subcuenca. Otros afluentes son, en su margen izquierda los arroyos de Reconco, en Carreño; y, los de Castañedo, Reguerón, la Vegona, Castro, Santianes, la Oscura y el Pascón, en el municipio de Gijón.

- **Cuenca del Río Pilón.**- También conocido como río Tremañes, nace al norte de la parroquia de Ruedes. En la actualidad sus aguas son captadas en el pozo de retenida del Natahoyo donde se conducen sus aguas hasta la planta de pretratamiento de la Figar.

- **Cuenca del Cutis.-** Nació en la fuente del Lavadero o Valles en la zona de Roces. Actualmente está canalizada hasta el pozo de retenida del Natahoyo.
- **Cuenca del Río Piles.-** El río Piles se origina por la confluencia en la zona de Granda de los arroyos Llantero y Meredal. A la altura de las Mestas recibe por su orilla derecha al arroyo de Peña Francia, que proviene de la Fuente Deva. Desemboca al este de la playa de San Lorenzo.
- **Arroyo La Ñora.-** El arroyo de La Ñora constituye el límite entre los municipios de Gijón y Villaviciosa. De escasa longitud (menor de 5 km), desemboca en el Mar Cantábrico en la playa de La Ñora.

4.4. Climatología

4.4.1. Aspectos generales

La Climatología juega un papel crucial en las características hidrogeológicas de una cuenca, siendo algunos de los parámetros como el régimen de precipitaciones, la insolación, el grado de humedad, la termometría o el régimen de vientos, factores indispensables para tener un buen conocimiento del balance hídrico.

El clima de Gijón podría comprenderse como el resultado de dos factores que actúan a distinta escala: una dinámica atmosférica característica de latitudes medias, y el choque del frente atlántico contra una zona orográficamente elevada y cercana a la línea costera (Gutierrez Claverol et al., 2002).

La ubicación hacia el paralelo 43° propicia la interacción de dos masas de aire de distinta naturaleza, una de origen polar y otra subtropical (Felicísimo Pérez, 1992). Estas dos masas de aire son muy diferentes desde el punto de vista termodinámico y en la zona de contacto no suelen mezclarse, sino que tienden a interpenetrarse formando grandes remolinos. La faja activa creada constituye un frente polar y sus ondulaciones, reflejo de complicados fenómenos dinámicos, suelen terminar formando borrascas que se desplazan de oeste a este.

Se encuadra así la climatología gijonesa dentro del denominado “dominio templado-frío oceánico”, en el que imperan las lluvias, humedades y neblinas, con baja insolación. La temperatura media (14°C) no sufre oscilaciones extremas, debido al efecto suavizante del mar.

Histórico climatológico del periodo 1971-2000 (Fuente: AEMET)

Altitud (m): 3

Latitud: 43° 32' 18" N – Longitud: 05° 38' 31" O

Mes	T	TM	Tm	R	H	DR	DN	DT	DF	DH	DD	I
Enero	8.9	13.1	4.7	94	78	12	0	1	1	3	3	103
Febrero	9.6	13.8	5.4	85	77	11	0	1	1	1	2	109
Marzo	10.7	14.9	6.6	74	76	10	0	1	1	0	3	137
Abril	11.8	15.6	8.1	93	76	12	0	2	1	0	2	151
Mayo	14.3	17.8	10.9	79	79	11	0	2	2	0	1	167
Junio	16.9	20.2	13.6	47	79	7	0	2	2	0	3	180
Julio	19.2	22.4	16	45	80	6	0	2	2	0	4	194
Agosto	19.7	23.2	16.2	54	80	7	0	2	2	0	3	190
Septiembre	17.9	21.8	14.1	70	80	8	0	1	4	0	4	158
Octubre	15	19	11	104	81	11	0	1	2	0	3	132
Noviembre	11.6	15.6	7.6	120	81	12	0	1	2	1	3	106
Diciembre	9.9	14	5.8	104	80	12	0	1	2	2	3	92
Año	13.8	17.6	10	971	79	121	1	17	23	8	34	1721

Leyenda

T	Temperatura media mensual/anual (°C).
TM	Media mensual/anual de las temperaturas máximas diarias (°C).
Tm	Media mensual/anual de las temperaturas mínimas diarias (°C).
R	Precipitación mensual/anual media (mm).
H	Humedad relativa media (%).
DR	Número medio mensual/anual de días de precipitación superior o igual a 1 mm.
DN	Número medio mensual/anual de días de nieve.
DT	Número medio mensual/anual de días de tormenta.
DF	Número medio mensual/anual de días de niebla.
DH	Número medio mensual/anual de días de helada.
DD	Número medio mensual/anual de días despejados.
I	Número medio mensual/anual de horas de sol.

Tabla.2- Valores climatológicos del periodo 1971-2000 (Fuente AEMET)

4.4.2. Precipitaciones

A pesar de que bajo esta denominación se incluye todo el agua procedente de las nubes, independientemente de la forma de manifestarse –lluvia, nieve, granizo, etc.-, la casi totalidad de las precipitaciones que recibe el municipio son de tipo pluviométrico. Los días lluviosos en Gijón son casi la mitad y repartidos de manera homogénea (si se exceptúan los meses de verano).

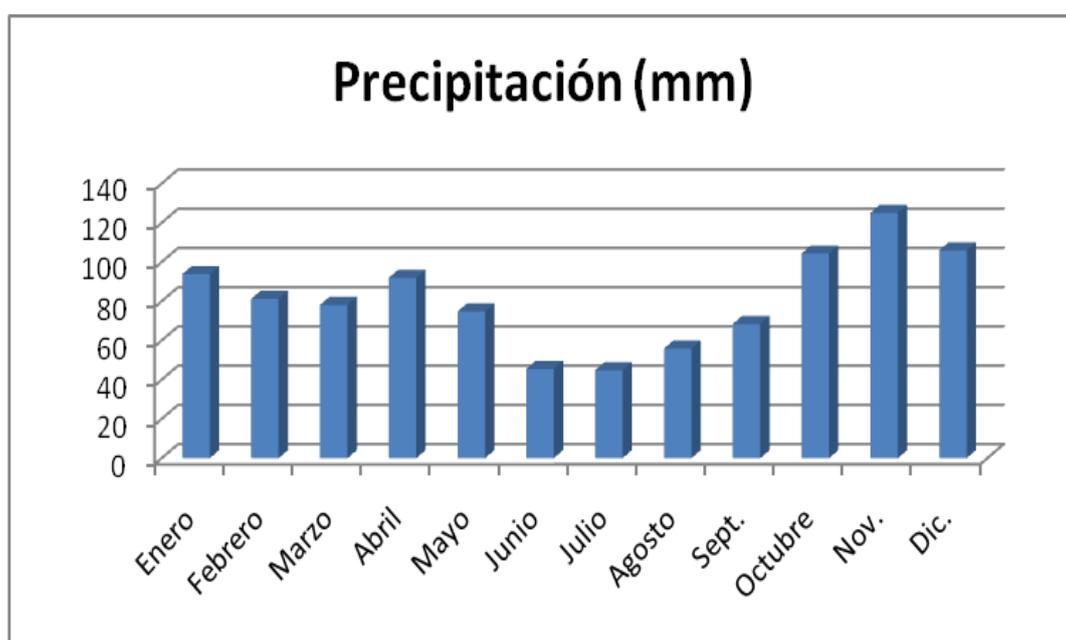


Fig. 21.- Precipitación media mensual para el periodo 1971-2010 (Fuente: AEMET y METEOGIJÓN)

Por término medio la precipitación anual se sitúa alrededor de los 1000 l/m², no obstante, la cantidad de lluvia sufre notorios cambios a lo largo del año, pudiendo afirmar que existirían tres periodos claramente diferenciados: en primer lugar un rango de precipitaciones abundantes, superiores o aproximados a 100mm en los meses de Octubre a Enero; en segundo lugar entre los mes de Febrero y Mayo las precipitaciones son moderadas,; y finalmente, entre Junio y Septiembre el periodo de precipitaciones sería más bajo, siendo el mes de Julio el mes históricamente más seco del año, con cantidades cercanas o incluso inferiores a los 40mm (Fig. 21).

Proyecciones sobre escenarios futuros en el régimen de precipitaciones (AEMET, 2009) prevén, como consecuencia del cambio climático, unas variaciones muy acusadas en la distribución estacional, especialmente para la época estival. De esta

forma se han proyectado escenarios donde se podría reducir en 100 años más de un 50% la cantidad de lluvia recogida en los meses de verano. Por otra parte para los meses de invierno no se han supuesto grandes variaciones, incluso se han obtenido escenarios con aumento de las precipitaciones (Fig. 22).

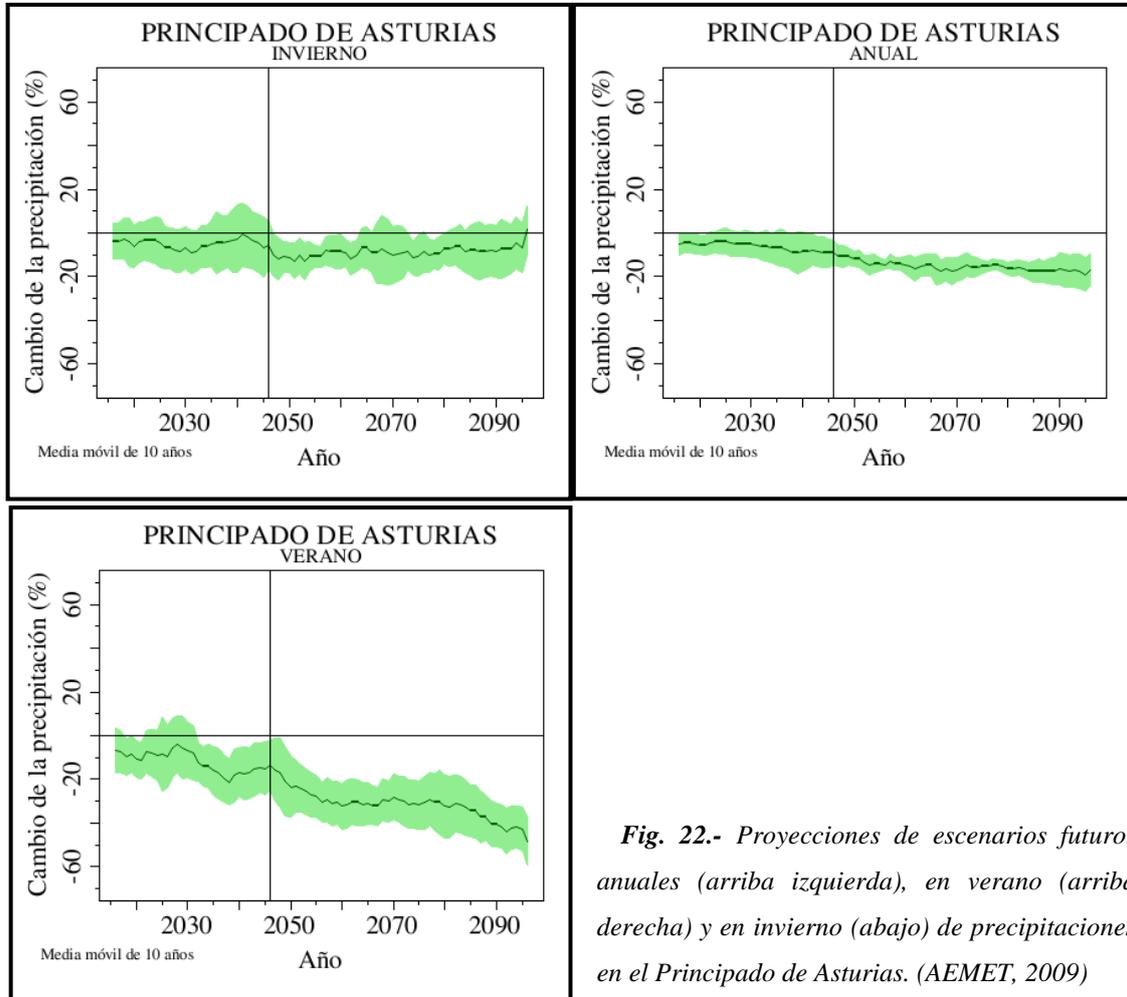


Fig. 22.- Proyecciones de escenarios futuros anuales (arriba izquierda), en verano (arriba derecha) y en invierno (abajo) de precipitaciones en el Principado de Asturias. (AEMET, 2009)

Estas variaciones en el régimen anual pueden tener grandes implicaciones en los recursos hidrogeológicos de la zona.

4.4.3. Temperaturas

Las temperaturas de la zona se caracterizan por su templanza, con oscilaciones moderadas. La media anual se sitúa entre los 9 y los 20°C, con un promedio anual de unos 13,8°C.

Los datos de temperatura media mensual muestran un ciclo anual con un máximo en agosto (19,2°C) y un mínimo en enero (8,9°C), con oscilaciones medias diurnas (diferencia entre máximas y mínimas diarias) prácticamente invariables de unos meses a otros, aunque mayores en los meses de invierno (de incluso más de 8°C) y menores en los de verano (de unos 6°C) (Fig. 23).

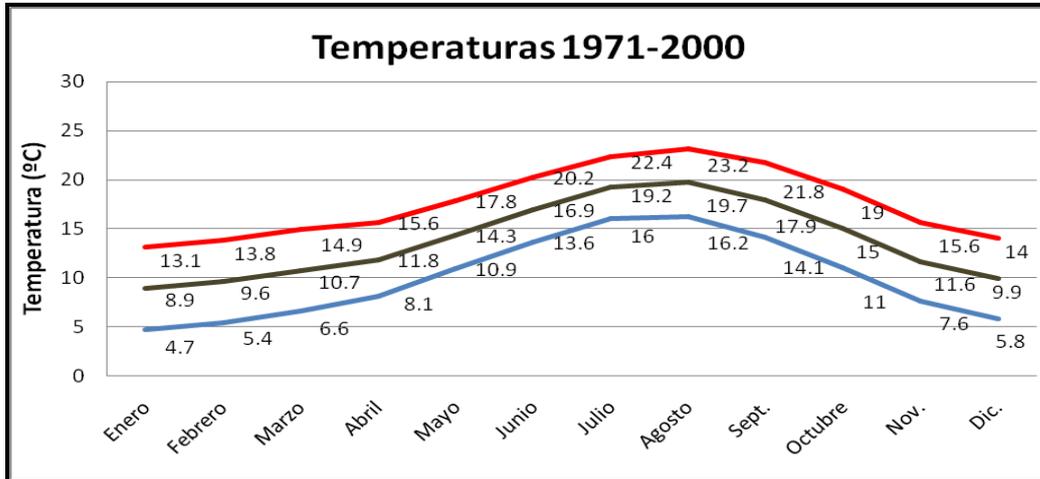


Fig.23.- Temperaturas máximas, mínimas y medias en la ciudad de Gijón en el periodo 1971-2000

Fuente: AEMET

Datos recientes (AEMET, 2009) de proyecciones de diversos escenarios futuros en el Principado de Asturias muestran ascensos de temperaturas máximas asociadas al cambio climático de hasta 4-5°C y mínimas de 2-3°C para los próximos 100 años (Fig. 24).

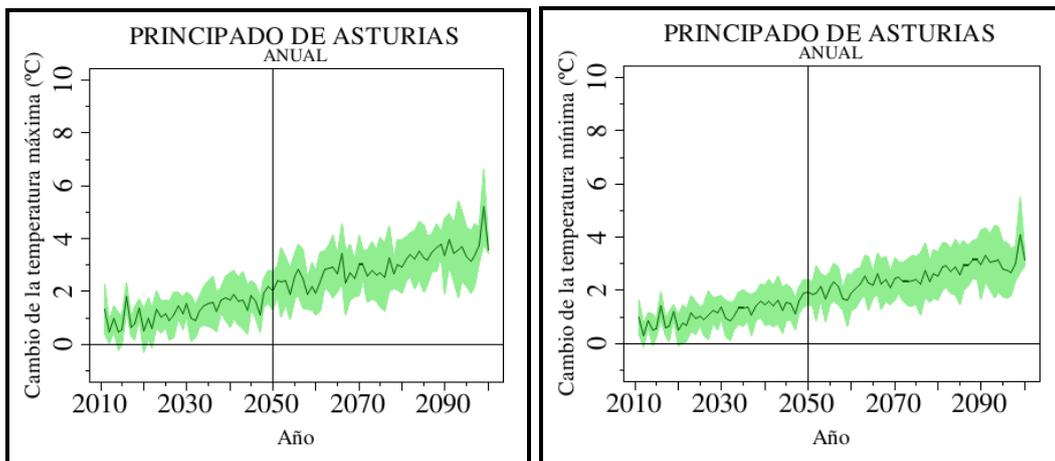


Fig. 24.-. Escenarios de temperaturas máximas (izda.) y mínimas (dcha.) anuales futuras (AEMET,

2009)

4.4.4. Insolación

La insolación en el municipio de Gijón es de unas 1700 horas, con máximos en agosto cercanos a las 200 horas mensuales y mínimos en diciembre, único mes con menos de 100 horas de sol (Fig. 25).

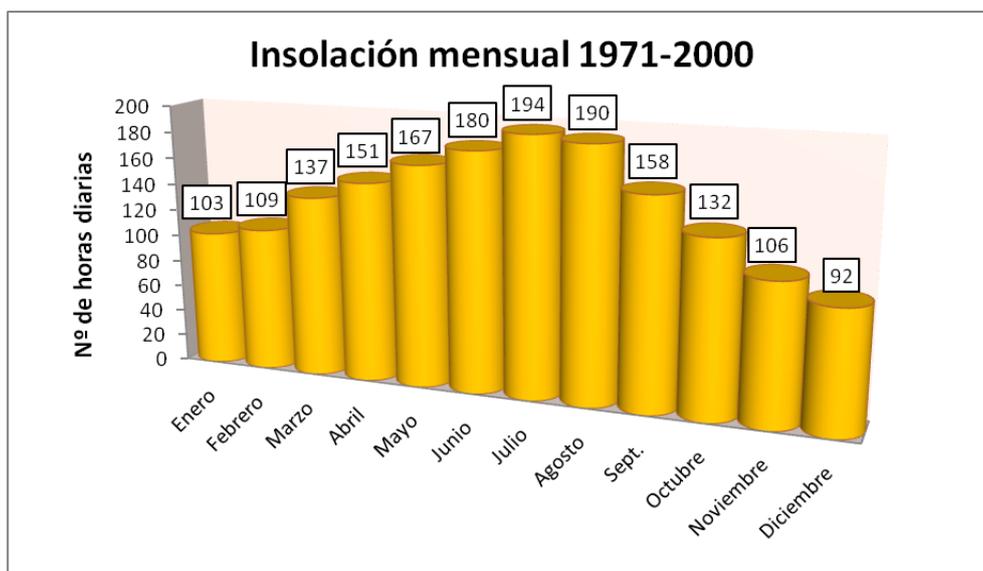


Fig.25- Número medio mensual de horas de sol para el periodo 1971-2000. (AEMET)

Los días completamente despejados son escasos, unos 35 repartidos uniformemente a lo largo del año, siendo los días con presencia de nubes cerca del 90% (alrededor de 330 en todo el año). De entre estos, casi la mitad (unos 160) son completamente cubiertos.

Los días con niebla son variables de unos años a otros, entre 20 y 30 días anuales. Los meses con más días de niebla son los de otoño e invierno, con 4 ó 5 días de niebla de media, mientras que los meses con menos son los de primavera y verano, con una media de 1 ó 2 días de niebla al mes.

4.4.5. Vientos

En el municipio de Gijón la dirección de los vientos dominantes está muy influenciada por la temperatura.

De esta forma, en las horas más frescas del día y durante el periodo invernal los vientos reinantes son de componente O y SO, aportando abundantes precipitaciones,

especialmente en las zonas topográficamente más elevadas. En la época estival y en las horas más calurosas del día domina la influencia subtropical marítima caracterizada por la presencia anticiclónica, con vientos secos y frescos procedentes del E y NE, que provoca en verano un descenso térmico generalizado que contribuye a suavizar las temperaturas (Fig. 26).

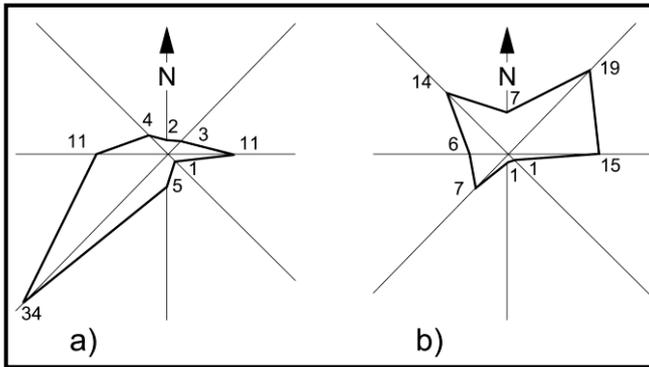


Fig.26.- Rosa de los vientos correspondiente a los meses de invierno/a) y verano (b). (Extraído de Claverol et al., 2002)

4.4.6. Evapotranspiración potencial, evapotranspiración real y Lluvia útil.

La evapotranspiración se define como la suma de la evaporación y la transpiración en zonas cubiertas de vegetación. Dada la incapacidad de cuantificar ambos fenómenos, se representa en este apartado una estimación de la *evapotranspiración potencial* (ETP), definida como la evapotranspiración que se produciría en teoría si se cumplieran dos hipótesis: un desarrollo vegetativo óptimo y que la humedad del suelo coincidiera con su capacidad de campo.

Del mismo modo se hace un cálculo de la *evapotranspiración real* (ETR), inferior a la ETP, y que es la que realmente se produce en las condiciones existentes en cada caso (Custodio y Llamas, 1983).

Evapotranspiración potencial (ETP)

Para el cálculo de la ETP ha sido utilizado el método de Thornthwaite, quien utiliza como variable primaria para el cálculo la media mensual de las temperaturas medias diarias del aire.

Los valores de ETP fluctúan alrededor de una media de 750 mm/año (González-Fernández et al., 2009) en función de la temperatura media mensual, de manera que

para los meses donde el índice de calor es más elevado la *evapotranspiración potencial* será mayor.

En el cuadro siguiente se muestran los resultados calculados para el año 2010 en mm/año:

Mes	i	T ^a	N	D	K	ε	ETP
Enero	2.11	8.2	9.4	31	0.8094	26.43	21.40
Febrero	2.35	8.8	10.5	28	0.8166	29.11	23.77
Marzo	3.03	10.4	11.9	31	1.0247	36.55	37.45
Abril	4.15	12.8	13.5	30	1.125	48.50	54.57
Mayo	4.65	13.8	14.7	31	1.26583	53.74	68.03
Junio	6.21	16.7	15.3	30	1.275	69.70	88.86
Julio	8.03	19.8	15	31	1.2916	87.90	113.54
Agosto	8.22	20.1	14	31	1.2055	89.72	108.17
Septiembre	6.72	17.6	12.5	30	1.0416	74.87	77.99
Octubre	5.17	14.8	11.1	31	0.9558	59.12	56.51
Noviembre	4.00	12.5	9.7	30	0.8083	46.96	37.96
Diciembre	2.08	8.1	9	31	0.775	26.00	20.15
I	56.73		a	1.36		ETP tot.	708.38

donde:

i es el índice de calor mensual: $i = (t/5)^{1.514}$

I es el índice de calor anual: $I = \sum i$

ε evapotranspiración potencial media en mm/día considerando meses teóricos de 30 días con 12 h diaria de sol: $\epsilon = 16 (10t / D)^a$

siendo $a = 675 \cdot 10^{-9} I^3 - 771 \cdot 10^{-7} I^2 + 1972 \cdot 10^{-5} I + 0.49239$

Considerando la duración real y el número máximo de horas según la latitud de la correspondiente zona se obtiene la ETP en mm/mes: $ETP = K \cdot \epsilon$

siendo $K = N/12 \cdot d/30$

d el número de días del mes y

N el número máximo de horas de sol según la latitud N43°

Tabla 3.- Cálculo de la ETP para el año 2010

Evapotranspiración Real

El cálculo de la ETR por el método de Le Turc tiene la siguiente expresión en función de la precipitación y la temperatura anual:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

donde:

ETR es la evapotranspiración real en mm/año

P es la precipitación en mm/año

$$L = 300 + 25t + 0,05t^2$$

T es la temperatura media anual en °C

El resultado de aplicar esta fórmula da lugar a un valor de ETR en los últimos 40 años (periodo 1971-2010) que oscila alrededor de 550 mm/año. Inferior como se puede observar al valor de ETP obtenido anteriormente. Para el año 2010, con una temperatura media de 13,6 °C y una precipitación total de 1128,5 mm, el resultado obtenido fue de 570,5 mm/año.

Esta variación se debe al hecho principal de que en épocas de altas temperaturas (por ejemplo en verano), en que la evapotranspiración potencial es más alta, la menor cantidad de precipitaciones hace que la evapotranspiración quede limitada a la reserva de agua utilizable existente.

Lluvia útil.

El cálculo de la evapotranspiración real permite estimar la lluvia útil mediante la ecuación:

$$Ll U = P - ETR$$

Los resultados calculados estiman para el año 2010 una lluvia útil de 558 mm/año. De los mismos, un porcentaje será susceptible de infiltración, en un primer momento como reserva útil (RU), y posteriormente si sigue su recorrido llegará al acuífero, mientras que el otro componente pasará por escorrentía (superficial o hipodérmica) a formar parte de los cursos de agua superficiales.

AÑO 2010	Valor
Evapotranspiración potencial (ETP) (mm/año)	708.4
Evapotranspiración real (ETR) (mm/año)	570.5
Lluvia Útil (mm/año)	558
Temperatura media anual (°C)	13.6
Precipitación anual (mm/año)	1128.5

Tabla .4.- Valores de ETP, ETR y Lluvia Útil calculados para el año 2010

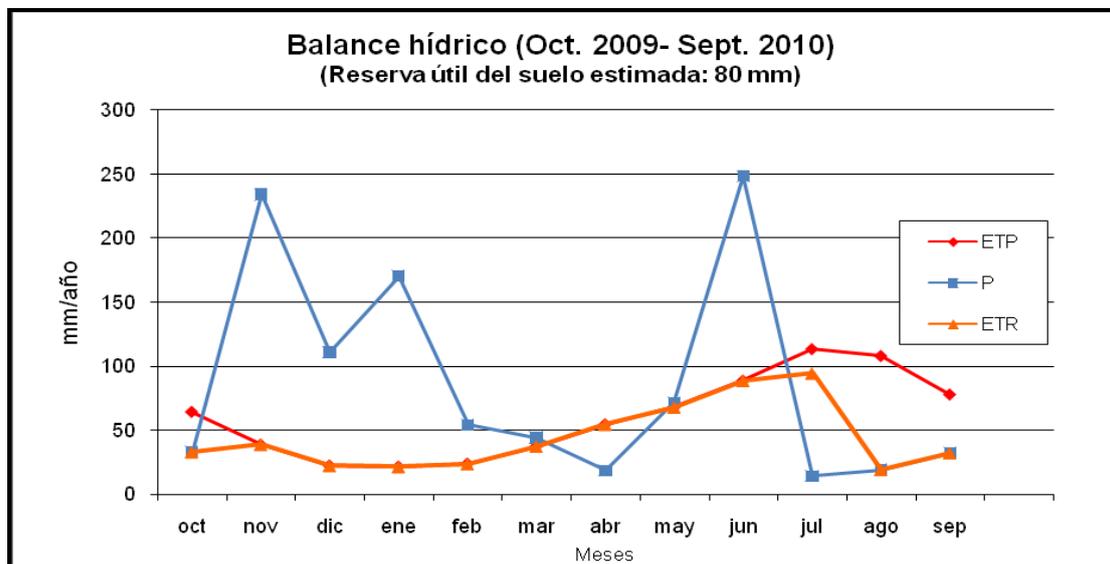


Fig. 27.- Balance hídrico del suelo calculado para el periodo Oct. 2009 – Sept. 2010.

5. MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se encuadra dentro de la cuenca mesozoica asturiana, más concretamente en materiales del Triásico Superior-Jurásico Inferior pertenecientes a la Formación Gijón.

La cuenca jurásica asturiana se extiende en una franja paralela a la línea de costa entre las ciudades de Gijón y Ribadesella, existiendo algunos afloramientos en Arnao, Avilés, Villabona, Sariego o al sur de la sierra del Suevo (Fig. 28).

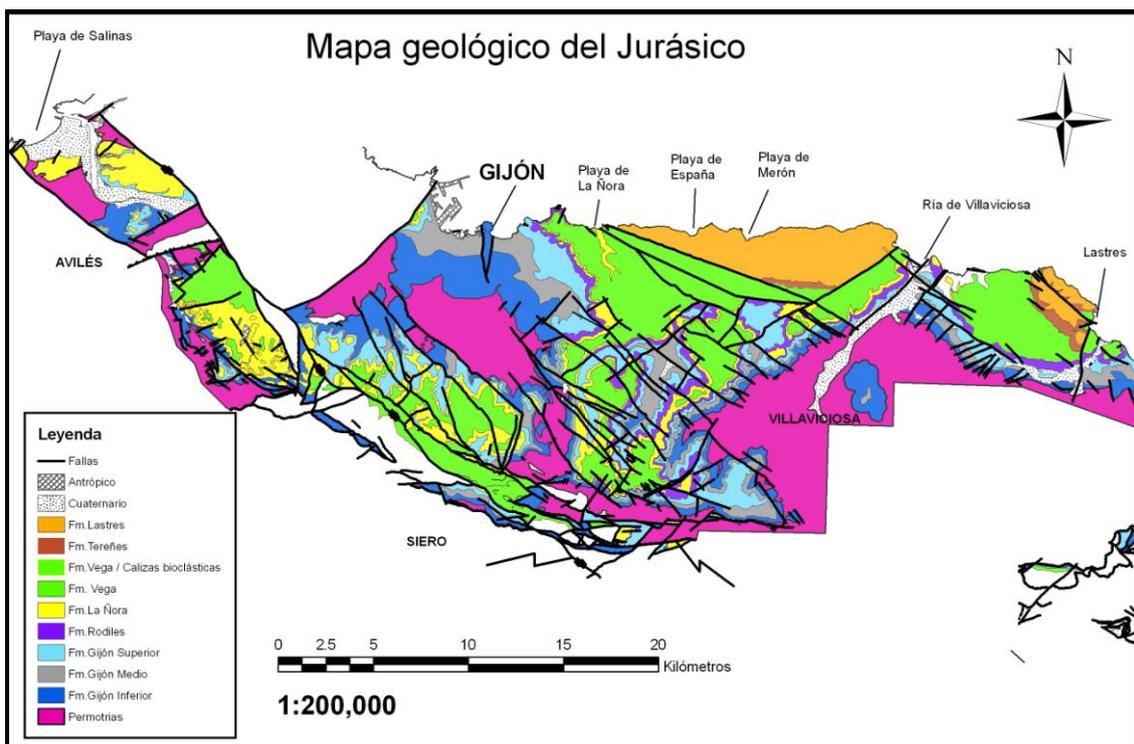


Fig.28.- Mapa geológico del Jurásico en Asturias.

Las primeras definiciones del Jurásico asturiano son realizadas en los años 60 por Almela y Ríos (1962) y Ramírez del Pozo (1969). Posteriormente Suárez Vega (1974) amplía en su conocimiento desde un punto de vista tanto estratigráfico como paleontológico.

Valenzuela et al. (1986) estudian las facies y la evolución paleogeográfica de los sedimentos jurásicos, estableciendo la división litoestratigráfica que se ha seguido desde entonces. Diferenciando así, un conjunto inferior marinos y carbonatado (Grupo Villaviciosa), y un conjunto superior, continental y terrígeno (Grupo Ribadesella).

González *et al.* (2004) profundizan en el conocimiento de la Fm. Gijón, subdividiéndola por primera vez en tres miembros diferenciados, cartografiables en toda la cuenca jurásica, y con importantes implicaciones hidrogeológicas.

Así mismo, otros trabajos recientes (Barrón *et al.*, 2002, 2006) han profundizado en esta subdivisión, permitiendo establecer dataciones, principalmente en el límite Triásico-Jurásico, y en el miembro inferior de la fm. Gijón.

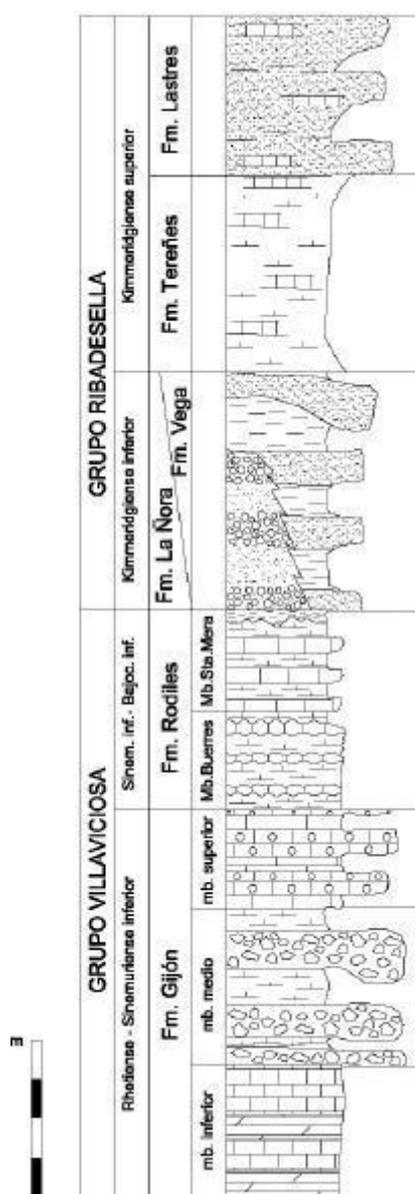
5.1. Estratigrafía

Valenzuela *et al.* (1986) dividen la sucesión jurásica en dos grandes secuencias sedimentarias superpuestas y separadas entre sí por una disconformidad, correspondientes cada una a un modelo sedimentario diferente. La inferior, marina, y de carácter carbonatado y margoso, corresponde al Grupo Villaviciosa e incluye las formaciones Gijón y Rodiles. La secuencia superior, continental y terrígena, se conoce como Grupo Ribadesella e incluye las formaciones La Ñora-Vega, y Tereñes y Lastres (Fig. 29).

El presente trabajo se centra en la Fm. Gijón, constituida por tres miembros (González *et al.*, 2004; Barrón *et al.*, 2006): Inferior (Miembro Solís); Medio (Miembro Fabares) y Superior.

Para el total de la formación la edad asignada abarca desde el Rhetiense al Sinemuriense inferior (Dubar *et al.*, 1963; Ramírez del Pozo, 1969; Barrón *et al.*, 2002; Aurell *et al.*, 2003; Barrón *et al.*, 2006).

Fig.29.- Columna estratigráfica del Jurásico de Asturias. (Modificado de Menéndez Casares *et al.*, 2004)



Características estratigráficas generales de la formación Gijón

La Fm Gijón (Valenzuela et al., *op. cit.*) se sitúa sobre arcillas grises oscuras, a veces rojizas, con finas intercalaciones dolomíticas y yesos, que forman la Serie de Transición -o *Tramo de transición* (Suárez Vega, 1969, 1974) o de *Arcillas marrones y pizarras negras con yeso y anhidrita* (Pieren et al., 1995)- perteneciente, al menos en su techo, al Rhetiense (Triásico Superior) (Martínez García et al., 1998; Barrón et al., 2002).

Esta formación Gijón, constituida por materiales carbonatados (calizas más o menos margosas y dolomías), cuya sedimentación se produjo en un mar cálido con una variada fauna (ammonites, belemnites, braquiópodos y reptiles, entre otros), había sido descrita parcialmente por Suárez Vega (1974). Posteriormente Valenzuela et al (1986) y Valenzuela (1988) diferencian y definen varios miembros: *Miembro de dolomías de Solis y Sotiello*, *Miembro de calizas magnesianas de Gijón* (que lateralmente pasan a las *Calizas tableadas de La Pedrera* y a las *Calizas del Pozo de los Lobos*) y *Miembro de calizas oolíticas de Deva*.

Le edad atribuida a la formación Gijón es Rhetiense-Sinemuriense inferior (Dubar et al., 1963; Barrón et al., 2002; Aurell et al., 2003; Barrón et al., 2006).

Características de los miembros inferior, medio y superior de la Fm. Gijón

A continuación se hace un compendio de las características estratigráficas generales de los tres miembros en que González et al. (2004) subdividieron la Fm. Gijón.

Miembro inferior (miembro Solis)

El miembro inferior (miembro Solis), está constituido por una sucesión de calizas, predominantemente *mudstone*, y dolomías de color gris claro, con finas intercalaciones de margas grises oscuras y, localmente a techo, brechas de colapso. Las calizas y dolomías, bien estratificadas y laminadas, presentan en ocasiones una acusada karstificación.

Su potencia es variable, oscilando entre los 50 m en la zona occidental (entre Avilés y Pinzales) y unos 90-100 m hacia el oriente (secor Pinzales-Ribadesella).

Miembro medio (Fabares-Barzana)

El miembro medio, denominado Fabares al oeste de Villaviciosa, y Barzana, al este de dicha localidad (Barrón et al., 2006) (Fig. 30), está formado por brechas de colapso, margas y lutitas grises oscuras y rojizas (con nódulos carbonatados y piríticos dispersos) entre los que se intercalan niveles de yesos, calizas y dolomías. Las calizas y dolomías presentan una extensión lateral limitada, debido a la fragmentación del estrato original causada por la disolución de los niveles de sulfatos, dando lugar a “brechas de colapso”. Estas brechas aparecen ordenadas en ocasiones en estratos granocrecientes o granodecrecientes como consecuencia del colapso de sucesiones carbonatadas estratocrecientes o estratodecrecientes respectivamente.

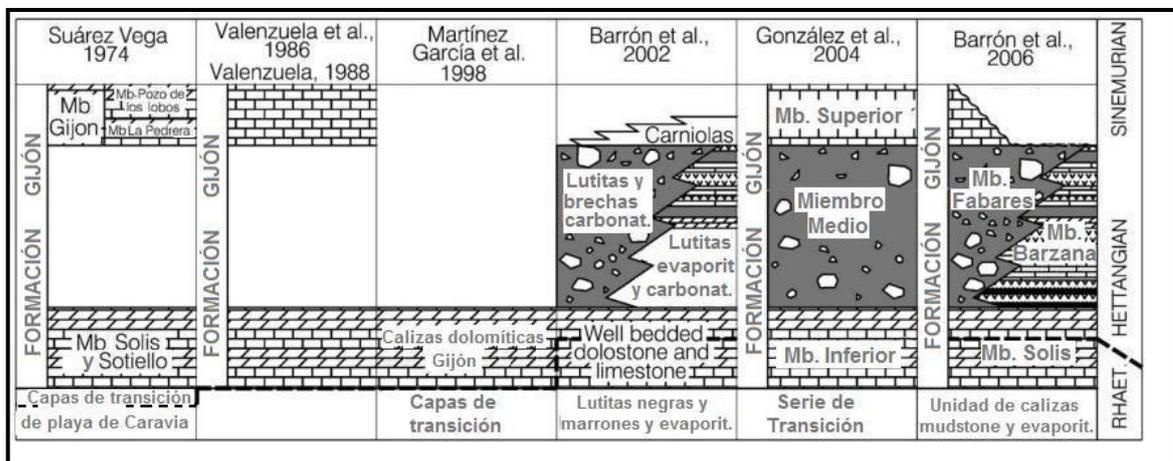


Fig.30.- Modificado de Barrón et al. (2006)

El espesor de este miembro presenta una enorme variabilidad, con un progresivo aumento hacia el Este, así aparece con espesores de unos 10-15m en la zona de Avilés, 30 m en la zona del río Pinzales, 60 m en la zona de Gijón y Peña Huergo , y 80-90 m en el sector más oriental, con buenos afloramientos en la zona de Fabares y en las playas de la Espasa y la Beciella.

Miembro superior

El miembro superior consiste en una alternancia de calizas *mudstone* de color gris oscuro (ocasionalmente con *birdseyes*), calizas *grainstone* oolíticas, calizas estromatolíticas y, hacia techo, ya en la zona de transición, calizas *packstone* bioclásticas y calizas *wackestone*. Los niveles estromatolíticos, asociados a menudo con grietas de desecación y tepees, pueden alcanzar a veces un cierto espesor , como en la

zona de El Rinconín (Gijón) Existen, además, algunos niveles de brechas con escasas extensión lateral y presencia local de calizas arenosas.

El espesor de este miembro, al igual que los anteriores, presenta considerables variaciones, debidas, al menos en parte, a procesos erosivos. En los alrededores de Avilés se ha estimado un espesor de unos 20-40 m. Más hacia el oriente, en Pinzales, tiene unos 45 m, en los valles de Fabares y el río España alcanza su máximo espesor llegando a 120 m; y en el sectores más oriental, en la zona comprendida entre la ría de Villaviciosa y el Arenal de Morís, disminuye hasta los 60 m.

5.2. Estructura

La cobertera pérmica y jurásica se dispone sobre los materiales del zócalo paleozoico con suaves buzamientos, formando pliegues de amplio radio. El rasgo más destacable del municipio es la deformación frágil, representada por una amplia red de fallas que afectan también al sustrato paleozoico.

Los materiales jurásicos en la zona de estudio presentan una configuración general con suaves buzamientos de 10-20° hacia el NE.

4.3.1. Pliegues

Corresponden a suaves ondulaciones, cuyos ejes presentan, por lo general, una orientación NO-SE, ortogonal a la orogenia varisca (Gutiérrez Claverol *et al*, 2002).

4.3.2. Fallas

Las fallas son los accidentes tectónicos más importantes y abundantes en la zona, si bien no resulta sencillo extraer conclusiones acerca de su formación, al ser, en mayor o menor medida, heredadas de la orogenia varisca, y removilizadas durante el Mesozoico y Terciario en diferentes episodios extensionales y compresivos.

Se pueden describir dos grupos de fallas: por un lado fallas NE-SO o longitudinales, y por otro lado fallas NO-SE o transversales.

Dentro de la zona de estudio cabe destacar la falla del Piles, de trazado NE-SO, donde el río del mismo nombre se amolda a su trazado en buena parte de su recorrido, y

el par de fallas de dirección aproximada N-S que dan lugar al levantamiento del miembro inferior de la Fm. Gijón en forma de *horst* formando el Cerro de Santa Catalina y su prolongación hacia el centro urbano por el paseo de Begoña.

5.3. Geomorfología

La ciudad de Gijón se encuentra situada en una ensenada-llanura litoral que se localiza en una depresión que se podría delimitar por dos zonas de rasas, una hacia el Oeste, hacia la zona del Cabo Peñas, y otra hacia el Este, entre Somió y la ría de Villaviciosa.

El abrigo del cabo Torres y el Cerro de Santa Catalina dieron lugar, respectivamente, a la ensenada del Musel y a un tómbolo en cuyo costado oriental se extiende la playa de San Lorenzo (Flor y Lharti, 2008).

Sobre buena parte de los materiales jurásicos se encuentran espesores más o menos variables de arcillas residuales, depósitos de marisma, depósitos de ría, depósitos de turba, depósitos de gravas y acumulaciones de arenas (estos últimos más restringidos al ámbito litoral) (Gutiérrez Claverol et al., 2002).

Por otra parte cabe destacar el importante sistema kárstico desarrollado en los carbonatos jurásicos, donde se han reconocido cavidades de varias decenas de metros. Entre ellas destaca el Güeyu Deva, que corresponde a la surgencia que da lugar al arroyo de Peña Francia y cuyo sistema kárstico ha sido explorado, detectándose varias galerías (la principal de más de 1000 m de longitud) y diez sifones (Manteca et al., 1998).

6. HIDROGEOLOGÍA

6.1. Rasgos generales

Se han distinguido en Asturias seis sistemas acuíferos (sin contar numerosos niveles subterráneos relacionados con los aluviones fluviales que se explotan mediante pozos de escasa profundidad). Estos seis sistemas acuíferos o unidades, estudiados dentro del marco global del “Plan Nacional de Investigaciones de Aguas Subterráneas” (PIAS) serían: U. Mesozoica de Gijón-Villaviciosa, U. Mesoterciaria de Oviedo-Cangas de Onís; U de la Franja Móvil Intermedia, U. de la Caliza de Montaña, U. Carbonatada Precarbonífera, y finalmente, Unidad Paleozoica (fisural) (IGME 1979-1981, 1982, 1984).

En el año 1988, coincidiendo con la elaboración de los Diferentes Planes Hidrológicos de todas las cuencas españolas, se delimitan “Unidades Hidrogeológicas”, concepto ya obsoleto, entendido como “uno o varios acuíferos agrupados a efectos de conseguir una racional y eficaz administración del agua”. En Asturias son nueve: 1.16 a 1.24 (IGME 1988, 1990, 1993, 2000).

El Sistema Acuífero Núm. 1: Unidad Mesozoica de Gijón-Villaviciosa, se dividía a su vez en los subsistemas:

- Subsistema 1A o unidad 1.19. Villaviciosa
- Subsistema 1B o unidad 1.20. Llantones.

En el año 2000, es aprobada la “Directiva Marco del Agua” (Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de acción en el ámbito de la política de agua) cuyo resultado es una modificación sustancial en la gestión del agua en toda la Unión Europea.

Se introduce un nuevo concepto, el de *Masa de Agua*, que se define como una “parte significativa y diferenciada de agua superficial, como un lago, un embalse, parte de un río, canal o tramo de agua costera; y, en el caso de un acuífero, un volumen claramente diferenciado de aguas subterráneas”.

De esta manera, y a la par que el seguimiento y control de las aguas subterráneas es traspasado del IGME a las respectivas Confederaciones Hidrográficas en el año 2001, se establece una nueva nomenclatura de las masas de agua.

De esta forma, la Unidad Hidrogeológica 1.19 Villaviciosa pasa a denominarse con el código **Masa de Agua 012.005 Villaviciosa**, recogida así en 2005 en el “Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las Cuencas Intercomunitarias” (Ministerio de Medio Ambiente, 2005)

6.2. Características de la Masa de Agua 012.005 Villaviciosa

La Masa de Agua 012.005, anteriormente denominada Unidad Hidrogeológica 1.19, Villaviciosa tiene una superficie de 297, 62 km², de los cuales afloran 294 (IGME, 1988, 1993). El balance hídrico de esta unidad estimado es de 183 hm³/año de entradas (178 hm³/año procedentes de las precipitaciones y 5 hm³/año procedentes de aportes de los ríos) y unas salidas de 11 hm³/año a manantiales, 34 hm³/año a los ríos, 8 hm³/año mediante bombeos y, finalmente, 8 hm³/año por otras vías. Se destaca así mismo la conexión con el Mar Cantábrico, de difícil contabilización (IGME, 1984).

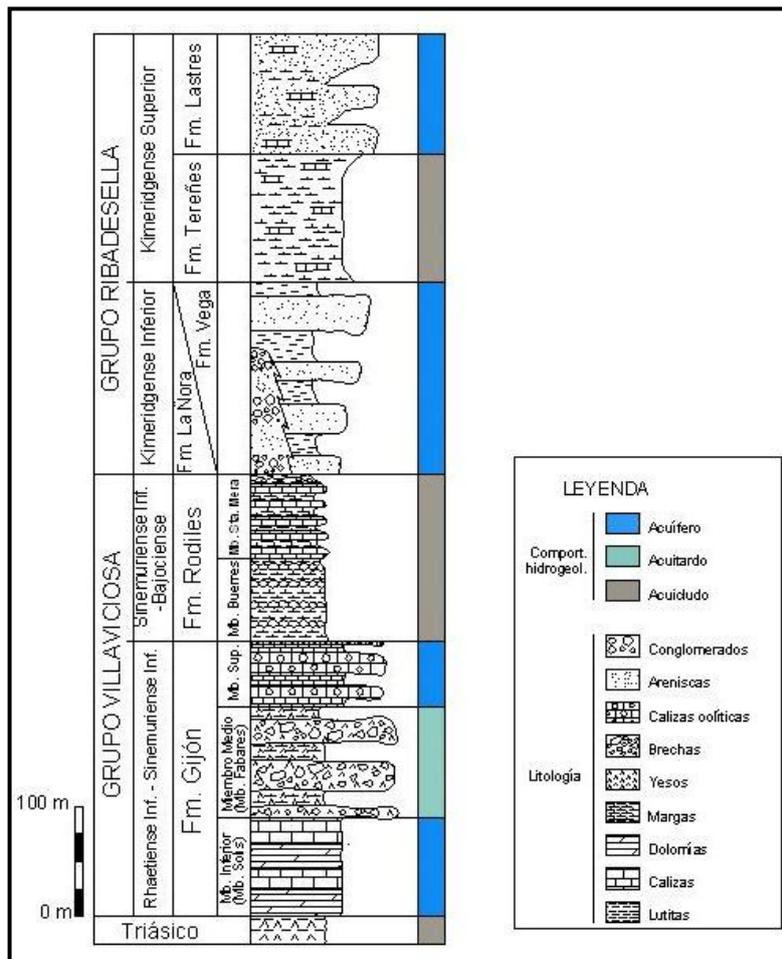


Fig.31- Columna estratigráfica del Jurásico con sus principales características hidrogeológicas.

Así mismo, en estas publicaciones se realiza una división de la unidad hidrogeológica en dos sistemas acuíferos diferenciados: un acuífero superior detrítico (areniscas, conglomerados y margas), de Edad Jurásico Superior y un espesor medio de unos 100 m; y un acuífero inferior carbonatado (calizas y dolomías), de edad Jurásico Inferior, y con un espesor variable de entre 160 y 280 m (Fig. 31).

Ortuño et al. (2004) realizan una agrupación de los principales niveles acuíferos por edad geológica. Dentro de las formaciones jurásicas distingue así un conjunto conocido como *Jurásico detrítico*, de escasa importancia desde el punto de vista hidrogeológico, constituido por niveles de conglomerados (cantos silíceos en matriz areno-limosa de la Fm. La Ñora) y por areniscas (cuarciarenitas de la Fm. Vega y areniscas de cemento carbonatado de la Fm. Lastres); y un *Jurásico calcáreo*, de mayor interés, donde destacan las calizas y dolomías de la Fm. Gijón que presentan una elevada permeabilidad desarrollada fundamentalmente por fisuración y karstificación.

6.3. El acuífero inferior carbonatado

El acuífero inferior de la Masa de Agua 012.005, corresponde a los niveles de calizas y dolomías de la formación Gijón. Se trata de un sistema acuífero en su mayor parte confinado, con valores de transmisividad y coeficientes de almacenamiento con valores importantes (Martínez-Fresneda Mor, 1980), aunque muy variables, relacionados con los procesos de karstificación, fracturación y presencia de horizontes arcillosos intercalados.

Tradicionalmente, este acuífero inferior se había estudiado y explotado como si de un único sistema se tratara, pero la diferenciación en tres miembros por Menéndez Casares *et al.* (2004) implica, desde el punto de vista hidrogeológico, la existencia de un acuífero multicapa en la Fm. Gijón, donde el miembro intermedio constituye en conjunto un acuitardo situado entre los dos niveles acuíferos, superior e inferior, con importantes implicaciones hidroquímicas asociadas a la presencia de yesos que dan lugar, en ocasiones, a una importante concentración de sulfatos en el acuífero inferior.

Así, los dos acuíferos carbonatados presentan, en algunas zonas, valores de conductividad eléctrica muy variables y, en ocasiones muy elevados, que son la manifestación de un elevado contenido en sulfatos. Estos valores anómalos se

encuentran principalmente en el acuífero inferior, limitado a muro y techo por materiales con abundantes intercalaciones de yesos (Fig. 32).

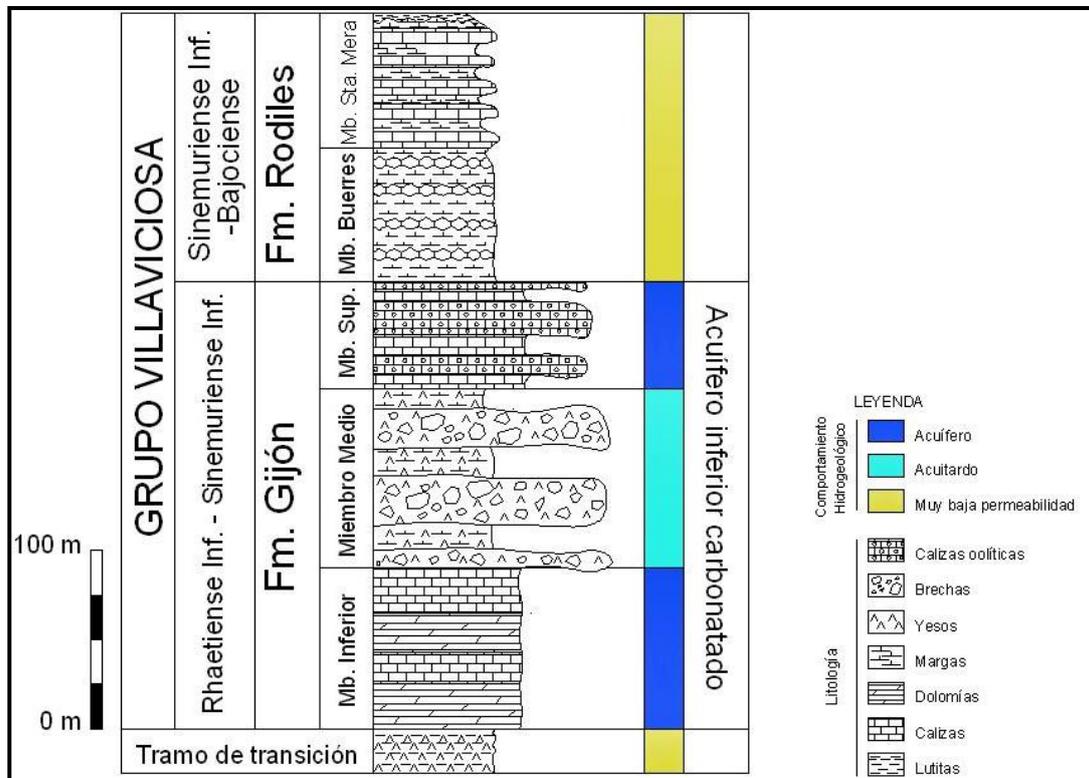


Fig.32.- Columna estratigráfica del Grupo Villaviciosa. En azul se representan los niveles acuíferos de la Fm. Gijón, así como los prácticamente impermeables de la Fm. Rodiles y el Tramo de Transición.

6.3.1. Acuífero inferior de la Fm. Gijón

El *acuífero inferior* de la Fm. Gijón (miembro inferior o miembro Solís) se dispone sobre un tramo litológico poco permeable o impermeable, correspondiente a las capas finas de dolomías, yesos y lutitas grises y rojas de la Serie de Transición. En este contacto se sitúan numerosos manantiales.

Tanto a muro como a techo existen numerosas intercalaciones de capas de yesos que cargan en sulfatos las aguas de este acuífero inferior, lo que deteriora la calidad de las mismas, que pueden llegar a alcanzar niveles de conductividades de 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Así mismo, la circulación de aguas da lugar a una disolución de algunos niveles yesíferos, lo que permite la aparición de algunas fuentes por debajo del contacto con la Serie de Transición.

6.3.1.1. Extensión y límites

El acuífero inferior de la Fm. Gijón tiene una extensión (en su parte correspondiente a la Masa de Agua 012.005) de 226,72 km², de los cuales afloran unos 32,23 km² (Fig. 33).

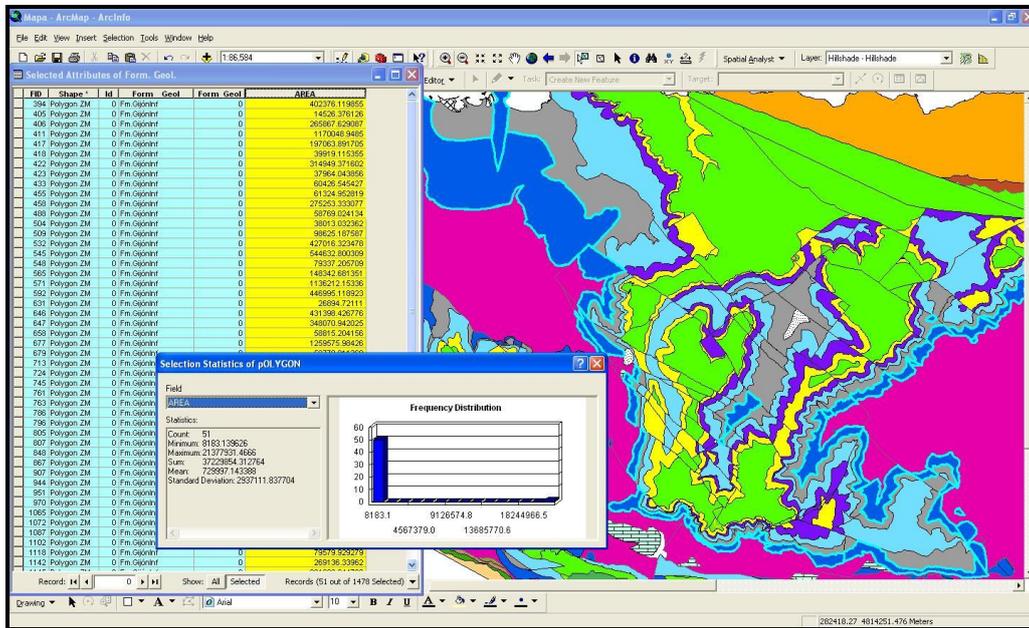


Fig.33.- Cálculo de la superficie aflorante de la Fm. Gijón Inferior mediante suma de polígonos en ArcMap.

Los límites del mismo corresponden a lo que podría describirse como un triángulo invertido, con su vértice más occidental en la zona de Jove-El Musel, al oeste de la ciudad de Gijón y su límite oriental en la Ría de Villaviciosa, extendiéndose hacia el sur hasta el municipio de Sariego, en la zona de Collada de Fumarea y el Alto de la Campa.

6.3.1.2. Recarga y descarga

Recarga

Con la medida del área aflorante y la cantidad de lluvia útil es posible hacer una estimación de la recarga anual del acuífero. Para un área de 32.23 km² y una lluvia útil anual de 550 mm/año, la recarga directa se ha estimado en unos **17hm³/año**.

Hay que destacar que este es un valor de referencia potencial, susceptible de grandes modificaciones en función de la capacidad de infiltración del terreno, la escorrentía, la distribución de la precipitación, etc.

Sondeos hidrogeológicos de la EMA

Del acuífero inferior se nutren algunos de los sondeos hidrogeológicos de la Empresa Municipal de Aguas. A continuación se hace un repaso a los mismos, a sus características y a sus problemáticas (Mapa de situación en anexos).

Hay que resaltar que la totalidad de estos sondeos se encuentran sobre el Miembro Medio de la Fm Gijón, alcanzando el Miembro Inferior a profundidades variables de entre 60 y 80 m.

- **S-8 Deva (UTM: X= 289437; Y= 4821193; Cota Z= 36 m.s.n.m)**

Ejecutado en el año 1976, tiene una profundidad de 92 m. Estaba equipado con una bomba con capacidad de hasta 40 l/s, pero en la actualidad está abandonado y oculto por una tapa de alcantarilla bajo la senda del Arroyo de Peña Francia.

- **S-10 Rinconín (UTM: X= 289444; Y= 4820616; Cota Z= 44 m.s.n.m.)**

Realizado en el año 1977, tiene una profundidad total de unos 100 m. Equipado con bomba con capacidad de bombeo de 40-50 l/s. Situado en el margen del Arroyo de Peña Francia, su nivel freático igual al del río, así como los problemas causados en épocas de estiaje al arroyo sugieren una conexión directa con el mismo lo que parece consecuencia de una planificación y ejecución inadecuadas. Actualmente no se utiliza.

- **S-11 Güeyu (UTM: X= 289625; Y= 4820369; Cota Z= 47 m.s.n.m.)**

Situado a unos 300 m del anterior, su construcción data del año 1978. Tiene una profundidad de unos 100 m y su bomba una capacidad de unos 50 l/s. Al igual que el sondeo del Rinconín, está situado junto al arroyo de Peña Francia y ha ocasionado problemas al mismo. No se utiliza en la actualidad.

- **S-12 Cefontes (UTM: X= 288817; Y= 4821233; Cota Z= 40 m.s.n.m.)**

Efectuado en el año 1978, tiene una profundidad de 112 m. Cuenta con bomba situada a 98 m de profundidad. Los caudales de explotación se sitúan entre 38 y 50 l/s. En la actualidad no se extrae agua. El nivel piezométrico estático medido sufre oscilaciones entre 5 y 9 m de profundidad respecto a la cota de referencia.



Fig. 34.- Sondeos de a) (izda.) La Ería; y b) (dcha.) Cefontes.

- **S-13 La Ería (UTM: X= 288893; Y= 4820222; Cota Z= 68 m.s.n.m.)**

Realizado en el año 1979 con una profundidad inicial de 155 m, fue reprofundizado en 1980 hasta alcanzar la cota actual de 192 m. La bomba está situada a más de 100 m de profundidad y su explotación actual mantiene una tasa de unos 15 l/s. Los niveles estático y dinámico fueron medidos durante el ensayo de bombeo realizado en abril de 2011. El primero (N.E) se situó a 21,43 m de profundidad (respecto a la superficie) y el nivel dinámico (N.D.) (al entrar en estado estacionario con un caudal de explotación de 15–16 l/s) en 103,28 m.

- **S-10-Bis Rinconín Bis (UTM: X= 289104; Y= 4820564; Cota Z= 53 m.s.n.m.).**

Ejecutado en el año 1979, es utilizado como pozo de control y piezómetro. No está equipado con bomba. Su profundidad es de 122 m (pudo ser comprobada durante la testificación geofísica). Actualmente se encuentra en la parcela del Campo de Golf de Deva.

El único pozo activo de la EMA en la actualidad (La Ería), extrae una cantidad de 0,5 hm³ de agua al año (según datos de la EMA). Se tiene constancia de otros pozos privados de poca capacidad que se surten de agua del miembro inferior.

Manantiales

De entre las fuentes contabilizadas pertenecientes al miembro inferior de la formación Gijón, la gran mayoría se encuentran al sudeste del municipio, en las parroquias de Santurio, Caldone, Fano y Baldornón. Así mismo existen fuentes en las parroquias de Bernueces y en el mismo centro urbano, donde destaca la fuente de La Fontica, en el cerro de Santa Catalina, actualmente sin agua durante algunos meses del año.

Se trata de manantiales con caudales variables, de entre 0,1 y 1 l/s. Destacan por su caudal la fuentes del Lavadero de Viacao (en Santurio), l'Martir y la Requexada (en Caldone), El Ferrón (en Bernueces) y la fuente de la carretera de Granda (Fig. 35).

Atendiendo a sus características químicas sus aguas presentan conductividades altas, siendo frecuente que sean mayores de 700 µS/cm, y, en ocasiones, superiores a 1000 µS/cm, lo que se relaciona con la alta cantidad de sulfatos asociados a la presencia de capas de yeso hacia la base y el techo del miembro inferior (Tabla 5).



Fig.35.- Fuentes de El Ferrón (izda.), El Martir (arriba dcha.) y ctra. de Granda (Roces) (abajo dcha.)

La descarga del miembro inferior por medio de manantiales se ha estimado atendiendo a los caudales medidos y a sus variaciones a lo largo del año. De tal modo, se ha calculado que entre 1 y 1,5 hm³ son drenados cada año del acuífero del miembro inferior (perteneciente a la Masa de Agua 012.005) en fuentes del municipio de Gijón.

Nombre	Ref.	μS/cm	pH	Caudal aprox (l/s)
Fuente Salientes	BA-03	371	7.67	-
Fuente La Mata	BA-05	491	6.84	0.05
Fuente La Campa	BA-06	213	7.26	0.01
Fuente El Ferrón	BE-1	724	7.1	0.8
Lavadero ctra. de Granda	BE-2	691	6.98	0.2
Fonte'l Gueyu	CL-01	640	8.77	0.15
Fonte Villanueva	CL-02	552	8.68	0.26
Fonte la Requexada	CL-05	620	8.23	1
Fonte Santa	CL-07	631	7.93	0.4
Fonte'l Martir	CL-08	778	7.15	1
Fonte la Gabadoria	CL-17	609	8.52	0.1
Fonte la Terrona	CL-22	671	8.15	0.025
Fuente	GI-1	1136	7.48	2.5
Fuente los Gochos	SA-2	712	7.68	0.08
Lavadero de Viacao	SA-5	594	7.9	2.3
Fonte la Pipa	SA-6	599	8.07	0.15
Fuente Jano	VE-6	738	7.73	0.05
Fuente la Peñona	VG-11	668	7.75	0.3

Tabla 5.- Manantiales del acuífero inferior de la Fm. Gijón en la masa de agua 012.005

6.3.1.3. Parámetros hidrogeológicos. Ensayo de bombeo

Para la obtención de los parámetros hidrogeológicos del acuífero inferior se realizó un ensayo de bombeo aprovechando los pozos existentes pertenecientes a la Empresa Municipal de Aguas.

Así se seleccionó un pozo que sería el utilizado como pozo de bombeo nº13 (Sondeo La Ería) que cuenta con bomba en buen estado y en funcionamiento. Como piezómetro fijo de medida puntual se utilizó el sondeo nº10-bis (Rinconín-bis), situado 400 m al NNE del primero. Así mismo se realizaron medidas en los sondeos S-12 (Cefontes) y S-10 (Rinconín), situados a 1015 y 685 m respectivamente del pozo de bombeo (Figs. 36 y 37).

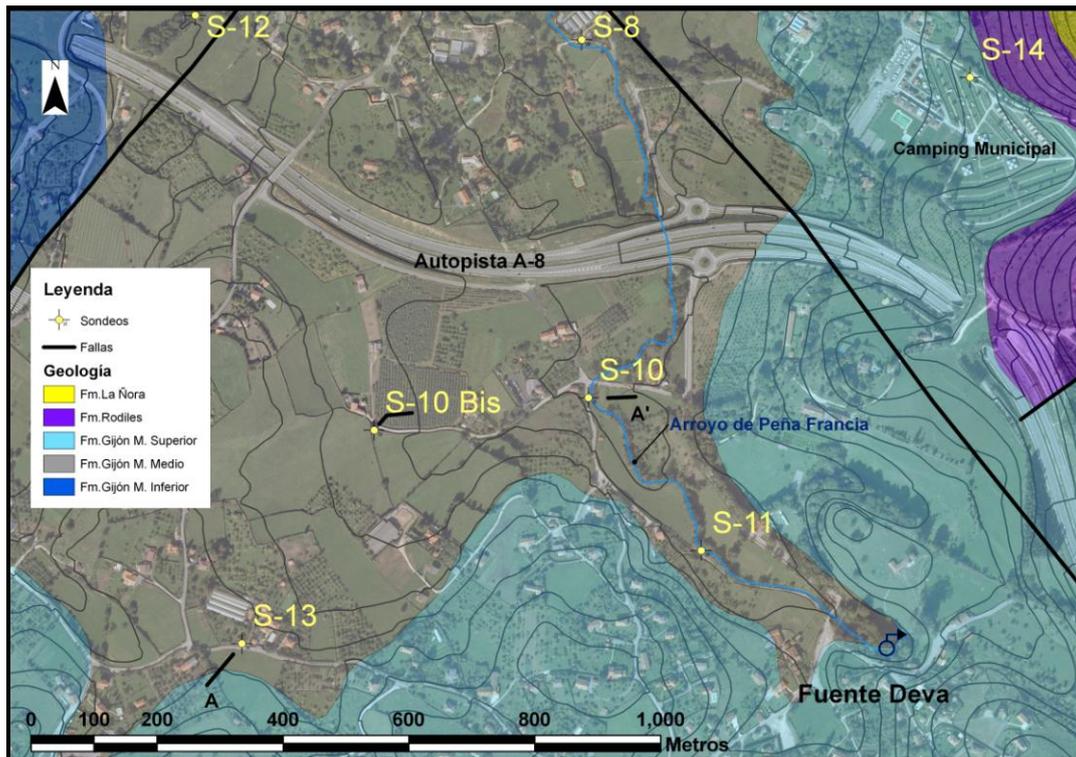


Fig. 36.- Situación de los pozos en el ensayo de bombeo del acuífero inferior

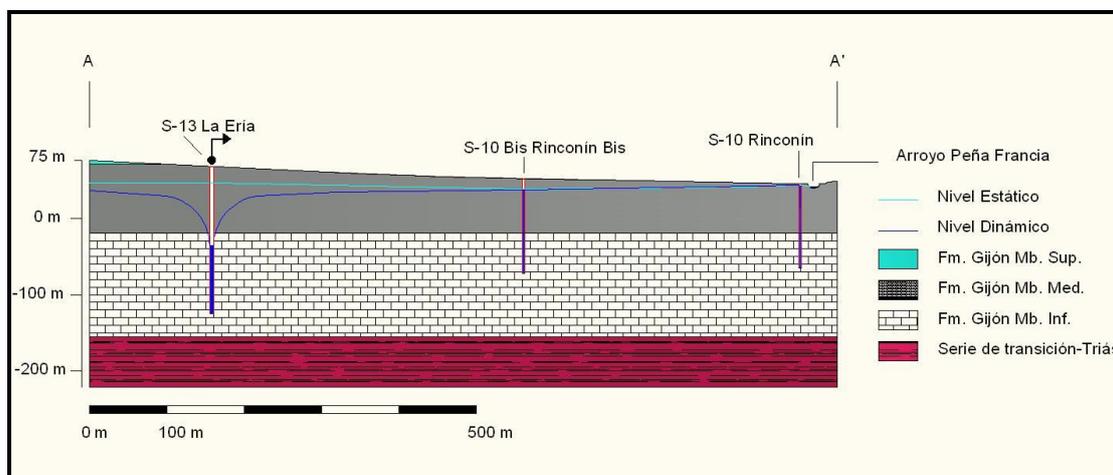


Fig. 37.- Corte geológico A-A' de los sondeos del ensayo, mostrando los niveles estático (con la bomba parada) y dinámico (con la bomba funcionando en régimen permanente).

Una vez se inicia el ensayo se realizan medidas puntuales (Tabla 6 y Fig. 38) en el pozo de bombeo y en el piezómetro a intervalos de tiempo que permitan su representación en un gráfico semilogarítmico (Fig. 39).

Tiempo (min)	Descenso (m)	Tiempo (min)	Descenso (m)
0	21.43	90	58.87
1	24.78	105	61.44
2	25.49	120	63.42
4	27.91	160	67.45
6	29.63	190	69.85
8	31.58	200	70.62
10	33.42	240	72.98
15	37.24	270	74.76
20	40.41	300	76.41
25	42.82	420	80.46
30	44.95	460	81.47
40	48.36	500	82.21
50	50.94	600	83.45
60	53.39	1525	95.58
70	55.49	2000	97.83
80	57.36	3000	103.28

Tabla.6.- Medidas de los descensos (respecto a la superficie) registrados en el sondeo de la Ería durante el ensayo de bombeo.

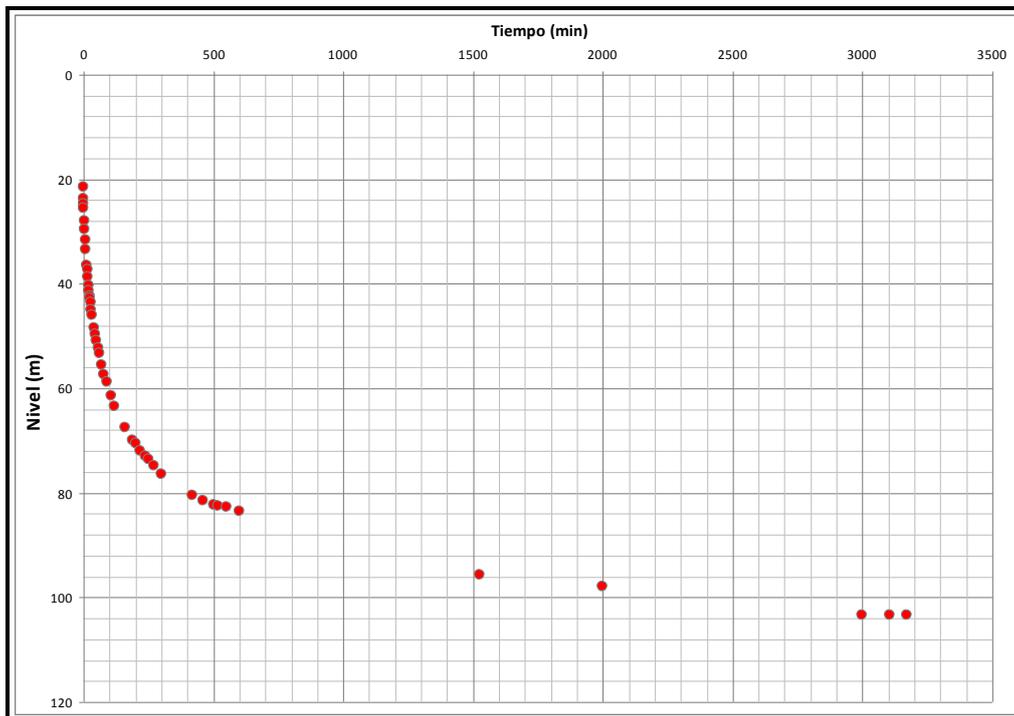


Fig. 38.- Gráfico de niveles respecto a la superficie frente al tiempo para el ensayo de bombeo de La Ería.

La interpretación del ensayo de bombeo se realiza mediante la fórmula de Cooper y Jacob (1946). Esta fórmula está basada a su vez en la fórmula de Theis (1935), de manera que da mayor importancia a los tiempos más grandes, eliminando por completo los descensos medidos para tiempo pequeños, que son los expuestos a mayor número de errores.

Partiendo de la idea de que si se representan los datos de los descensos frente al tiempo en un papel semilogarítmico, se observa (Fig. 39) que si se desprecian los primeros datos, el resto se disponen a lo largo de una recta, sobre la cual es posible obtener la pendiente m y un tiempo t_0 .

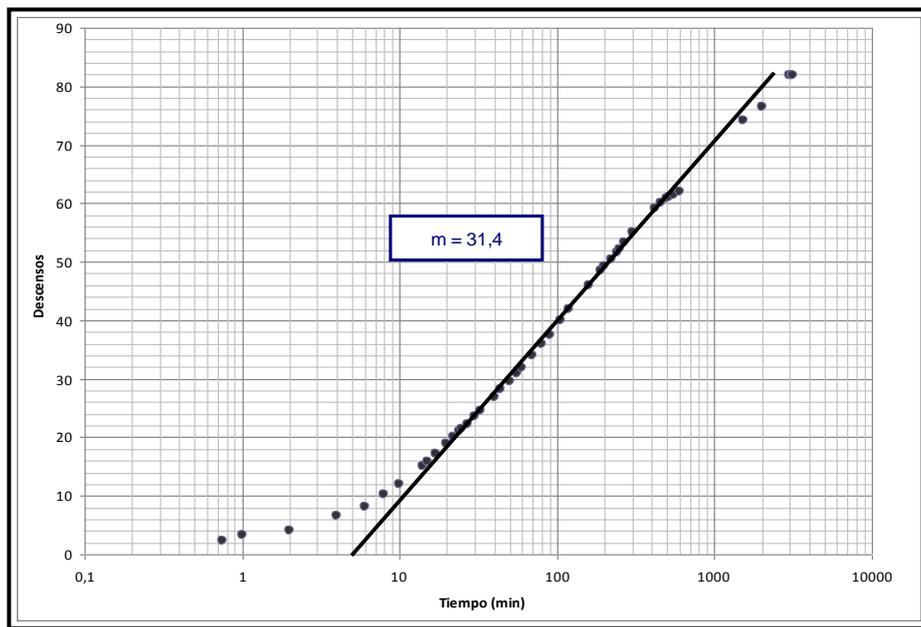


Fig. 39:- Gráfico semilogarítmico de descensos frente al tiempo de bombeo en el sondeo S-13 La Ería.

La fórmula en términos de logaritmos decimales es:

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25Tt}{r^2 S} = 0.183 \frac{Q}{T} (\log t + \log \frac{2,25 T}{r^2 S})$$

Por analogía, la pendiente permite calcular la transmisividad mediante:

$$T = 0.183 \frac{Q}{m}$$

La pendiente (m) se calcula seleccionando un ciclo logarítmico:

$$m = \frac{s_2 - s_1}{\log(t_2) - \log(t_1)}$$

Dado que el caudal es ligeramente variable a lo largo del ensayo especialmente para las primeras horas ya que posteriormente el caudal de bombeo se estabiliza., (Fig. 40) se han realizado diversos ajustes mediante ecuaciones lineales.

Para simplificar se ha asumido un caudal medio de 20 l/s en las primeras cinco horas, que entra en el rango de tiempos utilizado, y no difiere demasiado de las otras soluciones obtenidas.

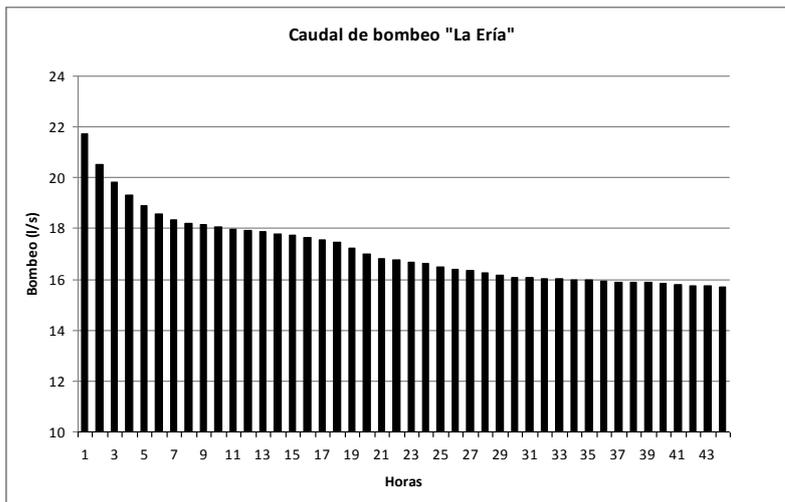


Fig.40.- Gráfico que muestra las medias horarias de los valores de caudal en l/s extraídos durante el ensayo de La Ería.

. De esta forma los cálculos realizados por el método de Jacob ofrecen valores de transmisividad variables entre 10 y 11 m²/día.

$$T \approx 10,5 \text{ m}^2/\text{día}$$

La conductividad hidráulica se obtiene de la fórmula $T = k \cdot b$, donde T es la transmisividad obtenida con anterioridad, K es el valor de conductividad hidráulica y b es el espesor del acuífero (estimado en 100 m en afloramientos cercanos).

$$k \approx 1,05 \text{ m/día}$$

$$k \approx 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

Valoración del ensayo: Si bien las condiciones del ensayo no eran las ideales (desconocimiento de los tramos de entubado con rejilla, caudal variable durante el ensayo, incertidumbre sobre la ubicación del contacto entre miembros geológicos) el hecho de que los valores de descenso se puedan expresar en papel semilogarítmico y

que estos se aproximen a la recta de calibración, hace que los resultados se pueden tomar como válidos, aunque conservadores. De tal manera, que en mejores condiciones de ensayo (con pozos que atraviesen todo el miembro acuífero, con un entubado conocido y a un bombeo a caudal constante) los valores obtenidos, y por tanto más aproximados a los reales, de transmisividad y conductividad hidráulica serán mayores que los calculados.

Este valor de entre 1 y 10 m/día hace que se pueda clasificar hidrogeológicamente a este acuífero como de tipo medio-bueno.

La variación de los niveles en los pozos utilizados como piezómetros ha sido tenida en cuenta pero no ha sido utilizada en los cálculos debido a su poca credibilidad y a la falta de seguridad de que esté asociada al bombeo del ensayo.

Durante el ensayo de bombeo se recogió una muestra de agua para su posterior análisis cuyos resultados se muestran a continuación (Tabla 7):

Análisis químicos		Metales	
Aniones	Concentración (ppm)	Nombre	Concentración (ppb)
Fluoruro	0.080	Al	121.7
Cloruro	20.016	As	< 8
Nitrito	-	Cd	< 4
Bromuro	0.108	Cr	< 10
Nitrato	1.644	Cu	< 0,09 (ppm)
Fosfato	0.654	Fe	91.7
Sulfato	18.224	Mn	< 15
Cationes	Concentración (ppm)	Ni	< 4
Litio	-	Pb	< 5
Sodio	10.647	Sb	< 4
Potasio	0.820	Se	< 5
Magnesio	5.639	Zn	< 4
Calcio	56.393	Hg	<0,001

Tabla.7.- Concentración de aniones, cationes y metales pesados de la muestra de agua obtenida durante el ensayo de bombeo en el sondeo de La Ería.

6.3.2. Acuífero superior de la Fm. Gijón.

El acuífero superior de la Fm. Gijón (miembro superior) está separado del acuífero inferior por el miembro intermedio de dicha unidad y tiene por encima la Fm. Rodiles, cuando esta ha sido preservada de la erosión. Las fuentes de este acuífero superior presentan menores caudales, así como valores más bajos de conductividad (<600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y con un contenido en sulfatos nunca superior a 50 mg/l (Ortuño et al., 2004; Menéndez Casares et al., 2004).

6.3.2.1. Extensión y límites

El acuífero superior de la masa de agua 012.005 presenta una extensión de 169,14 km^2 , de los cuales afloran unos 33,06 km^2 .

Su extensión es menor que la del acuífero inferior y sus límites oriental y meridional son similares, sin embargo su límite occidental se sitúa en la zona de Somió-Cabueñes-Deva, al este de la ciudad de Gijón.

6.3.2.2. Recarga y descarga

Recarga

El valor estimado de recarga para el acuífero superior (33,06 km^2) en función de la lluvia útil (550 mm/año) es de **18 $\text{hm}^3/\text{año}$** .

Al igual que lo señalado en el apartado correspondiente a la recarga del acuífero inferior, este es un valor orientativo, cuyas variaciones son función de diversos factores de compleja cuantificación.

Sondeos hidrogeológicos de la EMA

La EMA posee 6 sondeos que conectan con el acuífero superior. Cuatro de ellos (Molinín, Pecuaría, Suncia e Infanzón Alto) se sitúan directamente sobre este acuífero, mientras que los sondeos de Ñales e Isabel II se ubican sobre los materiales de la formación Rodiles, de manera que tienen que atravesar estos para captar las aguas del acuífero carbonatado, de ahí su mayor profundidad.

- **S-3 Molinín (UTM: X= 289267; Y= 4822190; Cota Z= 34 m.s.n.m.)**

Es el sondeo más antiguo que la EMA mantiene en explotación. Data del año 1969 y su profundidad es cercana a los 80 m. El radio de la entubación es de 15 cm. Actualmente se utiliza con caudales de bombeo de 20-25 l/s. (Fig. 41)

En este sondeo se llevó a cabo el ensayo de recuperación y bombeo para determinar los parámetros del acuífero superior. Al iniciar el ensayo de recuperación la bomba estaba activa con un caudal constante de 22 l/s y el nivel piezométrico (nivel dinámico) se midió en 30,31 m respecto a la superficie. Una vez recuperados los niveles se volvió a medir, obteniendo una profundidad del nivel freático (nivel estático) de 13,62 m.

En ocasiones de altas precipitaciones y en que este sondeo se encuentra parado las aguas subterráneas ocasionan problemas en los garajes del cercano parque tecnológico.



Fig. 41.- Imágenes de los sondeos de Molinín (izda) e Infanzón (dcha)

- **S-4 Pecuaría (UTM: X= 288360; Y= 4822729; Cota Z= 18 m.s.n.m.)**

Ejecutado en el año 1970, su profundidad es de 74 m. Su bomba tiene una capacidad de 50-60 l/s, aunque actualmente no está en explotación. Está equipado con un piezómetro de presión situado a 55 m de profundidad conectado por radio lo que permite conocer el nivel en todo momento.

Durante el ensayo de recuperación y bombeo el nivel freático se mantuvo invariable a 7 m de profundidad. Datos del registro continuo muestran que en épocas de lluvias abundantes el nivel freático se llega a situar a escasos 2 m de la superficie topográfica (Fig. 42).

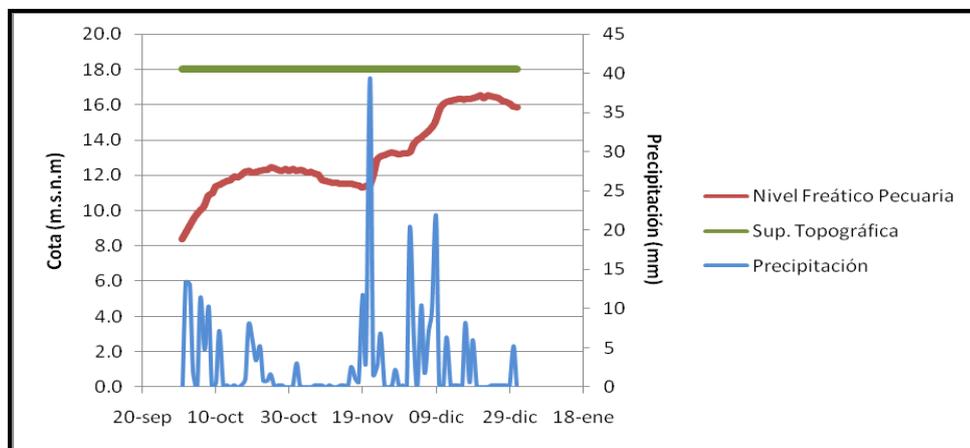


Fig. 42.- Profundidad del nivel freático (en rojo) respecto a la sup. topográfica (en verde) y relación con el régimen de precipitaciones (azul) para el periodo octubre-diciembre del año 2006.

- **S-5 Suncia (UTM: X= 288822; Y= 4822866; Cota Z= 24 m.s.n.m.)**

Este sondeo, realizado en el año 1973 junto a la Carbayera de Candanal tiene una profundidad de 127 m (medidos durante la testificación geofísica). Contó con una bomba con capacidad de hasta 50 l/s que en la actualidad está desmontada.

Este pozo se utilizó como piezómetro durante el ensayo de bombeo, registrándose el nivel freático estático a 15,4 m de profundidad y sufriendo variaciones de pocos centímetros, hasta alcanzar el nivel dinámico cerca de los 15,6 m de profundidad.

- **S-7 Infanzón Alto (UTM: X= 289818; Y= 4821504; Cota Z= 45 m.s.n.m.)**

Con una profundidad de 110 m y una bomba con capacidad de 50-60 l/s, se puso en explotación en enero de 1975 (Fig. 41).

El nivel estático fluctúa a profundidades de unos 10 m respecto a la cota de referencia. En la actualidad se encuentra parado, pero en los últimos años ha sido uno de los sondeos utilizados con mayor regularidad por la Empresa de Aguas.

- **S-9 Isabel II (UTM: X= 290315; Y= 4821965; Cota Z= 65 m.s.n.m.)**

Ejecutado en el año 1975. Su profundidad es de 176 m y la bomba, con capacidad de hasta 38 l/s, está situada a 96 m de profundidad. Está situado junto a la fuente del mismo nombre, recientemente restaurada.

En ausencia de bombeo el nivel estático se encuentra a profundidades de entre 20 y 25 m respecto a la superficie. Medidas históricas, con bombeo de 15-20 l/sitúan el nivel dinámico a unos 100 m de profundidad, lo que sugiere que el sondeo atraviesa un gran espesor de Fm. Rodiles hasta alcanzar el acuífero carbonatado de la Fm. Gijón. En la última década no se ha puesto en funcionamiento.

- **S-14 Ñales (UTM: X =290049; Y=4821134; Cota Z=67 m.s.n.m).**

Es el sondeo de más moderna construcción entre los que cuenta la EMA. Data del año 1982 y tiene una profundidad de 163 m (durante la testificación geofísica únicamente se pudieron descender 120 por problemas en la entubación.

Contaba con una bomba con capacidad de hasta 40 l/s que fue desmontada a principios del año 2011.

Basándose en los resultados de la testificación geofísica se encuentra sobre materiales de la Fm. Rodiles. El nivel piezométrico se midió a 25 m de profundidad. Contaba con un piezómetro de presión cuyos datos históricos muestran variaciones grandes del nivel piezométrico relacionados con la actividad del sondeo de Infanzón Alto.

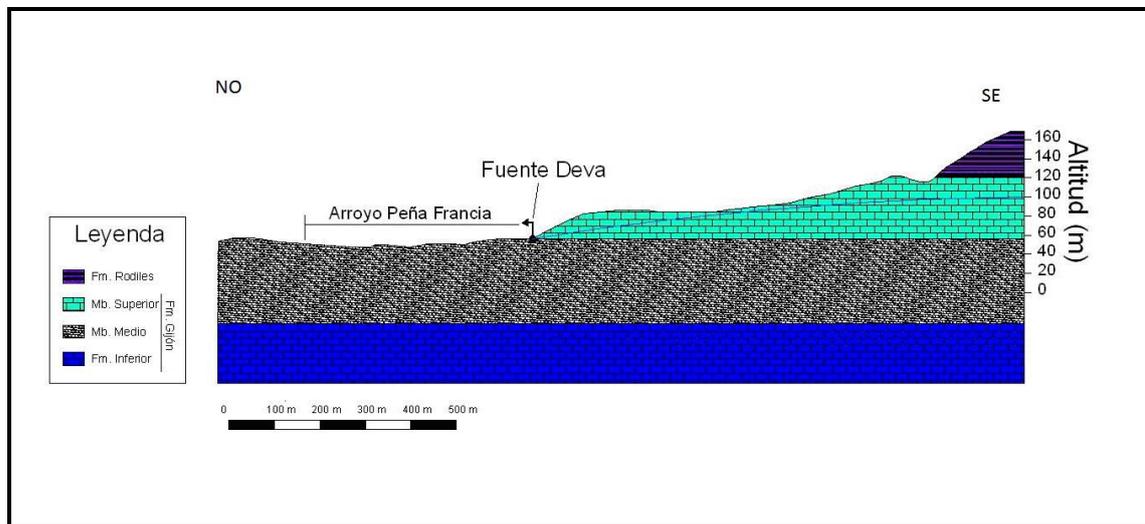
Manantiales

La Fuente Deva es el principal (y prácticamente el único de verdadera importancia) manantial que drena el acuífero superior (Fig. 43) de la formación Gijón en su sector correspondiente a la masa de agua 012.005 dentro de los límites del concejo. Es el origen del arroyo de Peña Francia.

Situado a 48 m.s.n.m. es el drenaje de un sistema kárstico que consta de galerías de hasta 1000 m de longitud y más de nueve sifones (González Fernández et al., 2006) que recibe las aguas de una superficie de unos 18 km².

Los caudales son muy variables, con valores de hasta varios m³/s, aunque su caudal estimado medio es de 296 l/s (IGME, 1993). En épocas de estiaje los caudales pueden descender hasta 10 l/s. Existe una estación de aforo situada sobre el cauce del arroyo en estado de semiabandono a unos 200 m del manantial.

En 1993, la empresa IDRENA realizó para el IGME un estudio de la conexión de la fuente Deva con los sondeos cercanos de la EMA, obteniendo la conclusión de que no había conexión entre el manantial y el acuífero del que se surtía la Empresa de Aguas.



Los valores de conductividad son inferiores a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un pH aproximado de 8. El agua de la fuente actualmente es no potable por contaminación orgánica. Se recogió una muestra para realizar análisis de cationes y aniones cuyos resultados se muestran a continuación (Fig. 44):

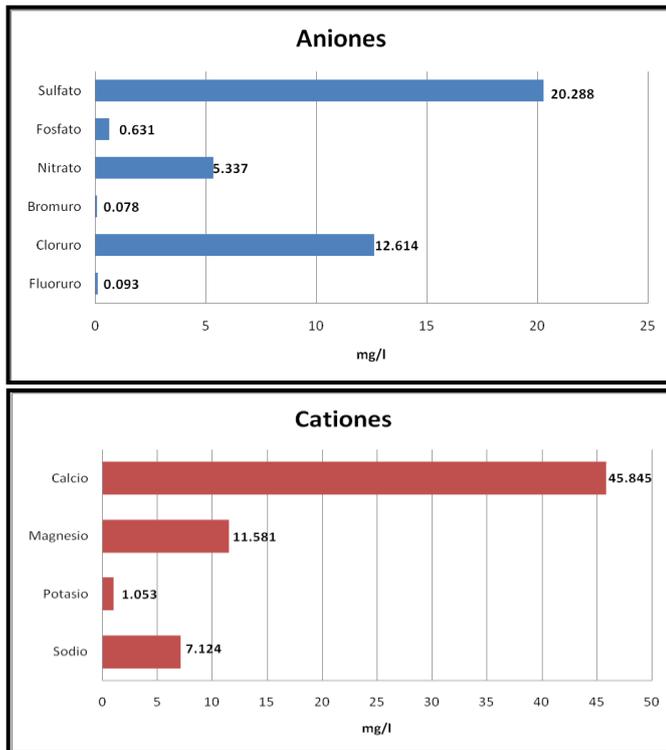


Fig. 44.- Resultados del análisis de aniones (arriba) y cationes (abajo) de la fuente Deva.

6.3.2.3. Parámetros hidrogeológicos. Ensayo de bombeo.

El ensayo de bombeo para el acuífero superior se llevó a cabo en el sondeo Molinín (S-3 de la EMA), controlándose los niveles en el sondeo de Suncia (S-5) (situado a 810 de distancia) mediante medidas puntuales y en sondeo de Pecuaría (S-4) (a 1056 m de distancia) (Fig. 45) con un piezómetro de presión que realiza medidas continuadas.



Fig. 45.- Mapa de situación detallada de los sondeos S-3, S-4 y S-5.

Puesto que el sondeo Molinín se encuentra en explotación con caudales de extracción de aproximadamente 22 l/s, el ensayo de bombeo se realizó en dos etapas: una primera etapa de recuperación de niveles, y posteriormente con la activación de la bomba un ensayo de bombeo a caudal constante de 22 l/s (Fig. 46).

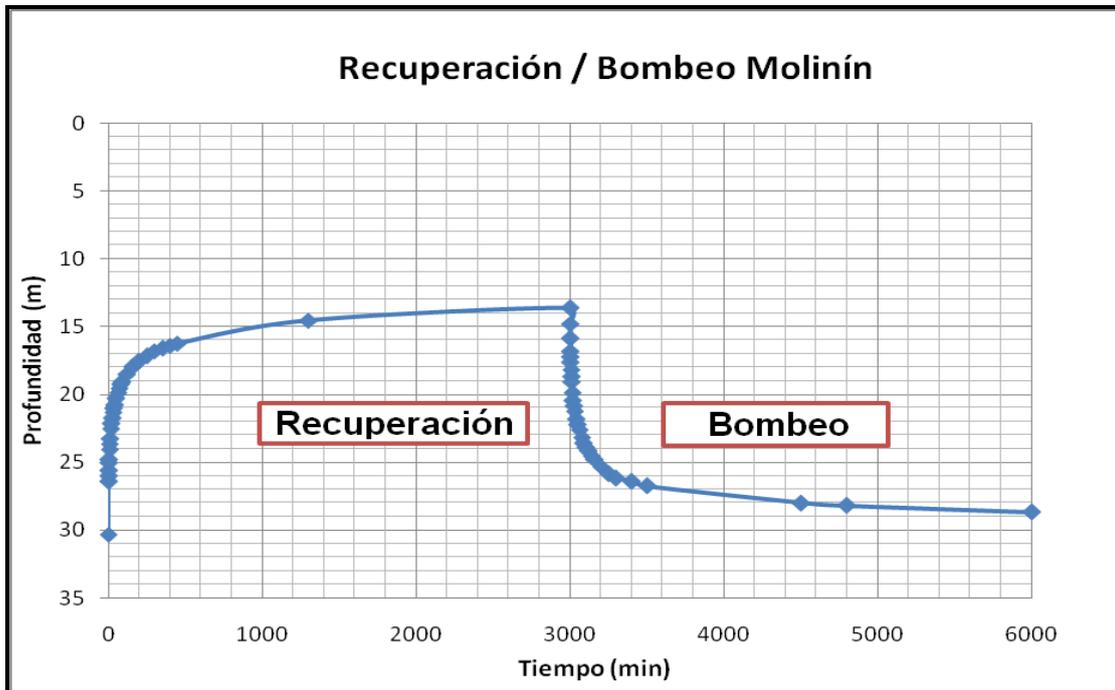


Fig. 46.- Arriba) Detalle de la variación de niveles durante la parada de la bomba y su posterior recuperación durante el nuevo bombeo. Abajo) Valores de profundidad del nivel freático respecto a la superficie medidos en el sondeo del Molinín durante los ensayos de recuperación y bombeo.

El procedimiento para el cálculo de los parámetros hidrogeológicos seguido en el ensayo del acuífero superior es el mismo que el llevado a cabo para el acuífero inferior en el ensayo de La Ería, pero con una modificación ya que en este caso se está ensayando un acuífero libre.

Para acuíferos libres en los que el descenso supera el 15% del espesor saturado inicial (espesor que conocemos gracias al análisis del perfil de diagraffa gamma) debe realizarse una corrección conocida como corrección de Dupuit de la forma:

$$s_c = s - \frac{s^2}{2h_0}$$

donde:

s = descenso

s_c = descenso corregido

h₀ = espesor saturado inicial

Una vez corregidos, los valores pueden representarse en un gráfico semilogarítmico y operar de la misma forma que la explicada anteriormente para el acuífero inferior.

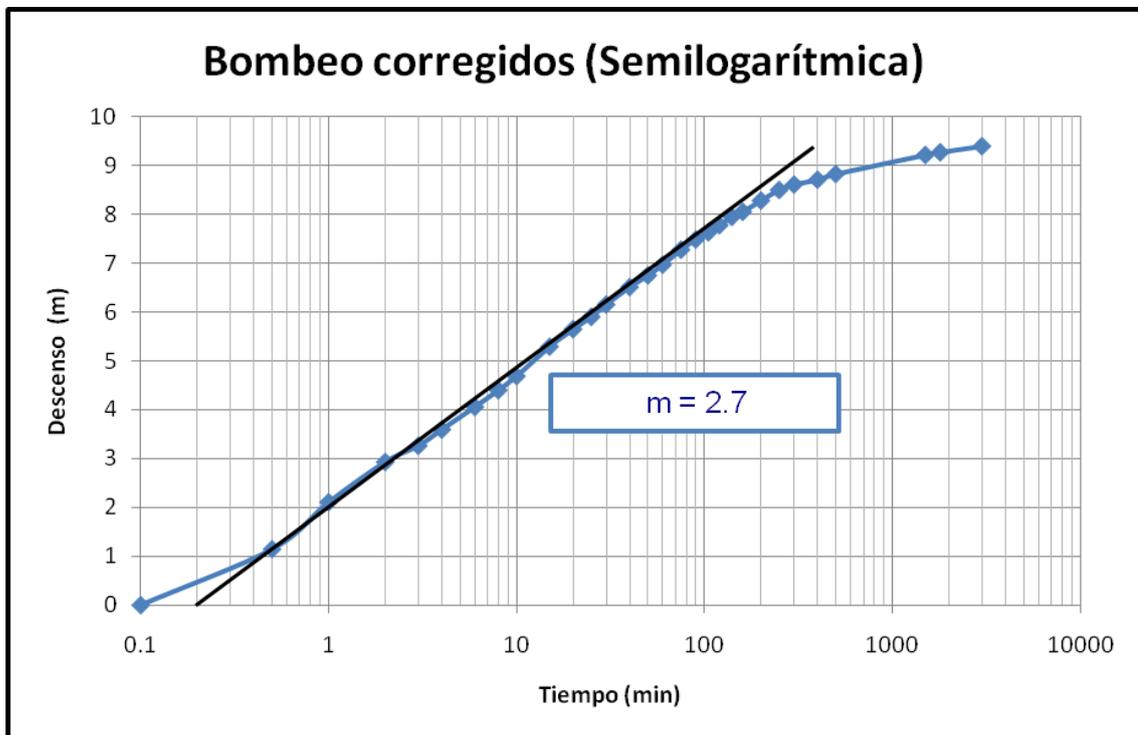


Fig.47.- Gráfico semilogarítmico de valores corregidos para el ensayo de bombeo.

A diferencia del ensayo de La Ería en el presente caso los caudales de bombeo se muestran prácticamente constantes de 22 l/s (ver Fig. 46) y es supuesto que el pozo de bombeo atraviesa todo el espesor saturado del miembro superior, por lo que los resultados son de mayor fiabilidad.

Los cálculos realizados dan un valor de transmisividad de 129 m²/d para el ensayo de recuperación y 139 m²/d para el ensayo de bombeo. Esta ligera variación se debe posiblemente a los cambios en la tasa de caudal extraído durante el ensayo de bombeo que distorsiona ligeramente los resultados.

Los valores de permeabilidad para el espesor saturado inicial (estimado en 20m) son:

$k \approx 6.5 \text{ m/día}$
$k \approx 7.5 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$

Valoración del ensayo de bombeo: Los valores obtenidos en el pozo de bombeo se consideran más fiables que los obtenidos para el acuífero inferior, puesto que se tiene seguridad de que el pozo de bombeo atraviesa todo el miembro superior y que el caudal de bombeo es constante. Así mismo, la posibilidad de realizar un ensayo de recuperación, y la similitud entre las rectas de correlación de esta y el bombeo dan mayor fiabilidad a los resultados.

Por otra parte, el hecho de no conocer el espesor exacto de los diferentes miembros geológicos, la distribución del ranurado en el entubado y la complejidad mayor que tienen los acuíferos libres en la interpretación de los resultados, impiden dar estos resultados como totalmente válidos, aunque si de una fiabilidad alta.

Los resultados del ensayo de bombeo permiten clasificar este acuífero como de tipo aceptable-bueno.

Los datos de los sondeos utilizados como piezómetros se han tenido en cuenta, pero, al igual que en el ensayo de La Ería no se han utilizado para los cálculos por su falta de fiabilidad en relación con el bombeo en el pozo principal. Por otra parte, si bien en el sondeo de Suncia (a 810 m del sondeo del Molinín) se registraron variaciones que pueden estar asociadas al bombeo, en el sondeo de Pecuaría (a 1056 m de distancia) no se tuvo constancia de ningún cambio, por lo que se puede afirmar que el radio de influencia del bombeo es inferior a dicha distancia.

6.3.3. Acuitardo

El acuitardo, corresponde al miembro medio de la formación Gijón, y actúa como un medio de muy baja transmisividad entre los acuíferos inferior y superior. Este miembro presenta una extensión dentro de la Masa de Agua 012.005 de 194,49 km², siendo 25,35 km² de los mismos aflorantes.

Este nivel, de naturaleza predominantemente margosa, lutítica y brechoide, presenta intercalaciones de calizas y dolomías que desaparecen lateralmente (debido al colapso producido por la disolución de los yesos). Esta heterogeneidad hace que la permeabilidad es muy variable en función del material. De esta forma, para los tramos lutíticos, margosos y brechoides se han estimado valores de conductividad hidráulica del orden de 10⁻⁵ a 10⁻⁶ cm/s.

Las calizas y dolomías, sin embargo, que generalmente presentan karstificación, presentan permeabilidades más elevadas, y en ocasiones en que se extiendan lateralmente hasta llegar a aflorar constituir acuíferos calcáreos de extensión limitada (menor de 1,5 km de longitud) rodeados de un acuitardo conformado por las margas y las lutitas. En este caso las conductividades hidráulicas son elevadas, del orden de 10⁻³ cm/s.

6.4. Características hidrogeoquímicas

En rasgos generales se pueden clasificar las aguas de ambos acuíferos como bicarbonatadas cálcico-magnésicas. Se puede así mismo hacer una diferenciación entre ellas, siendo las del acuífero inferior de contenido más elevado en Mg al tratarse de un nivel más dolomitizadas.

El acuífero inferior presenta por término medio una conductividad de 650 µS/cm y un pH de 7.9. El acuífero superior presenta una conductividad media algo inferior, de unos 560 µS/cm y un pH de 7.66. Las aguas de este acuífero presentan una mineralización más débil (transmisión oral de Cruz Hernández).

En algunos puntos de los acuíferos carbonatados de la formación Gijón se ha podido constatar la presencia de cantidades disueltas de sulfatos superiores a las permitidas por los estándares de la Unión Europea para aguas de consumo humano, fijadas en 250 mg/l.

Así, diferentes análisis realizados en diversas fuentes de la zona, han reflejado valores de concentraciones de sulfatos y conductividades eléctricas superiores a 1000 mg/l y 2000 μ S/cm respectivamente.

Estos valores se dan en las aguas del acuífero inferior de la formación Gijón, dispuesto sobre un tramo litológico del Triásico (compuesto por finas capas de dolomías, yesos y lutitas grises) y cuyo límite de techo está formado por el miembro medio, o miembro Fabares, de dicha formación Gijón.

Por lo tanto, tanto el tramo de muro como en el de techo se caracterizan por la aparición de numerosas intercalaciones yesíferas que cargan en sulfatos las aguas del acuífero, deteriorando su calidad (González Fernández *et al.*, 2004, 2009, 2010).

7. MODELO HIDROGEOLÓGICO

El modelado hidrogeológico constituye una gran herramienta para describir el comportamiento del acuífero y tratar de predecir situaciones futuras. El realizado en este trabajo es el primero conocido para la zona y se ha visto sometido a grandes incertidumbres al carecer datos en abundancia y calidad.

En este apartado se menciona brevemente como se ha realizado y se expone alguna salida gráfica de los resultados.

7.1. Diseño

El modelo propuesto se ha tratado de simplificar en la medida de lo posible. De esta manera se modelaron 4 capas (Fig. 48), con un ligero buzamiento hacia la línea de costa con el fin de representar de una manera sencilla la situación que se da en la realidad.

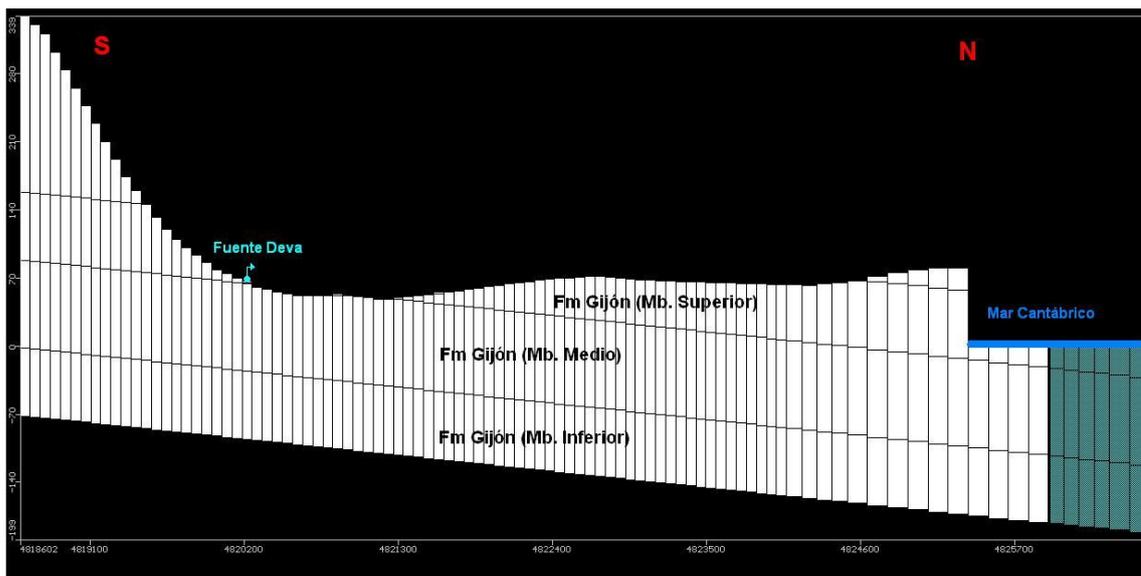


Fig. 48.- Perfil en el que se muestra la disposición de capas utilizada en el modelo (escala vertical exagerada).

De entre las cuatro capas, la superior corresponde a una capa de muy baja permeabilidad (fm. Rodiles). Por debajo se situarían los tres miembros de la Fm. Gijón: los acuíferos inferior y superior, y el acuitardo situado entre ambos. (El límite inferior representado por el Triásico ya es adoptado por el modelo como de muy baja permeabilidad).

La topografía del modelo se ha importado desde un archivo .dxf de AutoCAD que se ha convertido en puntos XYZ de coordenadas UTM conocidas.

Los valores de conductividades hidráulicas son los estimados en los ensayos de bombeo en este mismo trabajo para los miembros superior e inferior (se introdujeron valores algo más elevados, como se supone que son en la realidad) y los del acuitardo se obtuvieron de otras fuentes.

El nivel del mar en el borde de costa se modeló como celdas de nivel constante (0 m.s.n.m.) y las celdas exteriores al acuífero (Triásico y Paleozoico en la zona noroccidental), así como las de mar adentro se asumieron como celdas inactivas.

Los pozos de bombeo y observación, puesto que no existen datos fiables sobre la disposición de la rejilla, la profundidad exacta y si atraviesan o no todo el miembro acuífero, se han modelizado suponiendo los datos que podrían ser más aproximados a la realidad y también basándose en las diagráfias realizadas en algunos de ellos.

Las salidas gráficas (fig. 49) permiten comprender los resultados, tanto en planta como en perfiles de las columnas y las filas. En los mismos se pueden representar las isopiezas, el nivel piezométrico, mapas de contorno, direcciones de flujo, trayectorias seguidas por las partículas que hemos introducido previamente, etc.

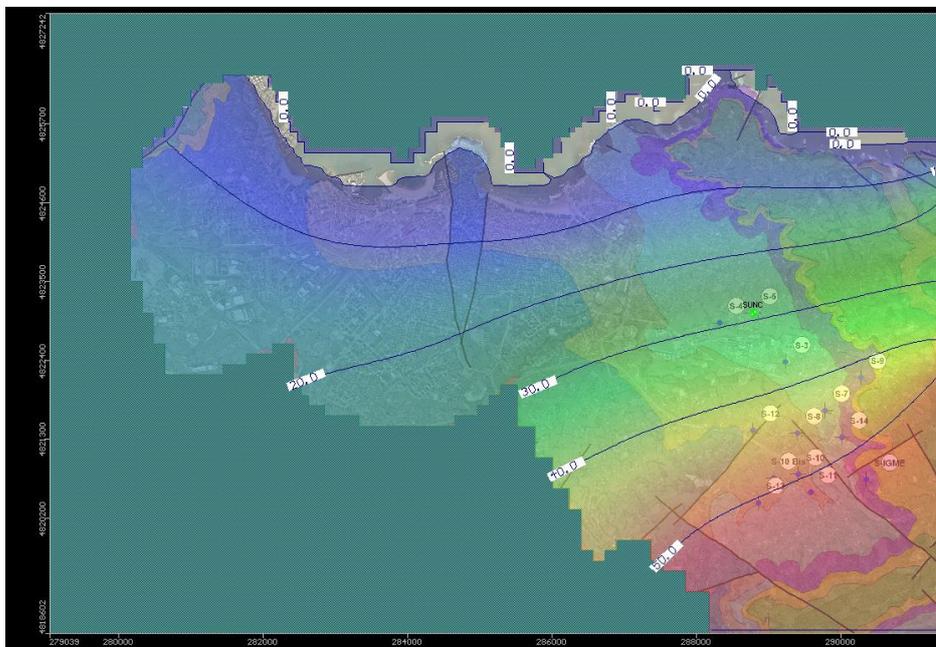


Fig.49.- Salida gráfica del mapa de isopiezas de la capa que representa al miembro inferior de la Fm. Gijón.

7.2. Simulación de bombeo

En la zona del bombeo de La Ería también se llevó a cabo un pequeño modelo una vez conocidos los niveles de referencia y la dirección preferente de flujo. En este sector hay concentrados varios sondeos de la EMA y son conocidos los niveles de los pozos, por lo que se trató de simular el efecto que este bombeo tiene con su caudal de explotación en estado estacionario.

Para ello se situaron, además de los pozos de explotación existentes, diferentes pozos de observación con niveles conocidos, con el objetivo de calcular con el modelo unos resultado en régimen estacionario comparables a los naturales.

Estos pozos de observación permiten, como se explicó anteriormente en la metodología comparar los valores calculados en el modelo con los observados en la realidad.

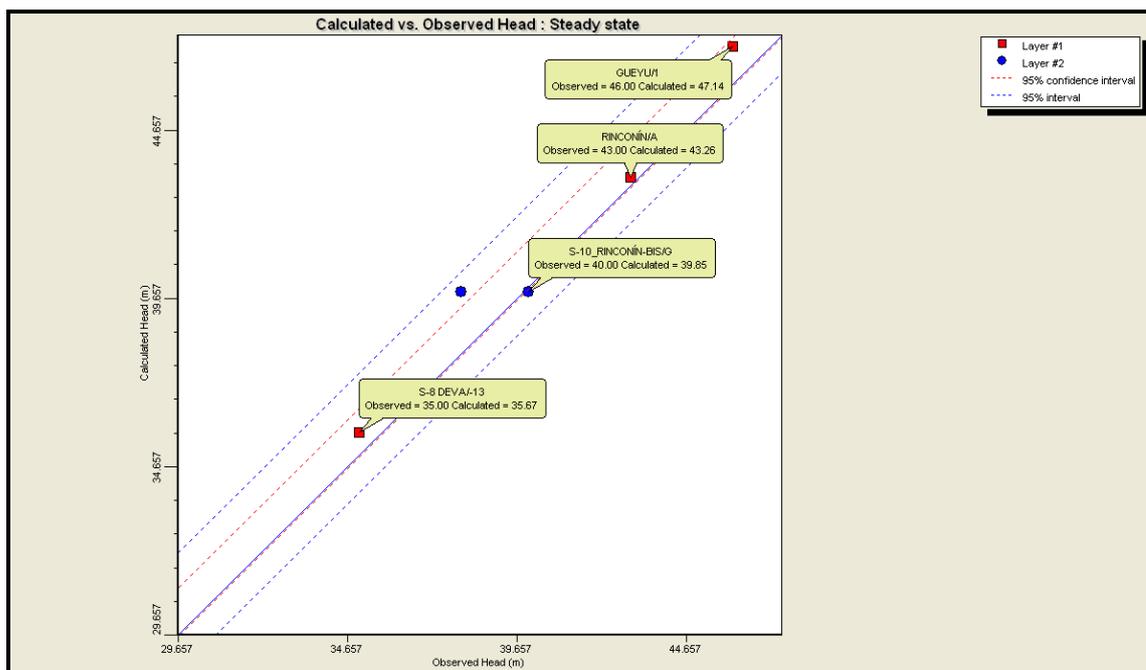


Fig.- Gráfico de comparación de valores observados frente a calculados en una de las soluciones obtenidas en el modelo de La Ería.

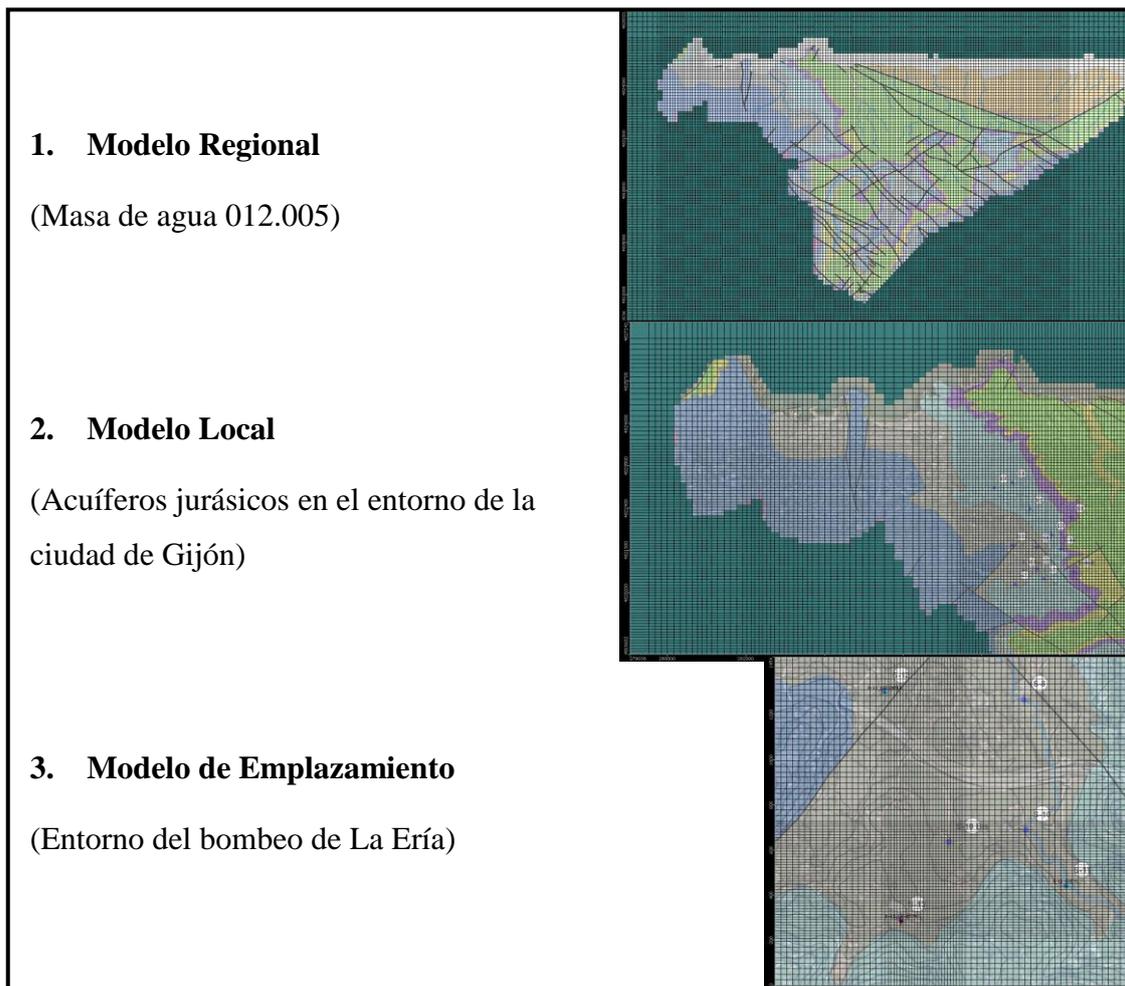
7.2. Valoración del modelo hidrogeológico.

La realización de un modelo de estas características necesita que se le introduzcan comportamientos con valores muy precisos, y, puesto que la cantidad de información previa era escasa, el modelo realizado está sujeto a una gran incertidumbre y deberá ser

comprobado durante su etapa de explotación, mejorándolo paulatinamente con la adquisición de nuevos datos.

La zona donde se ha desarrollado el trabajo forma parte de un sistema acuífero de grandes dimensiones, por lo que al tratar de modelar una porción del mismo, deben suponerse unas condiciones de contorno en su borde este de tipo hidráulico de difícil cuantificación y que se deben estimar en base a datos indirectos para conseguir un resultado válido que concuerde con los datos de observación directa disponibles.

Este tipo de bordes de tipo hidráulico son variables con el tiempo, por lo que el proceso ideal sería disponer de datos abundantes y precisos de los acuíferos de toda la masa de agua 012.005 y realizar un modelo regional, para, una vez conocido el comportamiento de los mismos, poder restringir el modelo a un ámbito más local (como sería el modelo del entorno de la ciudad de Gijón) y de emplazamiento (por ejemplo el ensayo de bombeo).



8. CONCLUSIONES

- Se ha constatado la presencia de dos niveles acuíferos, correspondientes a los miembros inferior y superior de la formación Gijón, ambos de naturaleza kárstica. Sus permeabilidades han sido calculadas en sendos ensayos de bombeo y la clasificación en función de las mismas los sitúa como de tipo medio-bueno. Los resultados de estos ensayos estuvieron limitados por la disponibilidad de los sondeos existentes, por lo que es probable que los parámetros del acuífero sean más elevados que los obtenidos.
- El acuífero inferior se encuentra, cuando no están en contacto directo con la superficie, semiconfinado por el miembro medio que actúa como acuitardo al tener una permeabilidad varios órdenes menor.
- Un bombeo de un par de 15-20 l/s (ver bombeo de La Ería) da lugar a un abatimiento de los niveles del orden de 80 metros en el acuífero inferior cuando este se encuentra semiconfinado, produciendo un “cono” de bombeo muy pronunciado, característico de medios confinados o semiconfinados donde el coeficiente de almacenamiento es menor.
- El acuífero superior es libre en la zona de Cabueñes-Somío, pero hacia el este y el sudeste está en régimen confinado bajo los materiales de muy baja permeabilidad de la formación Rodiles.
- El bombeo en un acuífero libre (ver bombeo del Molinín) da lugar a unos descensos menores (aún con un caudal de explotación mayor), consecuencia de un coeficiente de almacenamiento mayor (igual a la permeabilidad), lo que da como resultado un cono de descensos de geometría más suave.
- El radio de afección de un bombeo en el acuífero superior cuando está en régimen libre tiene un radio de influencia de unos 1000 m, como se pudo comprobar por el descenso de niveles en Suncia (a 800 m) y la nula variación en Pecuaría (1156 m).
- El nivel freático del acuífero superior es en ocasiones muy somero, especialmente en la zona de Cabueñes, lo que lo hace especialmente vulnerable a las actividades que se realicen en superficie, lo que puede afectar a la calidad del agua. Así mismo, en temporadas de precipitaciones abundantes el agua puede afectar a plantas subterráneas de edificios cercanos.

Como conclusión final debe destacarse que los acuíferos jurásicos carbonatados del subsuelo de Gijón, caracterizados como de tipo medio-bueno en función de sus permeabilidades y sus recursos estimados, presentan unas características que hacen que puedan ser explotados más ampliamente, tanto en cantidad, como en calidad, de lo que se hacen actualmente.

No obstante, para que este aprovechamiento de los recursos hídricos del subsuelo resulte plenamente satisfactorio sería necesaria una planificación previa que tendría como eje un estudio, tanto geológico como hidrogeológico, de mayor amplitud y profundidad.

9. RECOMENDACIONES

Planificación adecuada (estudio geológico e hidrogeológico).

A la vista de los resultados se hace inevitable recomendar una planificación previa adecuada a la explotación de los recursos subterráneos de las calizas del Jurásico. Este estudio geológico-hidrogeológico evitaría errores pasados y permitiría conocer las características del subsuelo

Esa planificación debería comprender, por una parte, un estudio geológico completo, con la realización de uno o varios sondeos de investigación convenientemente testificados, tanto petrográfica, como, si es posible, geofísicamente mediante diversas diagráfias.. Existe una gran incertidumbre sobre la disposición de los materiales jurásicos en la zona, que solo ha podido ser comprobada directamente a partir de los sondeos realizados para otros fines (principalmente geotécnicos) o en escasos afloramientos directos. Dichos sondeos geotécnicos, como por ejemplo los del estudio del Metrotrén, si bien sirven como referencia directa, se restringen únicamente a unas decenas de metros bajo la superficie, lo que se considera insuficiente en relación con los 270 m de potencia que aproximadamente se estima que tiene la Fm. Gijón.

Por otro lado se recomienda la realización de un estudio hidrogeológico en la zona de explotación, cuyo objetivo sea conocer de manera más exacta y en unas condiciones idóneas los parámetros del acuífero.

Para este fin sería adecuado realizar varios ensayos de bombeo, al menos uno para cada miembro acuífero, en condiciones idóneas, con pozos que atraviesen todo el miembro acuífero, entubados y ranurados en los tramos que se desean ensayar.

Mantenimiento de los pozos de bombeo

La práctica totalidad de los pozos controlados presentan un estado de conservación claramente mejorable. En muchas ocasiones el entubado se encuentra desplazado y los tubos de bombeo presentan pérdidas, como se pudo comprobar durante el ensayo de bombeo. Sería recomendable así mismo contar con una red de piezómetros en todos los pozos que permitan controlar las variaciones diarias de nivel, ya que el único del que se dispone (Pecuaría) es claramente insuficiente y poco representativo en el conjunto del acuífero.

Ausencia de explotación en pozos que puedan producir afecciones

Se ha constatado la existencia de pozos, como el caso de los situados en las márgenes del arroyo de Peña Francia, cuyo cono de bombeo provoca la pérdida de agua del río, debido a una mala distribución del enrejillado que provoca que parte del agua que se bombea provenga directamente del mismo arroyo.

Se recomienda por lo tanto estudiar con detalle la distribución en profundidad del acuífero, adecuando el pozo para no producir ningún tipo de afección, o que esta sea la menor posible. En caso de no poder garantizar esto, se recomienda no utilizar dichos pozos.

Modelización hidrogeológica en profundidad

La construcción de un modelo de calidad posterior al estudio hidrogeológico (que facilite un gran número de datos sobre las características del acuífero) sería de gran ayuda para la simulación de futuras modificaciones en el acuífero, como podrían ser la instalación de nuevos pozos de abastecimiento, la construcción de infraestructuras, etc.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a todas las entidades y personas que han contribuido a la realización de este trabajo

En primer lugar a Pablo Cruz Hernández por haber participado activamente en la elaboración de este trabajo y por su colaboración en todos los ensayos de campo.

A la Empresa Municipal de Aguas del Ayuntamiento de Gijón, y en su representación a su gerente, Luis Alemany García, por haber facilitado y financiado buena parte de los ensayos de este trabajo.

También de la Empresa Municipal de Aguas agradecer al jefe del laboratorio de la Perdiz, Rafael Alonso Ojeda toda la información facilitada, así como por recibimos siempre que le fue posible, permitirnos el acceso a los sondeos, y por hacer los análisis químicos en su laboratorio. También he de hacer este agradecimiento extensible al jefe de servicio de mantenimiento, Ramón Suárez González; a los analistas de laboratorio, Ángeles Entrialgo López, Manuel Javier Aroca Iglesias y Paula López Lombardero; y a los operarios de la ETAP, Cipriano Tarriño, Juan Suárez Rodríguez y Agustín Quintana Rodríguez.

A Mónica Meléndez Asensio (IGME) y Manuel Gutiérrez Claverol (Universidad de Oviedo) por haber proporcionado información del acuífero jurásico y fichas de prospecciones anteriores en la zona.

A Luis Manuel Lara por facilitar datos sobre las diagragfías de algunos sondeos.

BIBLIOGRAFÍA

AEMET (2009): *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. Agencia Estatal de Meteorología, 158 p.

Almela, A. y Ríos, J.M. (1962): *Investigación del Hullero bajo los terrenos mesozoicos de la Costa Cantábrica (zona de Oviedo-Gijón-Villaviciosa-Infiesto)*. Enadmisa, Madrid, 181 p.

Aronoff, S. (1989): *Geographic Information Systems: a management perspective*. WDL Publications, Ottawa.

ASTM (American Society for Testing and Materials) (1999): *Standard Guide for Conducting Borehole Geophysical Logging – Gamma (D 2674-98)*, 11 p.

Aurell, M., Robles, S., Bádenas, B., Rosales, I., Quesada, S., Meléndez, G., García Ramos, J.C. (2003): Transgressive-regressive cycles and Jurassic paleogeography of northeast Iberia. *Sedimentary Geology*, nº 162. p. 239-271.

Barrón, E., Gómez, J.J., Goy, A. (2002): Los materiales del tránsito Triásico-Jurásico en la región de Villaviciosa (Asturias, España). *Geogaceta*, 31: 197-200.

Barrón, E., Gómez, J.J., Goy, A., Pieren, A.P. (2006): The Triassic-Jurassic Boundary in Asturias (Northern Spain): Palynological characterisation and facies. *Review of Palaeobotany and Palynology*.

Bellmunt, O. y Canella, F. (1895): *Asturias. t.I*, 401 p., Gijón.

Blanco González (2006). *EMA: Cuarenta años. Historia de la Empresa Municipal de Aguas de Gijón (1965-2005)*. Empresa Municipal de Aguas, Ayuntamiento de Gijón, Gijón, 96 p.

Burrough, P.A. (1986): *Principles of geographic information systems for land resources assessment*. Oxford, Clarendon.

Cebrián, J.A. (1988): Sistemas de Información Geográfica. En: Bosque, J. et al.: *Aplicaciones de la informática a la Geografía y a las Ciencias Sociales*. Ed. Síntesis, p. 125-140. Madrid.

Clark ID, Fritz P (1997): *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers Inc, New York, 352 p.

Cooper, H.H. and Jacob, C.E. (1946): *A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history*. American Geophysical Union Transactions, 27, 526-534.

Cowen, D. (1988): GIS versus CAD versus DBMS: What are the differences? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, p. 1551-1554.

Cuesta, E. y Junquera y Plá, F.J. (1867): *Análisis hidrométrico de las aguas potables de la provincia de Asturias (referidas al concejo de Gijón)*. Memoria acerca del estado del Instituto Jovellanos de Gijón, pp 1-15, Gijón.

Dubar, G., Mouterde, R. y Llopis, N. (1963) : Première récolte d'une Ammonite de l'Hettangien inférieur dans les calcaires dolomitiques de la region d'Avilés (Asturies, Espagne du Nord). *C.R. Acad. Sci. Paris* 257, 2306-2308.

Dueker, K.J. (1979): Land resource information systems: a review of fifteen year experience. *Geo-processing*, 1, p. 105-128.

EC (2000): Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for community action in the field of water policy, 72 p.

Felicísimo Pérez, A.M. (1992): El clima de Asturias. En: *Geografía de Asturias*. La Nueva España, I: 17-32. Oviedo.

Flor, G. y Lharti, S. (2008): Estratigrafía y sedimentología del recubrimiento costero de Gijón (Asturias). *Trabajos de Geología. Universidad de Oviedo*, 28: 137-157.

Gat, J. and Gonfiantini, R. (Editors) (1981): Stable Isotope Hydrology. Deuterium and Oxygen-18 in the water Cycle, *Technical Reports Series No 210*, IAEA Vienna: 337 p.

German Water Engineering (1963): *Estudio sobre la Hidroeconomía e Hidrogeología de la zona central de Asturias*. Dip. Prov. de Asturias (informe inédito), 229 p, Oviedo.

González, B., Menéndez Casares, E., Gutiérrez Claverol, M. y García-Ramos, J.C. (2004): Subunidades litoestratigráficas de la Formación Gijón (Triásico Superior-Jurásico Inferior, Asturias). *VI Cong. Geol. Esp (Zaragoza 2004)*, Geo-Temas, 6 (2): 71-74, Zaragoza.

González Fernández, B., Meléndez Asensio, M., Menéndez Casares, E., y Gutierrez Claverol, M. (2006): Propuesta de declaración de Puntos de Interés Hidrogeológico en los acuíferos jurásicos de Gijón-Villaviciosa (Asturias): nacimiento del río España, nacimiento del río Peña de Francia, cueva de Lloviu y fuente de La Ruxidora. *Trabajos de Geología, Univ. Oviedo*, 26: 141-148.

González Fernández, B., Meléndez Asensio, M. y Menéndez Casares, E. (2009): Hydrogeological characterization of carbonated Jurassic aquifers in the Gijón-Villaviciosa basin (Asturias, N Spain) by means of geochemical and isotopic techniques. *Environ Earth Sci*, 59: 913-928.

González Fernández, B., Menéndez Casares, E., Meléndez Asensio, M. y Gutierrez Claverol, M. (2010): Mining Activity and Geotechnical and Hydrogeological Issues Related to the Presence of Gypsum in Asturias (NW Spain). En: *Gypsum. Properties, Production and Applications* (Delia H. Sampson, Ed.), Nova Publishers, USA.

Gutierrez Claverol, M., Torres, M. y Luque, C. (2002): *El subsuelo de Gijón. Aspectos geológicos*. CQ Licer. S. L. Librería Cervantes, 462 p, Oviedo.

Gutiérrez Puebla, J. y Gould, M. (1994). *SIG: Sistemas de Información Geográfica*. Ed. Síntesis, 252 p, Madrid.

IDRENA (1993): *Estudio hidrogeológico para la regulación y gestión del sistema acuífero jurásico Gijón-Villaviciosa (Principado de Asturias). 1ª parte: acuífero jurásico de Deva*. IGME, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales (informe inédito). Madrid.

IGME (1982): *Estudio hidrogeológico de la Cuenca Norte de España (Asturias). Sistema Acuífero nº.1. Unidad mesozoica Gijón-Villaviciosa. Franja móvil*. Ministerio de Industria y Energía. Informe técnico, 2, vol.2, Madrid.

IGME (1984): *Investigación hidrogeológica de la Cuenca Norte: Asturias*. Colec. Informes. Serv. Publ. Ministerio de Industria, 81 p, Madrid.

IGME (1986, 1990 y 1996): *Calidad de las aguas subterráneas en la Cuenca Norte. Asturias y Cantabria*. Programa de gestión y conservación de Acuíferos. Ministerio de Industria y Energía (informes inéditos). Oviedo.

IGME (1993): *Estudio hidrogeológico para la regulación y gestión del sistema acuífero jurásico Gijón-Villaviciosa*. Ministerio de Industria y Energía (informe inédito).

IGME (2000): *Unidades hidrogeológicas de España. Mapa y datos básicos*. Serv. Publ. Ministerio de Industria, 34 p, Madrid.

Manteca Fraile, J.F., Río Fernández, J.L. del y Alonso Alonso, J.J. (1998): “El Güeyu Deva. Aportando al otru llau del espeyu”. Asturias, 6: 85-95. Oviedo.

Martínez-Fresneda Mor, F. (1980): Sistema acuífero correspondiente a la unidad mesozoica Gijón-Villaviciosa. *VI Jornadas Minero-Metalúrgicas. Sección 5ª*: 21-33. Huelva.

Martínez García, E., Coquel, R., Gutiérrez Claverol, M. y Qurga, J.L. (1998): Edad de los niveles de tránsito entre el Pérmico y el Jurásico en el área de Gijón (Asturias, NW de España). *Geogaceta*, 24: 215-218. Zaragoza.

McDonald, M.G. y Harbaugh, A.W. (1988): A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. *U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6, Chap. A1, 586 p.

Menéndez Casares, E. y González Fernández, B. (2010): Nuevos datos cartográficos del Jurásico de Asturias. *V Congreso del Jurásico en Asturias*. Museo del Jurásico de Asturias.

Menéndez Casares, E, González, B., Gutierrez Claverol, M. y García Ramos, J.C. (2004): Precisiones sobre los acuíferos de la cuenca jurásica asturiana (NO de España). *Trabajos de Geología, Univ. Oviedo*, 24: 119-126.

Ministerio de Medio Ambiente (2005): *Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las Cuencas Intercomunitarias*, 88 p.

Mook, WG (ed) (2002): Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y aplicaciones (Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and applications), vol 1. IGME. Serie: Guías y Manuales, 596 p.

NCGIA (1990): *NCGIA Core Curriculum*. Santa Barbara, Universidad de California.

Ortuño, A., Meléndez, M. y Rodríguez, M.L. (2004): Relación entre litología y características hidroquímicas de las aguas subterráneas. Red de Control de Calidad del Principado de Asturias. *Bol. Geol. Min.*, 115 (1):35-46.

Pieren, A.P., Areces, J.L., Toraño, J. y Martínez García (1995): Estratigrafía y estructura de los materiales permotriásicos del sector Gijón-La Collada (Asturias). Cuadernos de Geología Ibérica, 19: 309-335- Universidad Complutense, Madrid.

Prockett, T.A., Lonquist, C.G. (1971): Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation: Illinois State Water simulation Survey, Report of Investigation, 55, 62 p.

Ramírez del Pozo, J. (1969): Bioestratigrafía y Paleogeografía del Jurásico de la costa asturiana (Zona de Oviedo-Gijón-Villaviciosa). *Bol. Geol. Min.*, 80 (4): 307-332.

Rato y Roces, C. de (1895): *Gijón*. En: Asturias (O. Bellmunt y Traver y F. Canella y Secades, DTRES), T.I, Gijón.

Rodríguez González, L.M. (1977): *Estudio hidrogeológico de los alrededores de Gijón*. Empresa Municipal de Aguas. Oviedo. 1977.

Sánchez, F.J. (2004): Fundamentos básicos de los modelos de flujo de agua subterránea. Univ. de Salamanca. 4p. (En: <http://web.usal.es/~javisan/hidro/hidro.htm>).

Schlumberger Water Services (2010): *Visual MODFLOW 2010 User's manual*, Canada, 676 p.

Schulz, G. (1858): *Atlas geológico y topográfico de Asturias*. Lit. de G. Pfeiffer. Madrid. Ed. facsimilar, Alvizoras Libros, Oviedo, 1988.

Smith, T.R., Menon, S., Star, J.L. y Estes, J.E. (1987): Requirements and principles for the implementation and construction of large-scale geographic information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1, p. 13-31.

Suárez Vega, L. C. (1969): El Lías de Asturias (1ª parte). *Semin. Estrat., Serie Azul*, 4: 41-46. Madrid.

Suárez Vega, L. C. (1974): *Estratigrafía del Jurásico en Asturias*. Gráficas Summa, 368 p., Oviedo.

Theis, C.V. (1935): *The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage*. Eos Trans. AGU, 16, 519-524.

Valenzuela, M. (1988): *Estratigrafía, Sedimentología y Paleogeografía del Jurásico de Asturias*. Tesis Doctoral. Univ. Oviedo, 1433 p.

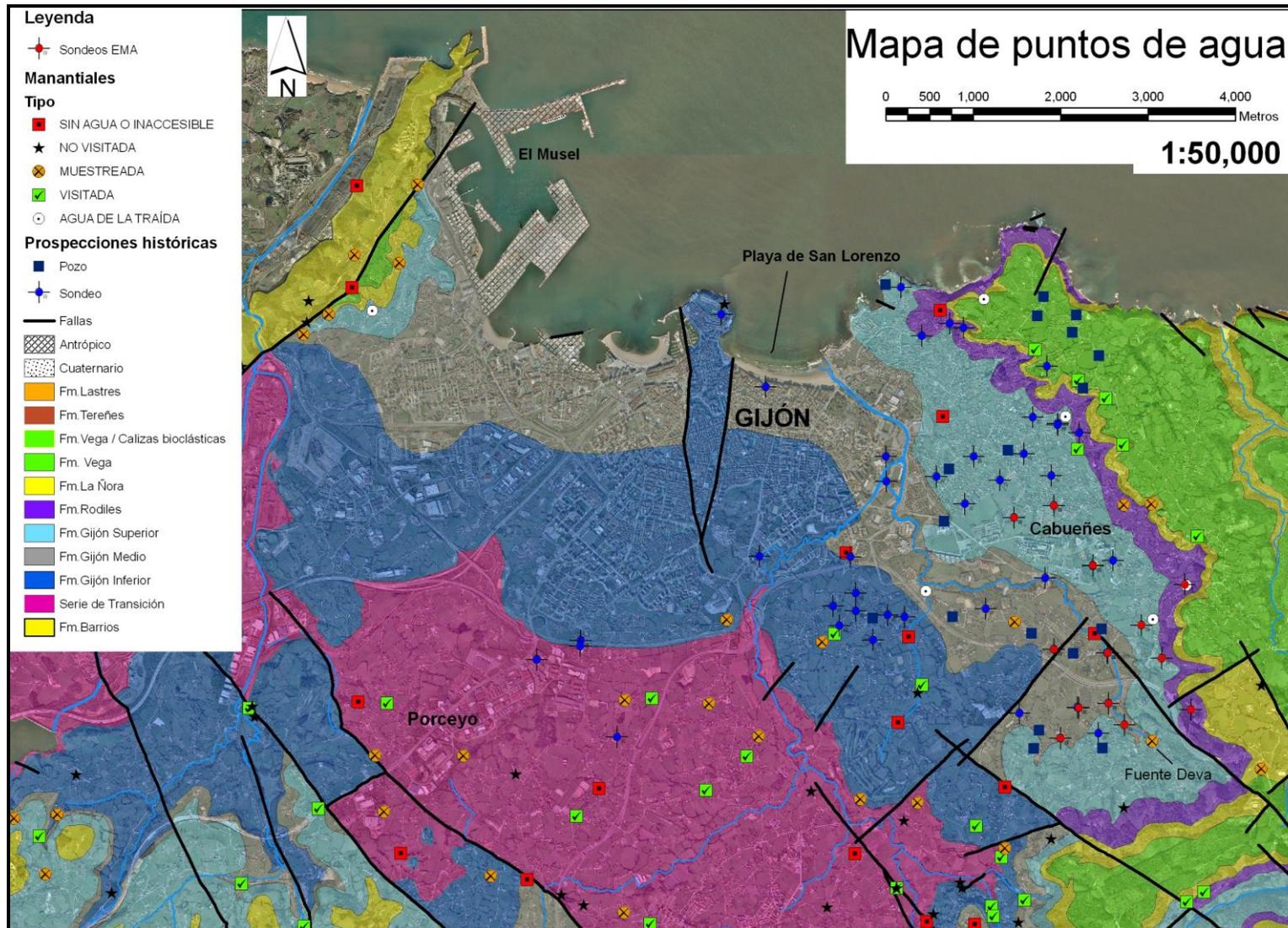
Valenzuela, M., García-Ramos, J.C. y Suárez de Centi, C. (1986): *The Jurassic sedimentation in Asturias (N Spain)*. *Trabajos de Geología, Univ. Oviedo*, 16: 121-132.

Valenzuela, M., García-Ramos, J.C., González Lastra, J. y Suárez de Centi, C. (1985): *Sedimentación cíclica margo-calcárea de plataforma en el Lias de Asturias*. *Trabajos de Geología. Univ. Oviedo*, 15: 45-52.

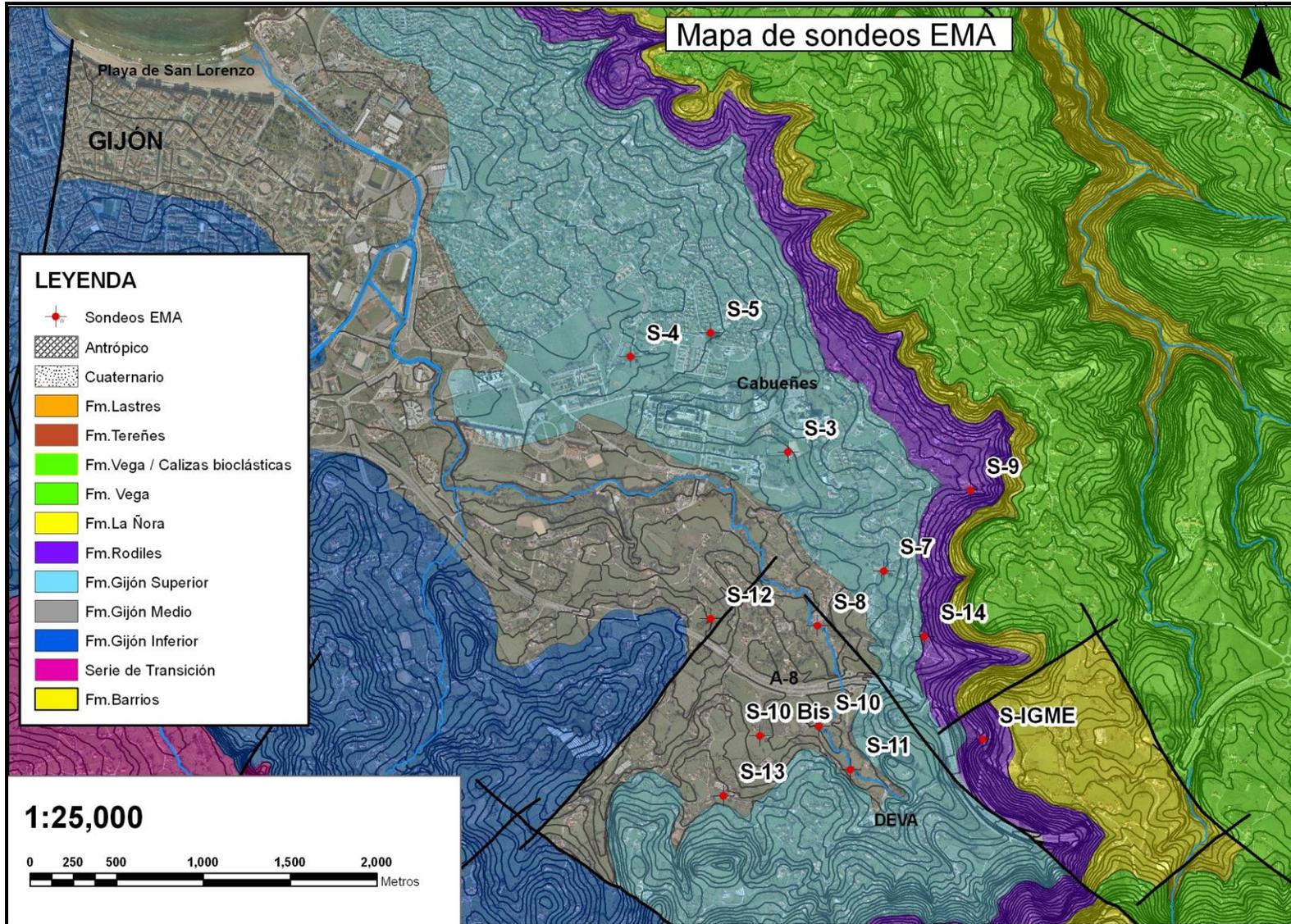
ANEXOS

A. MAPA DE SITUACIÓN DE PUNTOS DE AGUA.	II
B. MAPA DE SITUACIÓN DE LOS SONDEOS DE LA EMA	IV
C. INTERPRETACIÓN DE DIAGRAFÍAS	VI
D. DATOS Y CURVAS DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO	XII

A. MAPA DE PUNTOS DE AGUA



B. MAPA DE SONDEOS DE LA EMPRESA MUNICIPAL DE AGUAS

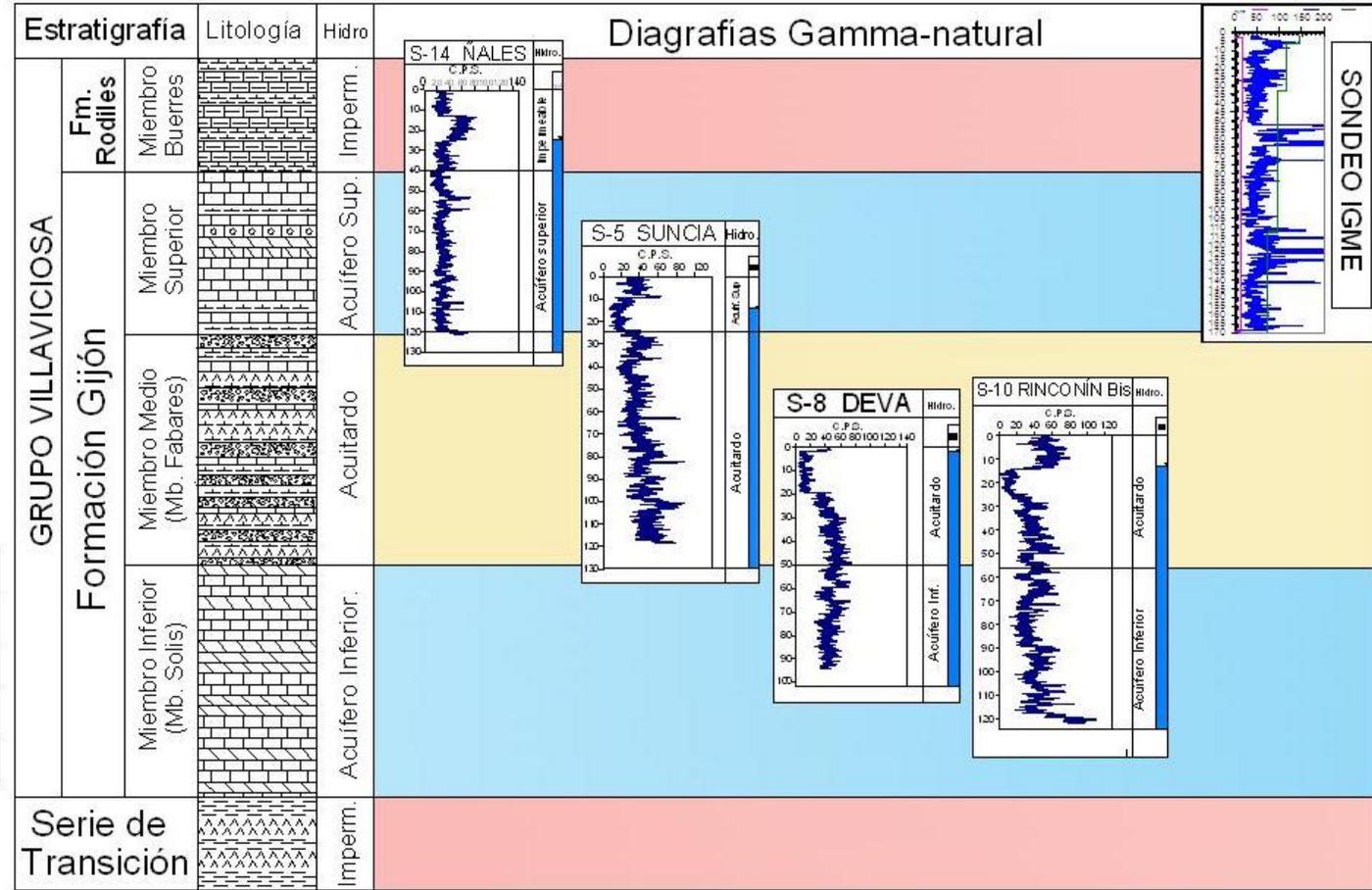


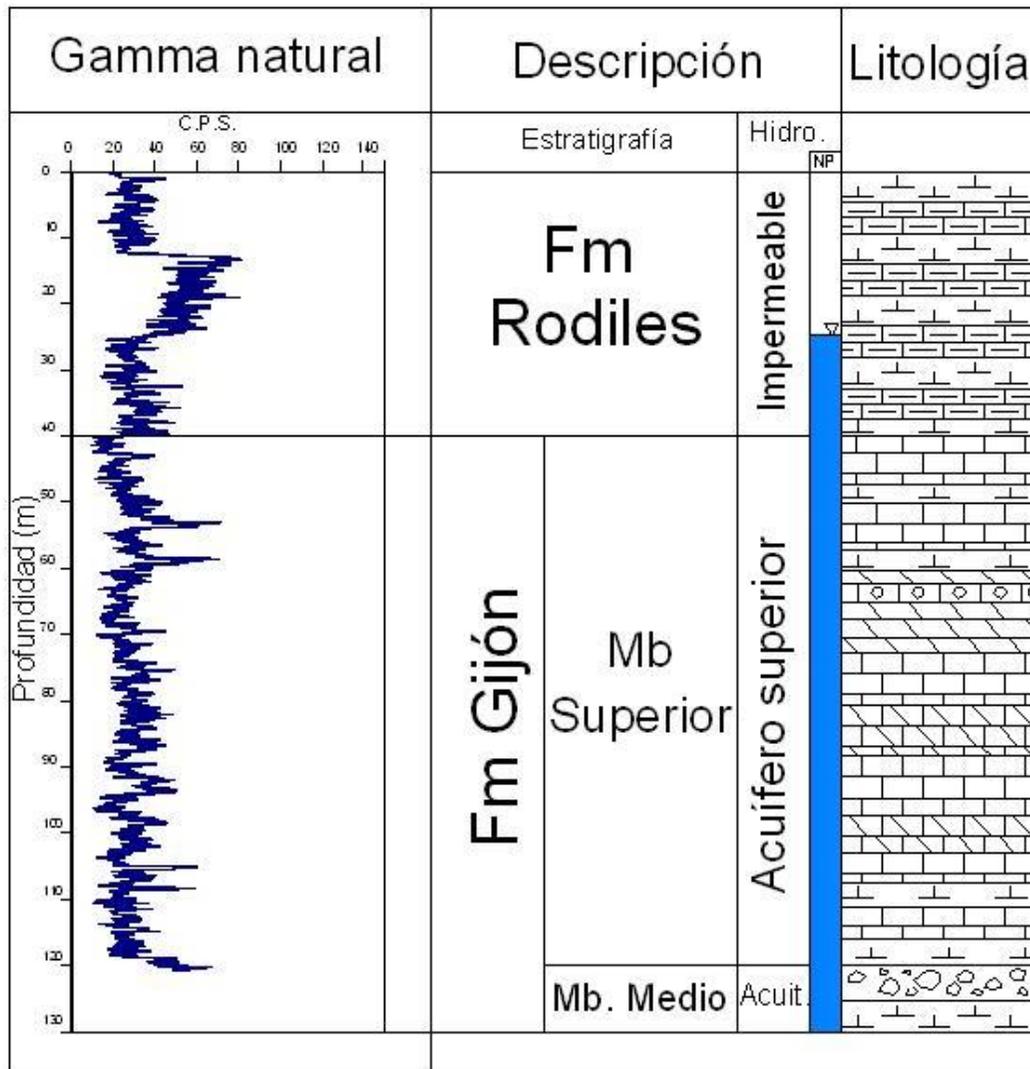
C. DIAGRAFÍAS

1. Panel Comparativo.
2. Ñales.
3. Rinconín-Bis.
4. Deva.
5. Suncia.

Leyenda

-  Margocalizas
-  Calizas dolomíticas
-  Calizas
-  Dolomías
-  Brechas
-  Margas
-  Calizas oolíticas
-  Yesos
-  Lutitas



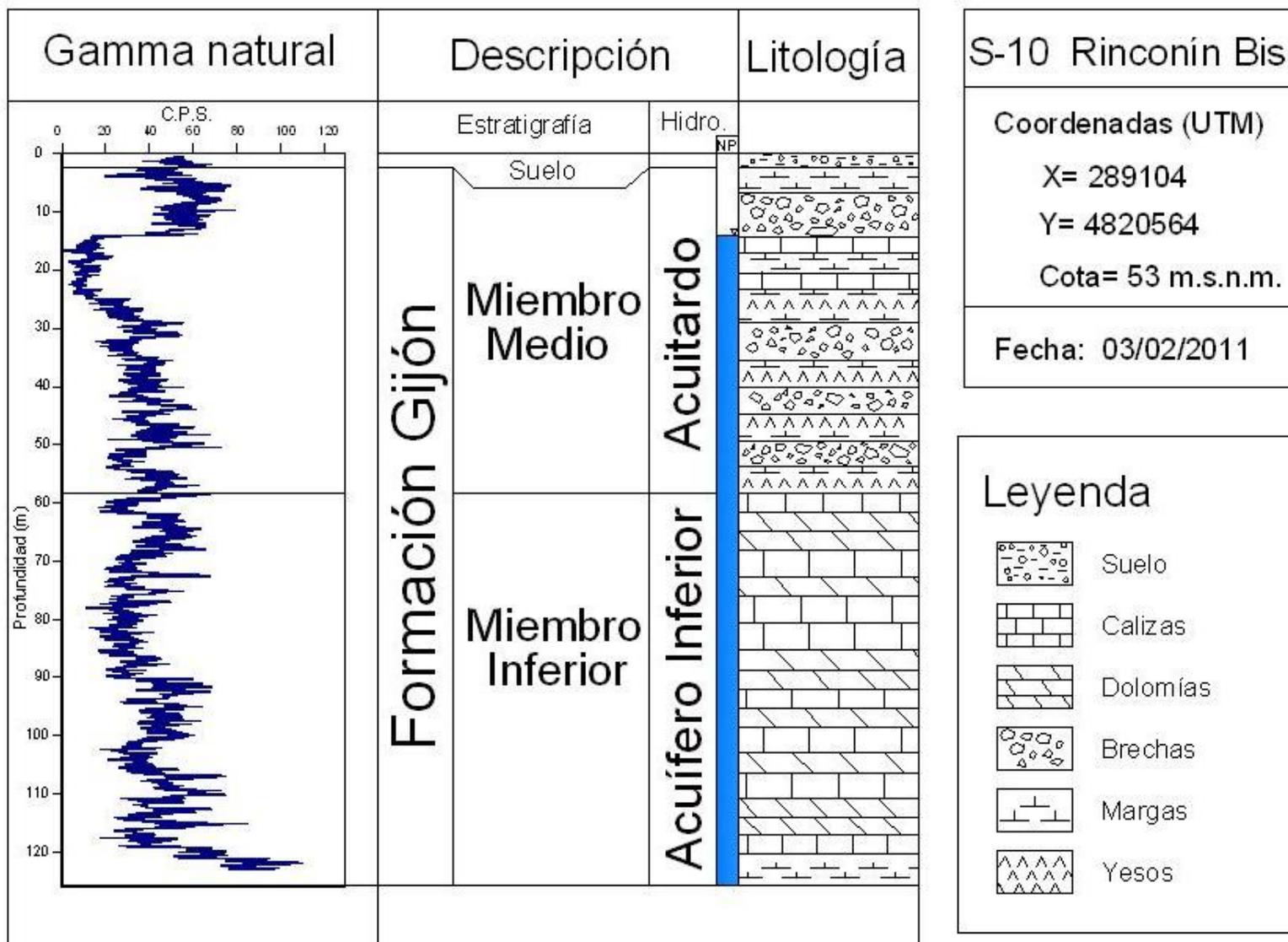


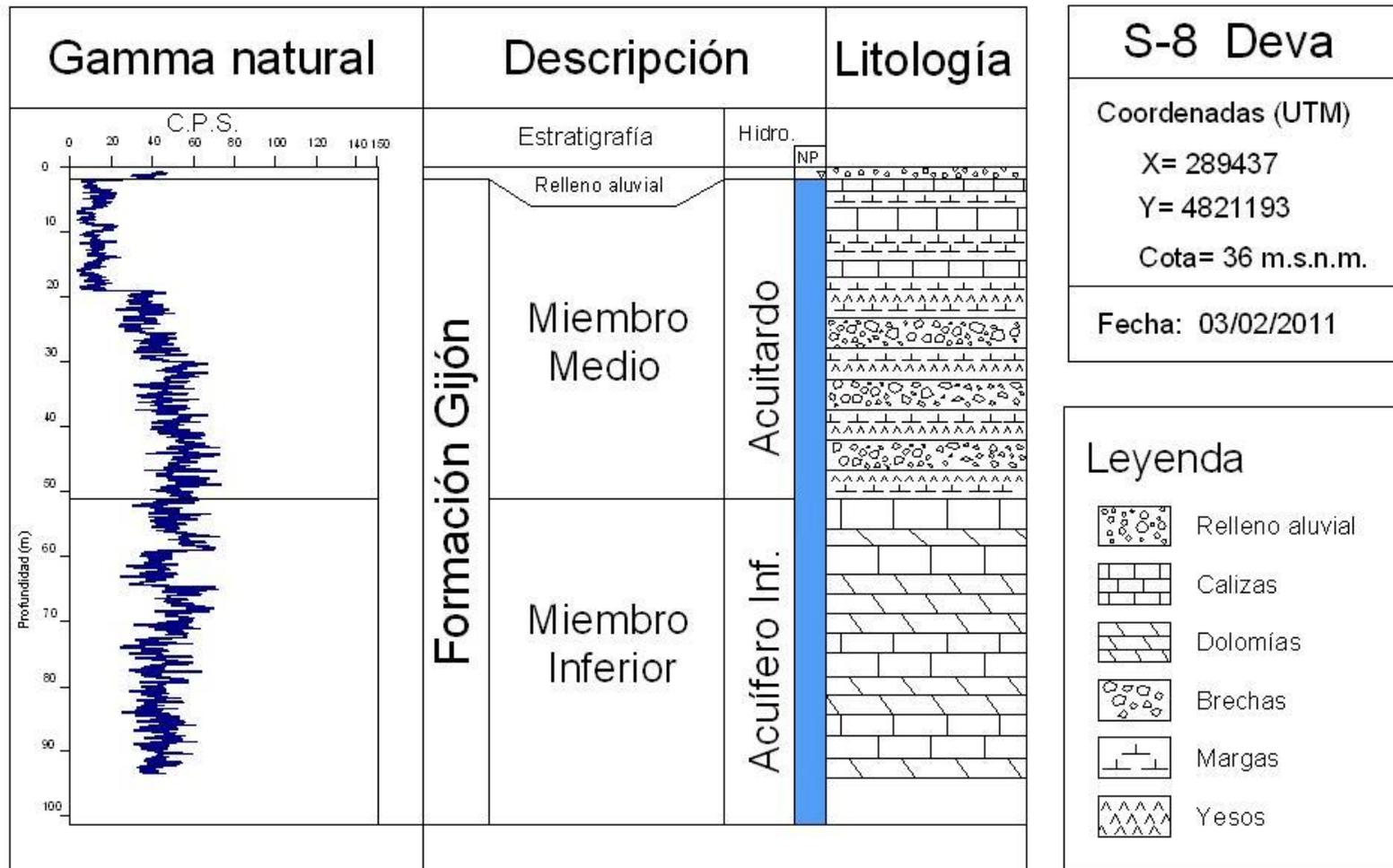
S-14 Ñales

Coordenadas (UTM)
 X= 290049
 Y= 4821134
 Cota= 67 m.s.n.m.

Fecha: 03/02/2011

- Leyenda**
- Margocalizas
 - Calizas dolomíticas
 - Calizas
 - Dolomías
 - Brechas
 - Margas
 - Calizas oolíticas





S-8 Deva

Coordenadas (UTM)

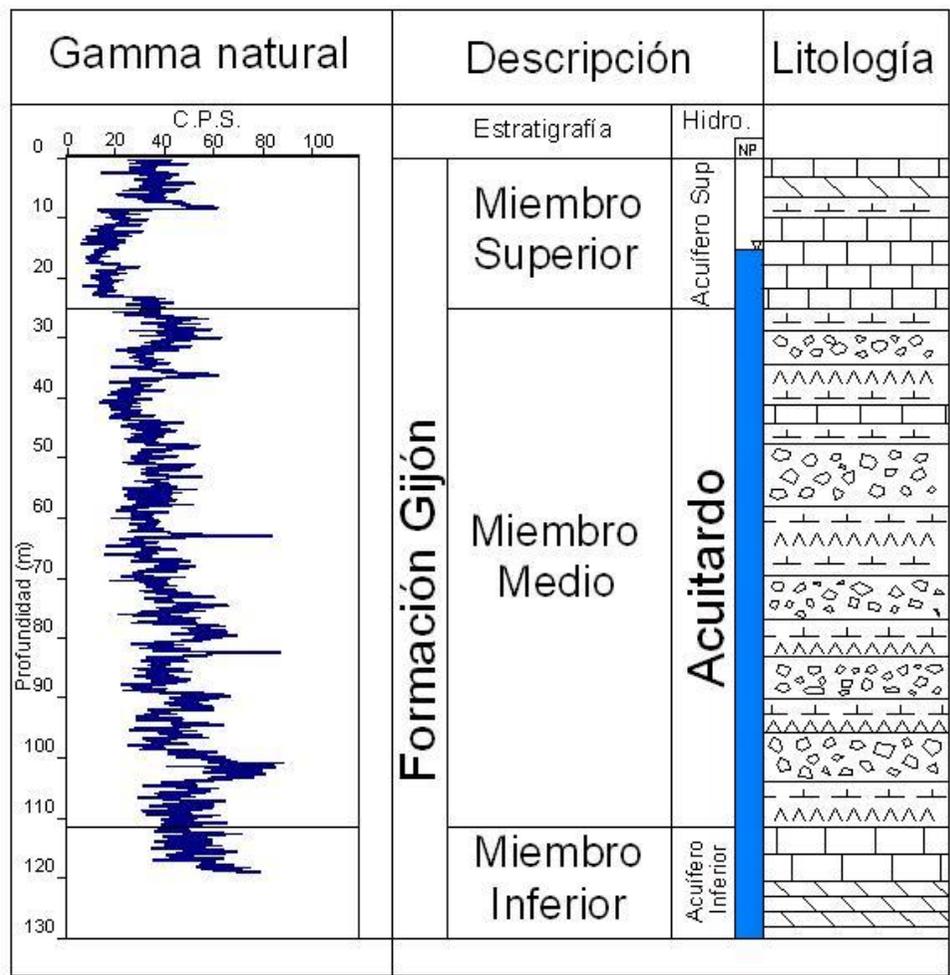
X= 289437

Y= 4821193

Cota= 36 m.s.n.m.

Fecha: 03/02/2011

- Leyenda**
-  Relleno aluvial
 -  Calizas
 -  Dolomías
 -  Brechas
 -  Margas
 -  Yesos



S-5 Suncia

Coordenadas (UTM)
 X = 288822
 Y= 4822866
 Cota= 24 m.s.n.m.

Fecha: 03/02/2011

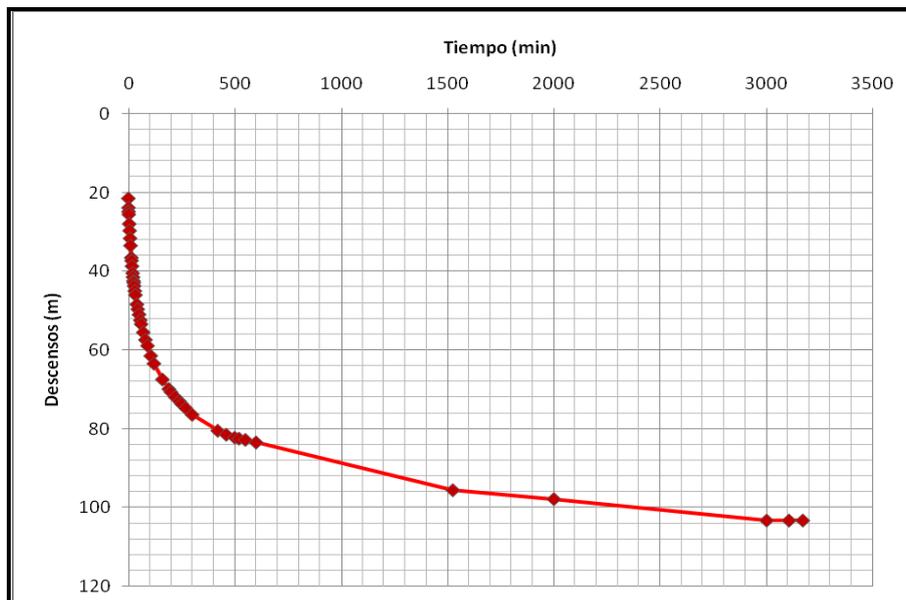


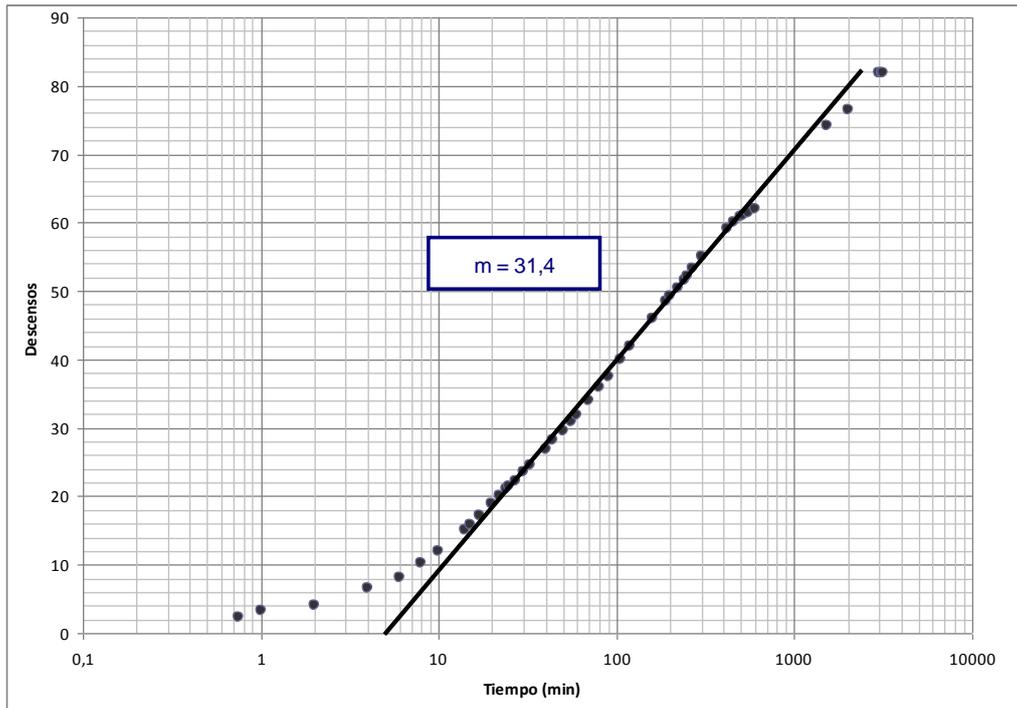
D. ENSAYOS DE BOMBEO

- a. Ensayo de bombeo del acuífero inferior.
- b. Ensayo de bombeo y recuperación del acuífero superior.

a) ENSAYO DE BOMBEO ACUÍFERO INFERIOR

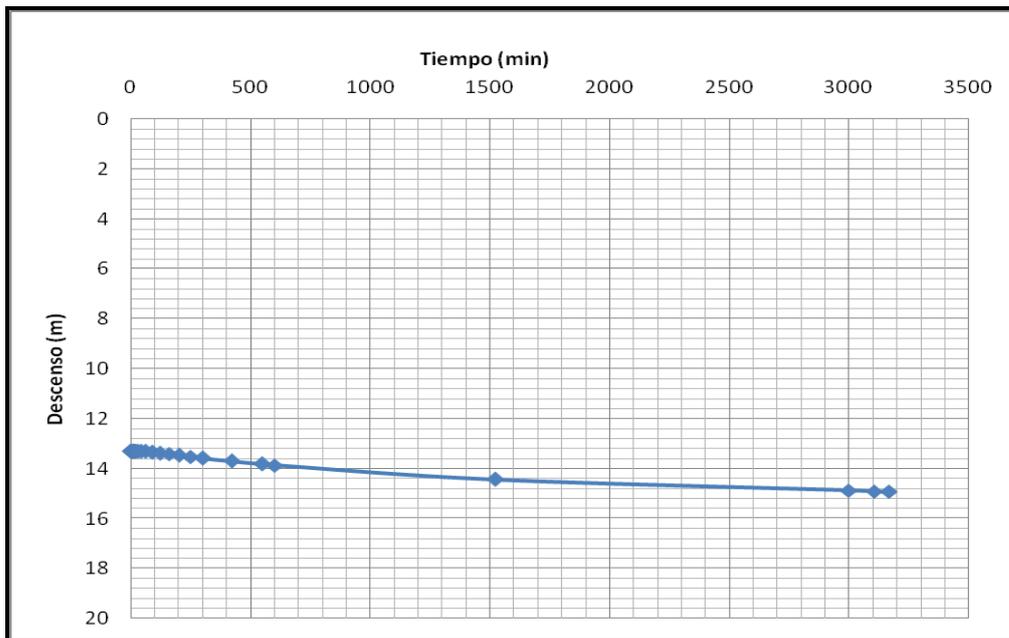
La Ería					
Tiempo (min)	Descensos (m)		Tiempo (min)	Descensos (m)	
	Respecto al sondeo	Absoluto		Respecto al sondeo	Absoluto
0	21.43	0.000	70	55.49	34.060
0.75	23.8	2.370	80	57.36	35.930
1	24.78	3.350	90	58.87	37.440
2	25.49	4.060	105	61.44	40.010
4	27.91	6.480	120	63.42	41.990
6	29.63	8.200	160	67.45	46.020
8	31.58	10.150	190	69.85	48.420
10	33.42	11.990	200	70.62	49.190
14	36.49	15.060	220	71.91	50.480
15	37.24	15.810	240	72.98	51.550
17	38.64	17.210	250	73.67	52.240
20	40.41	18.980	270	74.76	53.330
22	41.45	20.020	300	76.41	54.980
24	42.39	20.960	420	80.46	59.030
25	42.82	21.390	460	81.47	60.040
27	43.67	22.240	500	82.21	60.780
30	44.95	23.520	520	82.47	61.040
33	45.97	24.540	550	82.78	61.350
40	48.36	26.930	600	83.45	62.020
44	49.6	28.170	1525	95.58	74.150
50	50.94	29.510	2000	97.83	76.400
56	52.38	30.950	3000	103.28	81.850
60	53.39	31.960	3105	103.28	81.850





Gráfica semilogarítmica de descensos del sondeo de La Ería.

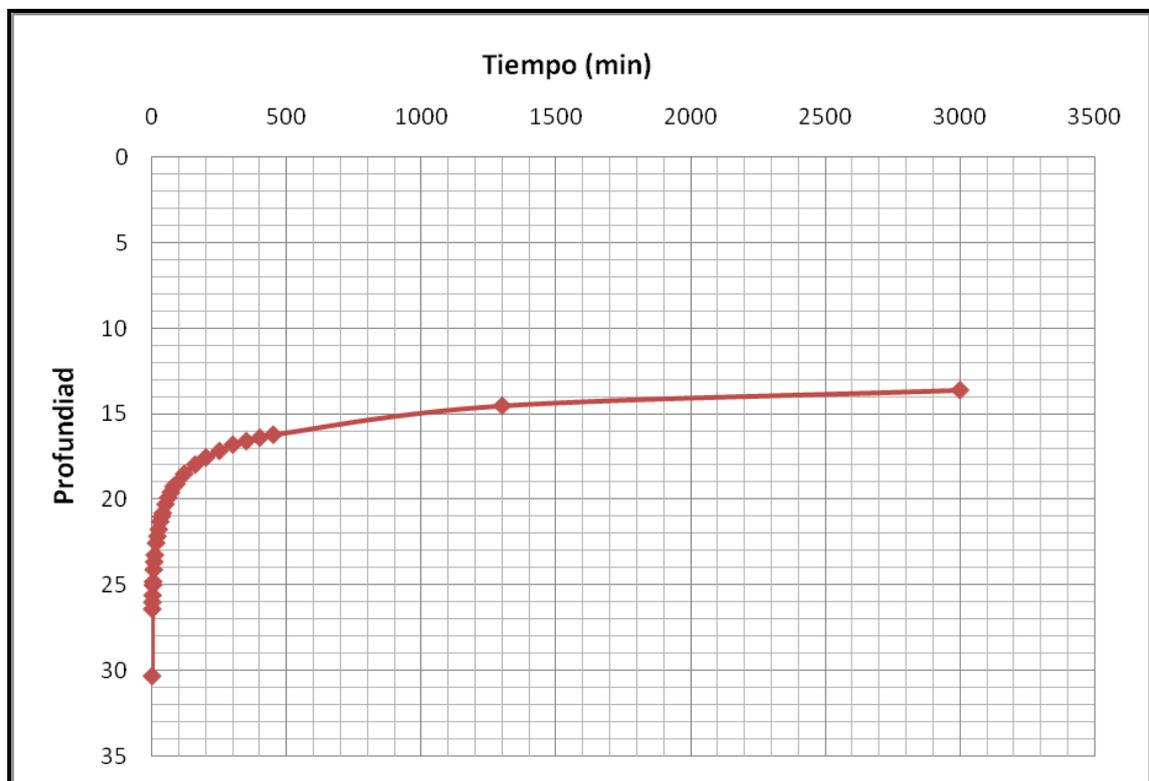
Rinconín-Bis					
Tiempo (min)	Descensos (m)		Tiempo (min)	Descensos (m)	
	Respecto al sondeo	Absoluto		Respecto al sondeo	Absoluto
0	13.31	0	90	13.34	0.03
0.75	13.31	0	120	13.38	0.07
1	13.31	0	160	13.41	0.1
2	13.31	0	200	13.47	0.16
4	13.32	0.01	250	13.53	0.22
6	13.32	0.01	300	13.58	0.27
8	13.32	0.01	420	13.70	0.39
10	13.32	0.01	550	13.82	0.51
15	13.32	0.01	600	13.87	0.56
20	13.32	0.01	1525	14.44	1.13
30	13.32	0.01	3000	14.88	1.57
40	13.32	0.01	3105	14.92	1.61
60	13.32	0.01	3170	14.92	1.61

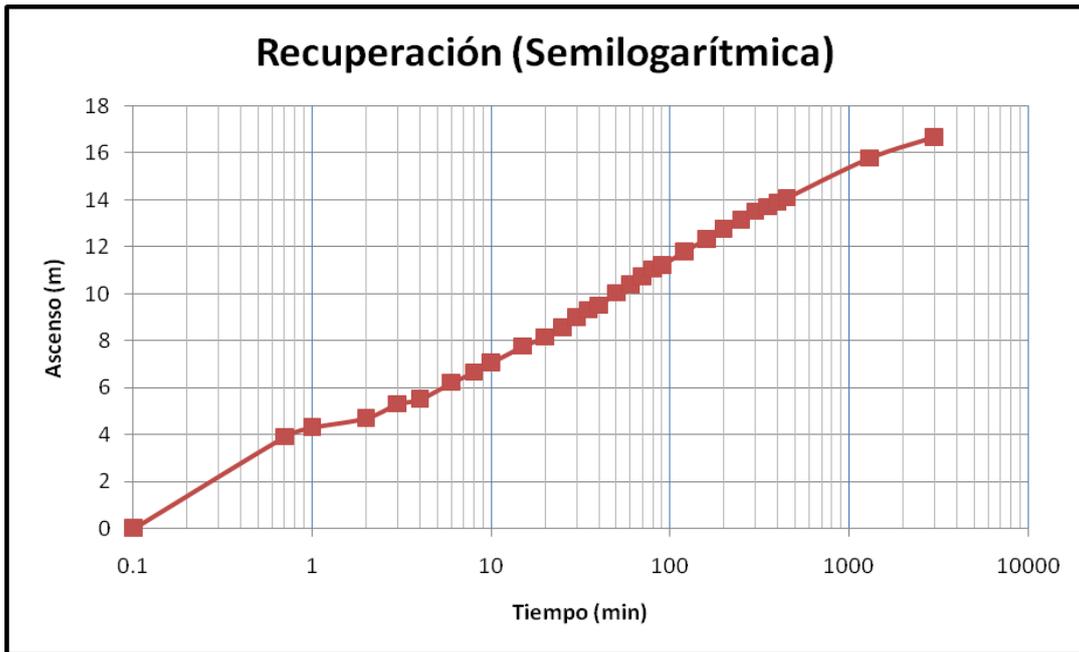


b) **ENSAYOS DE RECUPERACIÓN Y BOMBEO ACUÍFERO SUPERIOR**

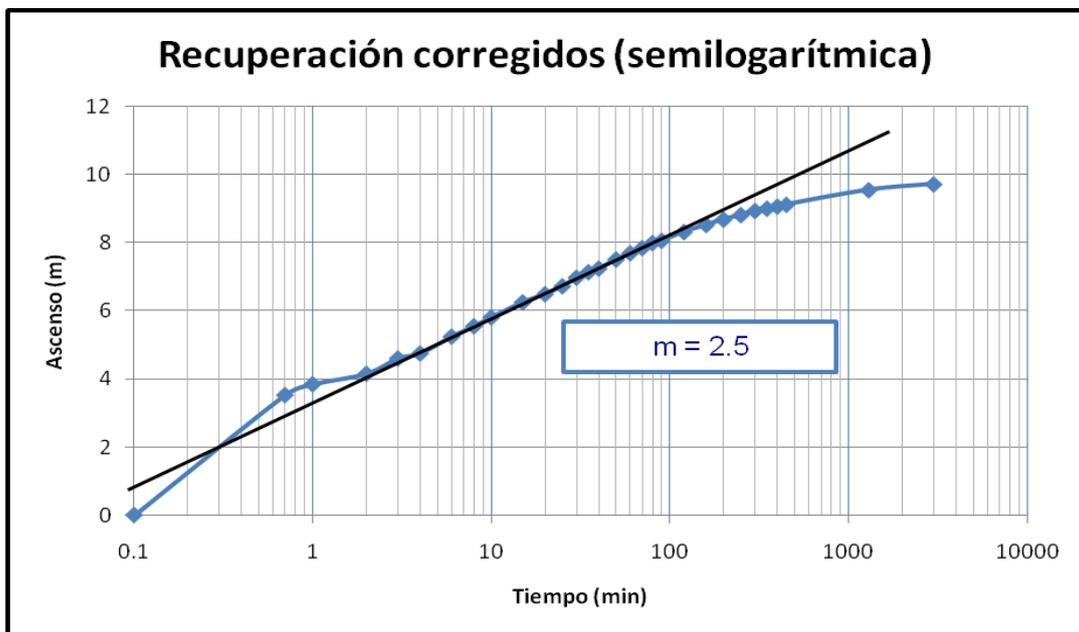
1. **ENSAYO DE RECUPERACIÓN**

Molinín					
Tiempo (min)	Niveles		Tiempo (min)	Niveles	
	Respecto a la sup.	Ascenso		Respecto a la sup.	Ascenso
0	30.31	0	50	20.28	10.03
0.7	26.4	3.91	60	19.9	10.41
1	26	4.31	70	19.58	10.73
2	25.6	4.71	80	19.25	11.06
3	25	5.31	90	19.1	11.21
4	24.8	5.51	120	18.5	11.81
6	24.1	6.21	160	17.97	12.34
8	23.65	6.66	200	17.55	12.76
10	23.25	7.06	250	17.17	13.14
15	22.55	7.76	300	16.8	13.51
20	22.15	8.16	350	16.6	13.71
25	21.75	8.56	400	16.4	13.91
30	21.3	9.01	450	16.22	14.09
35	21	9.31	1300	14.53	15.78
40	20.8	9.51	3000	13.62	16.69



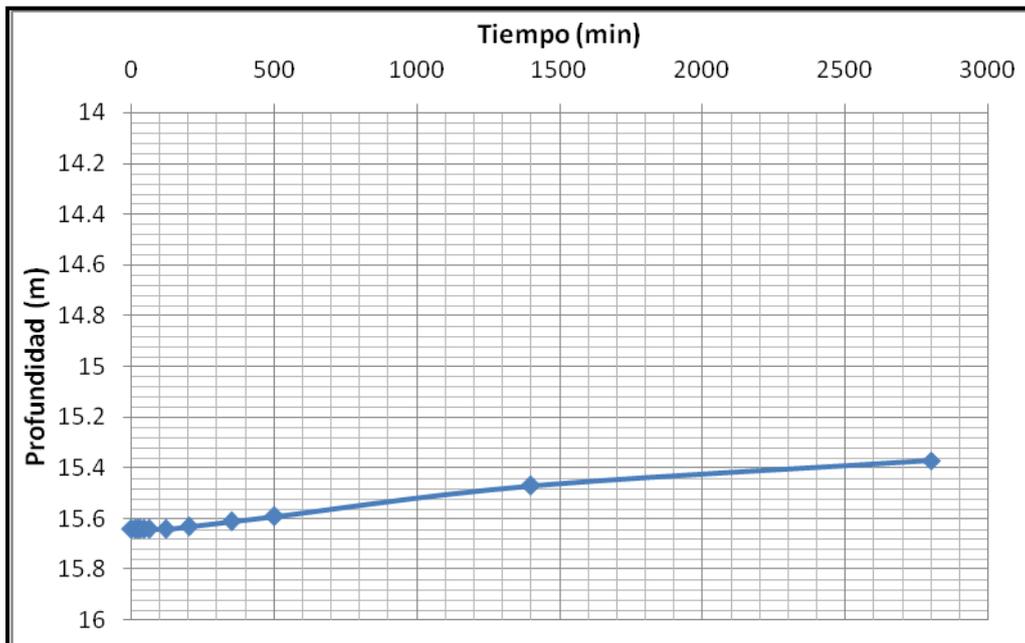


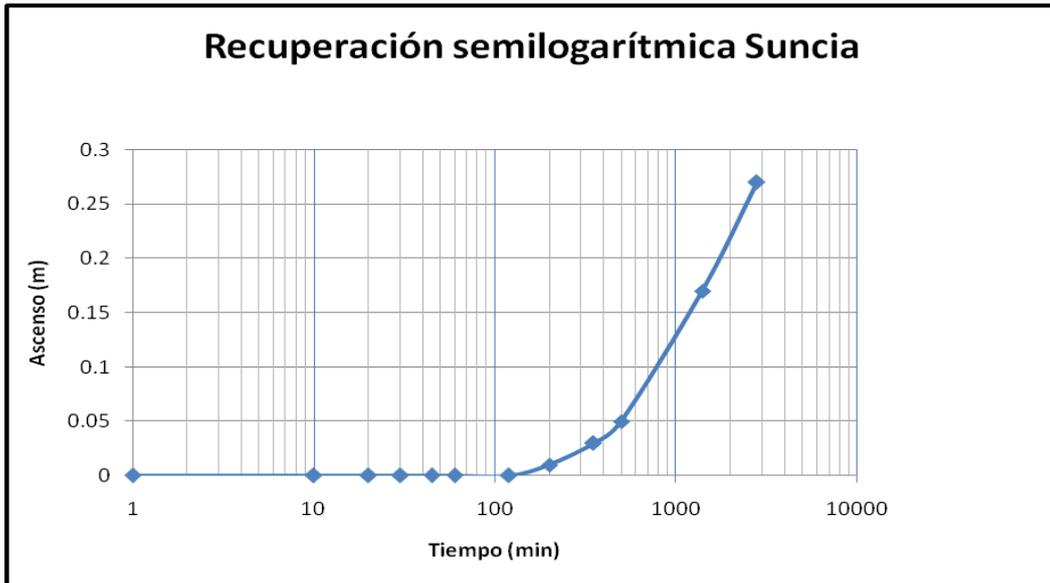
Semilogarítmica para la recuperación del sondeo del Molinín



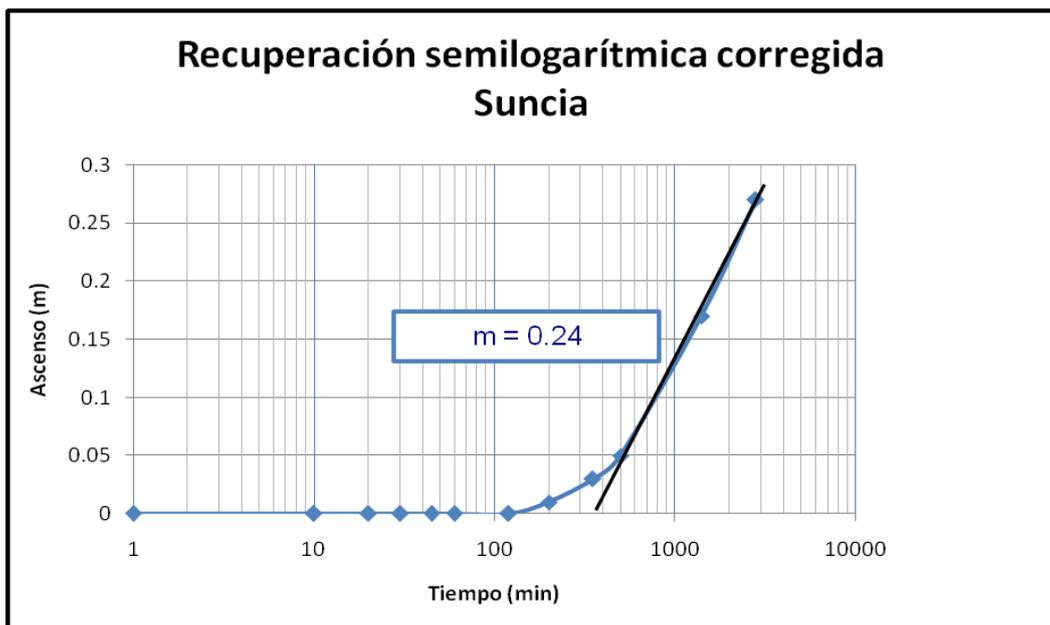
Semilogarítmica corregida por Dupuit para la recuperación del sondeo del Molinín

SUNCIA					
Tiempo (min)	Niveles		Tiempo (min)	Niveles	
	Respecto a la sup.	Ascenso		Respecto a la sup.	Ascenso
0	15.64	0	120	15.64	0
10	15.64	0	200	15.63	0.01
20	15.64	0	350	15.61	0.03
30	15.64	0	500	15.59	0.05
45	15.64	0	1400	15.47	0.17
60	15.64	0	2800	15.37	0.27





Semilogarítmica para la recuperación del sondeo de Suncia



Semilogarítmica corregida por Dupuit para la recuperación del sondeo de Suncia

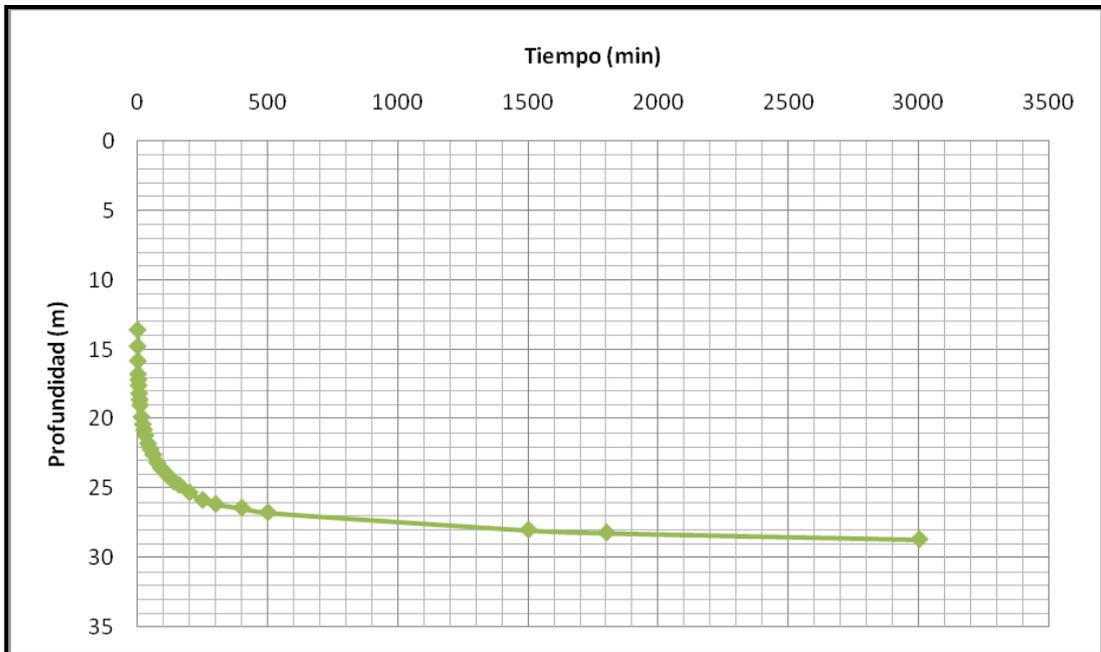
Prácticamente no existe variación entre los valores son corregir y los corregidos.

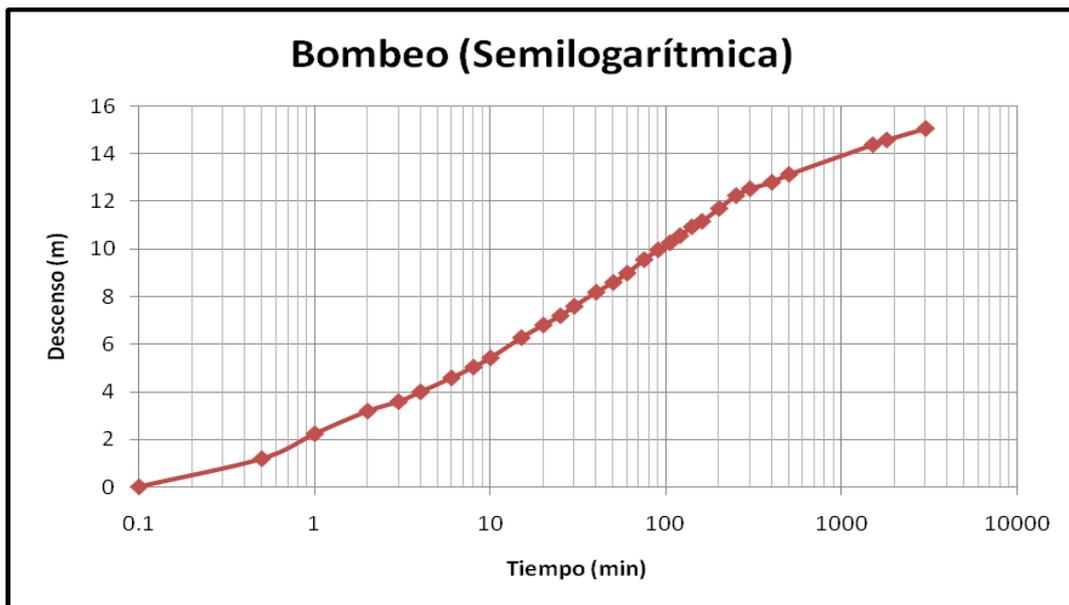
- En el sondeo S-5 de Pecuaría no se registraron variaciones significativas asociadas al ensayo:

Nivel freático con valores de 14.15 ± 0.02 m.s.n.m.

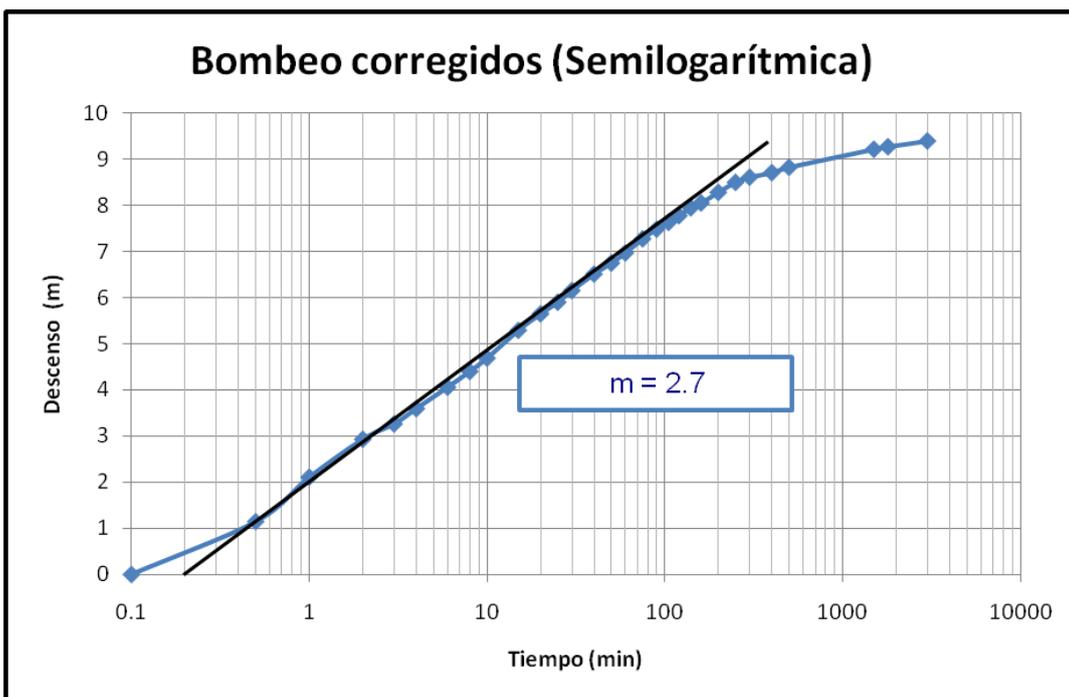
ENSAYO DE BOMBEO

MOLINÍN					
Tiempo (min)	Niveles		Tiempo (min)	Niveles	
	Respecto a la sup.	Descenso		Respecto a la sup.	Descenso
0	13.62	0	60	22.6	8.98
0.5	14.8	1.18	75	23.17	9.55
1	15.85	2.23	90	23.58	9.96
2	16.8	3.18	105	23.88	10.26
3	17.2	3.58	120	24.18	10.56
4	17.61	3.99	140	24.55	10.93
6	18.2	4.58	160	24.78	11.16
8	18.65	5.03	200	25.32	11.7
10	19.04	5.42	250	25.86	12.24
15	19.89	6.27	300	26.15	12.53
20	20.42	6.8	400	26.42	12.8
25	20.81	7.19	500	26.75	13.13
30	21.21	7.59	1500	28	14.38
40	21.8	8.18	1800	28.2	14.58
50	22.21	8.59	3000	28.68	15.06



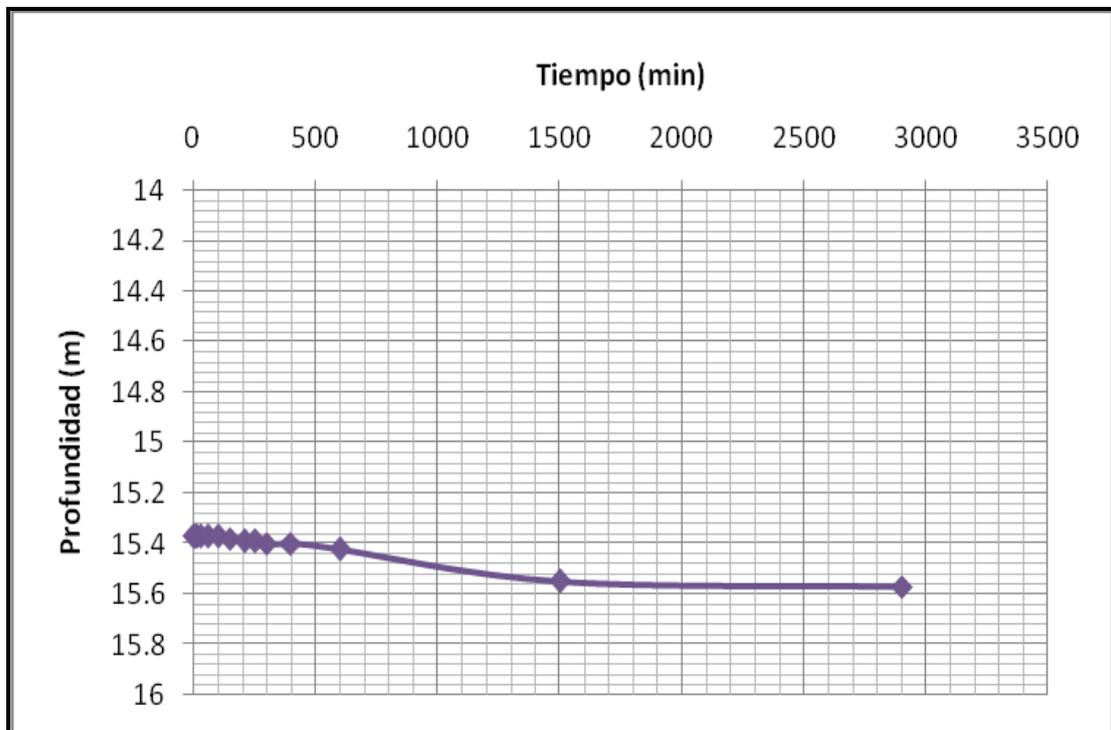


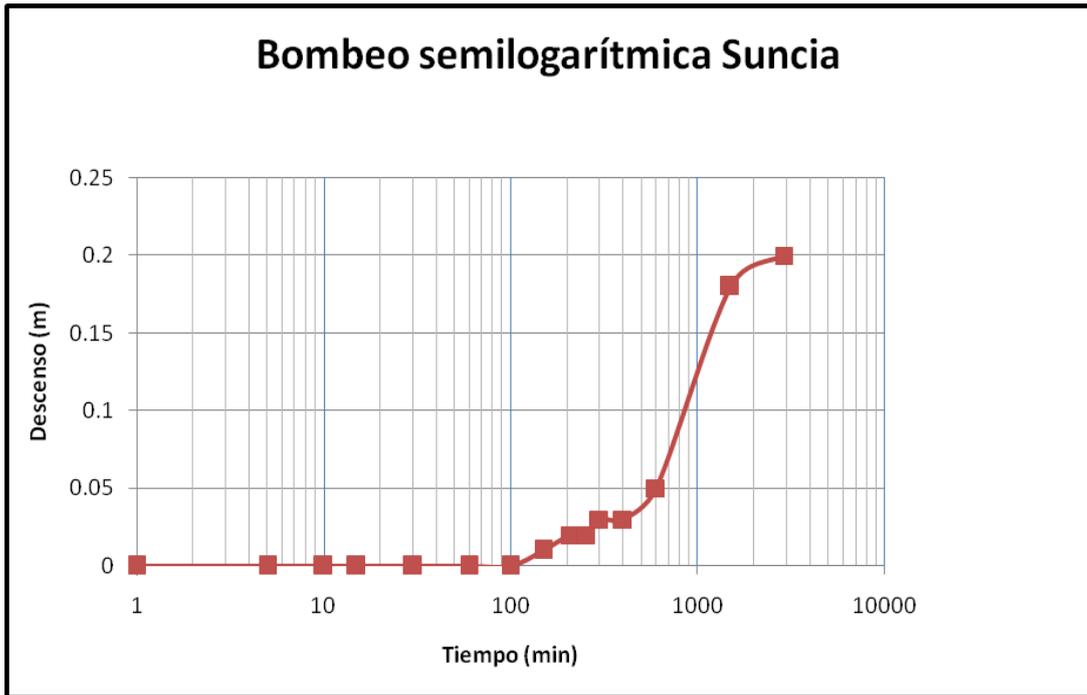
Semilogarítmica para el bombeo del sondeo del Molinín



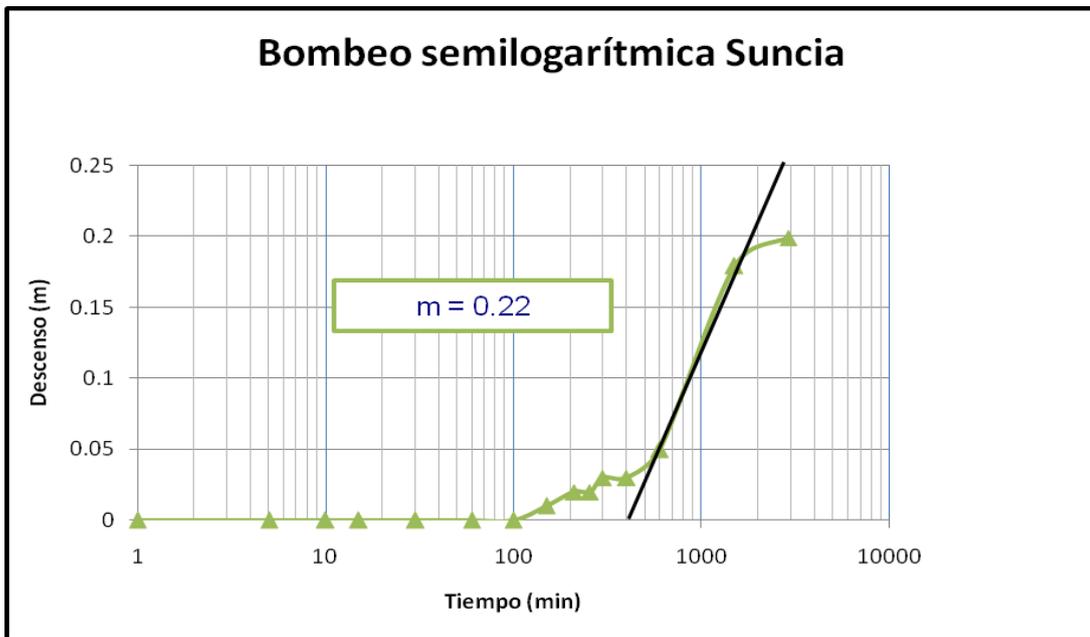
Semilogarítmica corregida por Dupuit para el bombeo del sondeo del Molinín

SUNCIA					
Tiempo (min)	Niveles		Tiempo (min)	Niveles	
	Respecto a la sup.	Descenso		Respecto a la sup.	Descenso
0	15.37	0	210	15.39	0.02
10	15.37	0	255	15.39	0.02
15	15.37	0	300	15.40	0.03
30	15.37	0	400	15.40	0.03
60	15.37	0	600	15.42	0.05
100	15.37	0	1500	15.55	0.18
150	15.38	0.01	2900	15.57	0.20





Semilogarítmica para el bombeo del sondeo de Suncia



Semilogarítmica corregida por Dupuit para el bombeo del sondeo de Suncia

- En el sondeo S-5 de Pecuaría no se registraron variaciones significativas asociadas al ensayo:

Nivel freático a 14.12 ± 0.02 m.s.n.m.

RECUPERACIÓN vs. BOMBEO

