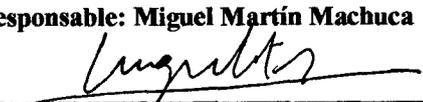




INFORME	Identificación: Abastecimiento, emergencia, sequía aguas subterráneas, Sevilla H.8.006.03
	Fecha: Diciembre de 2002
TÍTULO ESTUDIO DE LA INCORPORACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS AL SISTEMA DE EMERGENCIA DEL ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE SEVILLA Y SU ÁREA DE INFLUENCIA	
PROYECTO Operación Comercial: ESTUDIO DE LA INCORPORACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS AL SISTEMA DE EMERGENCIA DEL ABASTECIMIENTO DE LA CIUDAD DE SEVILLA Y SU ÁREA DE INFLUENCIA	
RESUMEN <p>Investigación de los recursos de aguas subterráneas disponibles en el entorno de la ciudad de Sevilla y su área de influencia para complementar su sistema de emergencia del abastecimiento. Las unidades seleccionadas, previo estudio de todas las posibilidades, han sido la 05.49 Mioceno de Base y la zona sur de la 05.50 Aljarafe. En ellas se han llevado a cabo tareas de investigación mediante técnicas de teledetección y geología estructural, campaña geofísica mediante sondeos eléctricos verticales, campaña de sondeos mecánicos de investigación y estudio hidroquímico comarcal.</p> <p>El resultado de las investigaciones ha sido la propuesta de sendas zonas prioritarias para la ejecución de sondeos futuros de explotación en cada unidad, consistentes en el caso del Mioceno de Base, en una batería de entre 5 y 8 sondeos con una aportación estimada de 400 l/s, en el entorno del arroyo Mudapelo y la población de El Viar. En el caso del Aljarafe Sur, se propone la construcción de un batería de 5 a 6 sondeos de explotación entre la Venta el Cruce y Casa de Neves, con una aportación estimada de 300 l/s.</p> <p>Finalmente, el estudio contempla un análisis de la situación hidroquímica de las aguas de las zonas propuestas, en la que se obtienen interesantes conclusiones a cerca del problema de salinización de dichas aguas con aguas fósiles muy salinizadas.</p>	
Revisión Nombre: Juan Antonio López Geta Unidad: Hidrogeología y Aguas Subterráneas Fecha:	Autores: Manuel Vázquez Mora y Raquel Morales García   Responsable: Miguel Martín Machuca 



MINISTERIO
DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA



Instituto Geológico
y Minero de España

62668 (II)

**ESTUDIO DE LA INCORPORACIÓN DE LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS AL SISTEMA DE EMERGENCIA
DEL ABASTECIMIENTO A LA CIUDAD DE SEVILLA
Y SU ÁREA DE INFLUENCIA**

TOMO I: ACUÍFERO MIOCENO DE BASE. MEMORIA

Este proyecto ha sido realizado por el **Instituto Geológico y Minero de España (IGME)** para la **Empresa Municipal de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla (EMASESA)**.

En la realización del presente proyecto han participado los siguientes técnicos del IGME:

Responsable del Proyecto: D. Miguel Martín Machuca. Ingeniero de Minas. Oficina del IGME en Sevilla.

Equipo de realización: D. Manuel Vázquez Mora. Ingeniero de Minas. Oficina del IGME en Sevilla.

D^a. Raquel Morales García. Geóloga. Oficina del IGME en Sevilla

Apoyo Técnico: D^a Carmen Antón Pacheco. Geóloga. Departamento de Teledetección. IGME Madrid.

D. Félix M. Rubio Sánchez-Aguililla. Ingeniero de Minas. Departamento de Geofísica. IGME Madrid.

D. Diego Martín Sosa. Ingeniero Técnico de Minas. Oficina del IGME en Sevilla.

D. Alfonso Rodríguez Pastor. Ingeniero Técnico de Minas. Oficina del IGME en Sevilla.

En Sevilla a 27 de noviembre de 2.002.

INDICE

1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y LÍMITES DEL ESTUDIO	4
3.- OBJETIVOS CONCRETOS DEL PROYECTO	6
4.- METODOLOGÍA Y TÉCNICAS EMPLEADAS EN EL ESTUDIO	7
5.- GEOLOGÍA.....	10
5.1.- MARCO GEOLÓGICO.....	10
5.2.- ESTRATIGRAFÍA Y LITOLOGÍA.....	11
5.2.1.- ZÓCALO PALEOZOICO	11
5.2.2.- MIOCENO SUPERIOR	14
5.2.3.- CUATERNARIO	16
5.3.- TECTÓNICA Y ESTRUCTURA DEL ACUÍFERO.....	16
5.3.1.- TELEDETECCIÓN Y TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS	17
5.4.- HISTORIA GEOLÓGICA Y EVOLUCIÓN TECTOSEDIMENTARIA	21
6.- HIDROGEOLOGÍA	22
6.1.- CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA DE LOS MATERIALES.....	22
6.2.- LA UNIDAD HIDROGEOLOGICA 05.49.....	24
6.3.- GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO.....	25
6.3.1.- DISPOSICIÓN GENERAL	25
6.3.2.- DEFINICIÓN GEOMÉTRICA.....	26
6.3.3.- RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN MECÁNICA Y GEOFÍSICA	42
6.4.- FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLOGICO.....	44
6.4.1.- RECARGA Y DESCARGA	44
6.4.2.- PIEZOMETRÍA	44
6.4.3.-PARÁMETROS HIDROGEOLOGICOS	54
7.- HIDROQUÍMICA	55
7.1.- DATOS DE PARTIDA.....	55
7.2.- CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL ACUÍFERO	57
7.3.- EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LAS AGUAS	80
7.4.- CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	86
7.5.- CONCLUSIONES.....	93
8.- BALANCE HÍDRICO. RECURSOS DISPONIBLES.....	95

8.1.- DETERMINACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL BALANCE	95
8.1.1.- ENTRADAS	95
8.1.1.1.- RECARGA DIRECTA.....	96
8.1.1.2.- RECARGA DESDE LOS CAUCES.....	97
8.1.1.3.-RETORNOS DE RIEGO.....	101
8.1.2.- SALIDAS.....	101
8.1.2.1.- REGADÍOS	101
8.1.2.2.- ABASTECIMIENTO URBANO.....	103
8.1.2.3.- MANANTIALES	104
8.2.- ENSAYO DE BALANCE HÍDRICO	104
8.3.- VALIDEZ DE LOS CÁLCULOS TEÓRICOS	104
8.4.- RESERVAS Y RECURSOS DISPONIBLES	107
9.- VIABILIDAD DE LA RECARGA ARTIFICIAL.....	109
9.1.- JUSTIFICACIÓN DE UNA OPERACIÓN DE RECARGA ARTIFICIAL	109
9.2.- EVALUACIÓN DE APORTACIONES Y DETERMINACIÓN DE EXCEDENTES HÍDRICOS	112
9.2.1.- ORIGEN DEL AGUA DE RECARGA. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS APORTACIONES: VOLUMEN ANUAL POTENCIALMENTE APROVECHABLE	112
9.2.2.- DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LAS APORTACIONES: CAUDAL POTENCIALMENTE APROVECHABLE.....	114
9.2.3.- CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD Y VARIABILIDAD TEMPORAL DEL AGUA DE RECARGA	119
9.3.- ESTUDIO DEL MEDIO ACUÍFERO: SELECCIÓN DE LAS ZONAS MÁS FAVORABLES	120
9.4.- MÉTODO DE RECARGA	122
10.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
10.1.- CONCLUSIONES.....	124
10.2.- RECOMENDACIONES.....	128
11.- BIBLIOGRAFÍA	130

ANEXOS

ANEXO I.- MAPA GEOLÓGICO

ANEXO II.- TELEDETECCIÓN Y TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS

ANEXO III.- INVENTARIO DE PUNTOS ACUÍFEROS

ANEXO IV.- CAMPAÑA DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

ANEXO V.- SONDEOS MECÁNICOS DE INVESTIGACIÓN.

ANEXO VI.- CALIDAD DE LAS AGUAS. ANÁLISIS QUÍMICOS

ANEXO VII.- DATOS ASOCIADOS AL BALANCE HÍDRICO

ANEXO VIII.- PROYECTO DE EJECUCIÓN DE SONDEOS

ANEXO IX.- PIEZOMETRÍA

1.- INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se enmarca dentro de las labores de asesoramiento a las Administraciones Públicas en materia de aguas subterráneas que tiene el Instituto Geológico y Minero de España (en adelante IGME) de acuerdo con sus estatutos actuales de funcionamiento.

En este sentido, la Empresa Municipal de Abastecimiento y Saneamiento de Sevilla (en adelante EMASESA) hace, a principios de 2.001, el encargo al IGME de la realización de un proyecto en el que se estudie la incorporación potencial de las aguas subterráneas al sistema de emergencia de abastecimiento de Sevilla y su metrópolis, comenzándose los trabajos del mismo a primeros de abril de 2.001.

La existencia de recursos de aguas subterráneas en cantidad y calidad suficientes, próximos a sistemas de abastecimientos a poblaciones, ha permitido la incorporación y utilización con éxito de esta fuente de suministro como alternativa complementaria en situaciones especialmente adversas, como fue la última gran sequía sufrida a principios y mediados de los noventa.

La experiencia ha demostrado que en la actualidad, cuando las circunstancias de sequía son especialmente adversas, la ciudad de Sevilla y su área de influencia no tienen totalmente garantizado su abastecimiento en cantidad y calidad.

La existencia de acuíferos, de características hidrogeológicas favorables, y próximos a las instalaciones de transporte y distribución de agua del sistema de abastecimiento de Sevilla y su metrópolis, aconsejan la realización de los estudios necesarios que permitan conocer con detalle y evaluar con la suficiente precisión y garantía la posible incorporación de las aguas subterráneas al citado sistema de abastecimiento como alternativa complementaria y coyuntural. Considerando la incorporación de las aguas subterráneas como una actividad de uso conjunto que incluya tanto las extracciones como la posible recarga artificial del acuífero en determinadas épocas con excedentes de aguas superficiales.

El IGME posee una amplia experiencia y es pionero en los estudios hidrogeológicos en la cuenca del Guadalquivir, contando con presencia continua en la región desde 1967 año en que comenzaron los primeros estudios dentro de los proyectos financiados por la FAO para

el desarrollo de la agricultura mediante el uso de las aguas subterráneas.

La Oficina de Proyectos del IGME en Sevilla viene colaborando con las Administraciones Autonómicas y Locales en el asesoramiento en materia de aguas subterráneas para el abastecimiento urbano desde 1977.

En esa fecha se iniciaron los primeros proyectos, dentro del Plan Nacional de Abastecimiento a Núcleos Urbanos (PANU), para incrementar las garantías para el abastecimiento de Sevilla capital. A continuación, en 1981, en el marco de un convenio de colaboración con la Diputación Provincial de Sevilla, se realiza un proyecto para complementar el abastecimiento a la Mancomunidad del Aljarafe, coyunturalmente o en periodos de sequía, que culmina con la realización de una batería de sondeos de explotación que siguen cumpliendo su misión en la actualidad.

El IGME ya ha realizado trabajos similares al presente, durante la sequía del 92-95, en la Sierra de Cádiz, para el abastecimiento a la Bahía de Cádiz, en la Vega de Granada, para el abastecimiento a Granada y en la zona del río Víboras para el abastecimiento a Jaén. En los citados estudios se han aplicado las técnicas que se pretenden utilizar en éste, desde técnicas hidrogeológicas básicas hasta técnicas geofísicas, sondeos mecánicos para investigación y bombeos de ensayo.

Además, dentro de la filosofía de uso conjunto, hay que destacar que, por un lado, en los proyectos anteriores también se buscaba la proximidad de las captaciones de aguas subterráneas a las conducciones de aguas superficiales (debido en aquel caso, a la emergencia de la situación) y por otro lado, en los últimos años el IGME ha realizado diversos proyectos de recarga artificial, algunos de ellos en Andalucía (Mazagón, Guadajoz, Los Sotillos, Dehesas de Guadix) y otros en el Levante (Jijona, Orba, Jávea, Gandía-Denia, río Girona, etc).

La ciudad de Sevilla se encuentra situada en un lugar preferente en cuanto a la presencia de aguas subterráneas en su entorno inmediato, ya que está asentada sobre el acuífero Aluvial del Guadalquivir, Unidad Hidrogeológica 05. 47 y la rodean los acuíferos Sevilla-Dos Hermanas-Carmona Unidad Hidrogeológica 05. 46 al este y al sur y el acuífero Aljarafe, Unidad Hidrogeológica 05.50 al oeste. Además, a muy poca distancia del área metropolitana se encuentran los acuíferos Niebla-Posadas, Unidad Hidrogeológica 05.49 y Almonte-Marismas Unidad Hidrogeológica 05.51.

De entre todos estos acuíferos, siguiendo criterios de cantidad y calidad disponibles en cada uno de ellos, de las respuestas esperadas de su explotación en periodos de sequía, de su grado de protección contra la contaminación y de la proximidad a las redes de transporte y distribución del abastecimiento, se eligieron para acometer este estudio las Unidades Hidrogeológicas 05.49 Niebla-Posadas, 05.50 Aljarafe y 05.51 Almonte-Marismas. Si bien en los tres casos se seleccionaron unas áreas determinadas de cada unidad, que en el caso de la U.H. 05.49 Niebla-Posadas fue el tramo comprendido entre Guillena y Villanueva del Río y Minas, ya que el resto del acuífero se aleja demasiado de la zona metropolitana de Sevilla. En el caso de la U.H. 05.50 Aljarafe se seleccionó la zona sur del mismo porque en ella es dónde existen menos explotaciones y cabe esperar más recursos disponibles y finalmente, en la U.H. 05.51 Almonte-Marismas se seleccionó la zona más próxima al área metropolitana de Sevilla.

La disposición de los documentos de este proyecto consta de dos volúmenes en los que se abordan separadamente los estudios de las áreas correspondientes a las U.H.05.49 Niebla-Posadas por un lado y U.H. 05.50 Aljarafe y U.H. 05.51 Almonte-Marismas por otro. Un tercer volumen contiene el proyecto de ejecución de las labores propuestas.

2.- SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y LÍMITES DEL ESTUDIO

La Unidad Hidrogeológica Niebla - Posadas se localiza, en su mayor parte, dentro de la Cuenca del Guadalquivir (05). Sólo su sector más occidental forma parte de la Cuenca del Guadiana (04). Por tanto, a efectos administrativos de gestión por el Organismo de Cuenca correspondiente, recibe una doble designación:

- U.H. 04.13 - Niebla - Posadas. Sector de la Cuenca del Guadiana.
- U.H. 05.49 - Niebla - Posadas. Sector de la Cuenca del Guadalquivir.

Ésta Unidad se sitúa en el contacto del borde meridional de la Meseta (Sierra Morena) y el borde septentrional de la Depresión del Guadalquivir y se extiende desde la localidad de Niebla (Huelva) hasta Posadas (Córdoba), ocupando parte de las provincias de Huelva, Sevilla y Córdoba (Figura 1).



Figura 1.- Situación administrativa de la U.H. Niebla - Posadas

La zona de estudio corresponde al sector central de esta unidad y se localiza íntegramente en la provincia de Sevilla (Hojas Topográficas E:1:50.000 IGN, N° 962 Alcalá del Río y N° 963 Lora del Río). Comprende la región situada entre la Ribera de Huelva al O y la Ribera del Hueznar al E, ambos afluentes del río Guadalquivir, y se extiende en dirección NE desde la localidad de Guillena hasta Villanueva del Río y Minas (Figura 2).

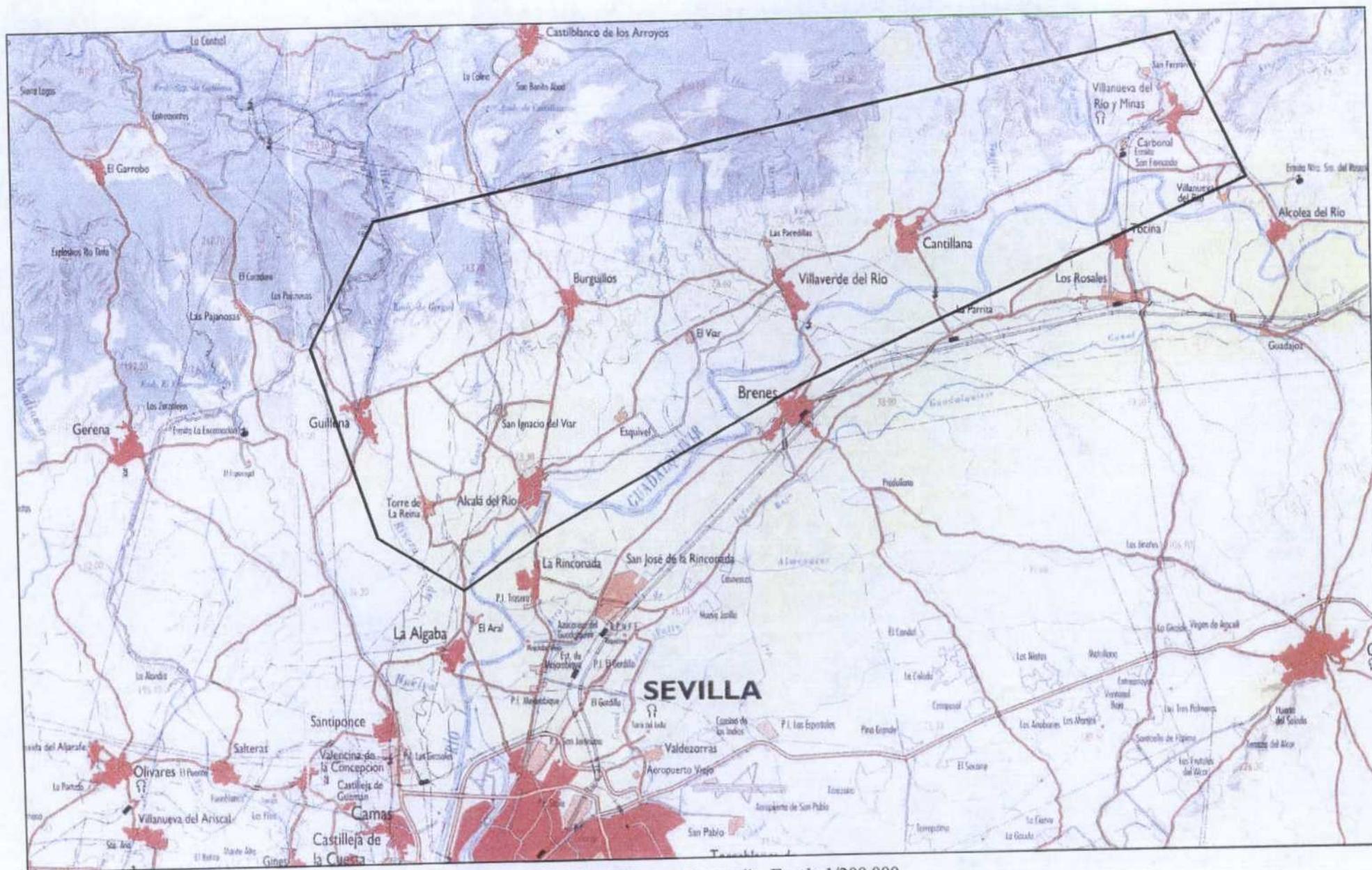


Figura 2.- Situación de la zona de estudio. Escala 1/200.000

3.- OBJETIVOS CONCRETOS DEL PROYECTO

El objetivo del presente estudio es disponer de un proyecto de ejecución que sirva para la realización, en un momento determinado, de las obras necesarias para complementar con aguas subterráneas, en casos de emergencia, el sistema de abastecimiento de la ciudad de Sevilla y su área de influencia.

Para la consecución de este objetivo final ha habido que alcanzar otros objetivos previos como son: determinar las zonas de interés y comprobar la existencia en dichas zonas de aguas subterráneas en cantidad y calidad suficientes para los fines del proyecto.

Para alcanzar estos objetivos se han realizado una serie de trabajos que incluyen, una primera actividad de recopilación y análisis de la información existente de carácter geológico, hidrogeológico, hidroquímico, hidrológico, infraestructural, medioambiental y socioeconómico, a continuación la selección, dentro de las unidades hidrogeológicas citadas con anterioridad, de las áreas concretas de actuación. Seguidamente, en las áreas seleccionadas, se ha realizado una actualización del conocimiento de carácter geológico (litológico, estratigráfico y estructural), hidrogeológico (funcional, hidrodinámico y circunstancial), hidroquímico (calidad, contaminación y vulnerabilidad) y medioambiental y a continuación se ha ensayado un Balance Hidráulico en aquellas zonas de las que se tiene un conocimiento más incompleto, que ha conllevado la determinación de los componentes del mismo y por tanto la actualización de datos climáticos e hidrológicos, inventario de puntos de agua, demanda atendida y usos del agua, estimación de la infiltración eficaz y finalmente, y de forma complementaria, un estudio de viabilidad de la recarga artificial con los excedentes de aguas superficiales.

A continuación, se ha completado el conocimiento de las zonas de estudio con la aplicación de técnicas especiales de apoyo, que han sido diferentes en cada una de las zonas seleccionadas y que en la U.H. 05.49 Niebla-Posadas ha comenzado por un estudio preliminar de las estructuras mediante técnicas de teledetección, la realización de una campaña de geofísica (Sondeos Eléctricos Verticales), sondeos de reconocimiento de pequeño diámetro y campaña de análisis y datación de las aguas de los sondeos realizados. En las áreas de las U.H. 05.50 Aljarafe y U.H. 05.51 Almonte-Marismas, se han realizado sondeos de reconocimiento, testificación de dichos sondeos, ensayo de bombeo de sondeos existentes y campaña de análisis de las aguas de los sondeos realizados.

4.- METODOLOGÍA Y TÉCNICAS EMPLEADAS EN EL ESTUDIO

El método de trabajo empleado ha sido el resultado de aplicar una filosofía basada en la visión de conjunto de la zona, sin perder el detalle que requiere el objetivo final del proyecto; determinar la ubicación óptima de futuros sondeos de abastecimiento que aprovechen la máxima capacidad de embalse del acuífero, y localizar las zonas del acuífero que reúnan las mejores condiciones para realizar una operación de recarga artificial con aguas superficiales excedentarias que puedan ser aprovechadas con los sondeos diseñados. De esta forma quedaría garantizada la utilización conjunta de las aguas superficiales y subterráneas y el aprovechamiento integral de los recursos hídricos totales.

La primera tarea realizada ha consistido en la búsqueda y recopilación de toda la documentación existente sobre la unidad, desde estudios regionales hasta informes locales de la zona, información que ha quedado referenciada en la bibliografía. Aunque no todos los documentos han resultado útiles para la elaboración concreta de este estudio, todos se han incluido en el apéndice bibliográfico al considerar que su consulta puede constituir un paso previo para futuras investigaciones.

Las fuentes consultadas durante esta actividad han sido:

- IGME, Sede Central en Madrid: Departamento de Documentación; Biblioteca General; Biblioteca del Área de Geofísica; Bases de datos específicas de sondeos mecánicos de investigación minera, hidrogeológica y de hidrocarburos.
- IGME, Oficina de Proyectos en Sevilla: Fondo Documental; Archivo de Puntos Acuíferos; Bases de datos relacionadas.
- Mº de Educación: Base de datos de tesis doctorales (Teseo); Biblioteca de la Facultad de CC Geológicas (UCM); Biblioteca de la Facultad de Ciencias de Sevilla.
- Mº de Economía: Archivo de Hidrocarburos.

Después de la revisión, filtrado de datos y síntesis de la información existente se ha procedido a abordar estudios detallados dirigidos a la localización de zonas de infiltración preferente en el acuífero. Los criterios establecidos para la selección de éstas zonas más favorables han sido los siguientes:

- a) Zonas sin problemas de explotación excesiva de las aguas subterráneas.
- b) Calidad química de las aguas subterráneas apta para consumo humano en su estado original; o, en su defecto, sean susceptibles de recibir un tratamiento adecuado previo a su consumo.
- c) Coincidencia de la zona con cuencas vertientes importantes que proporcionen un caudal de agua suficiente.
- d) Coincidencia con fracturas importantes que puedan suponer un aporte adicional a la zona de alimentación natural del acuífero.
- e) Espesor de acuífero notable.
- f) Preferentemente coincidencia con la infraestructura hidráulica de abastecimiento a la ciudad de Sevilla y su área de influencia.

Para la localización de estas zonas preferentes se ha partido de la cartografía geológica existente de la Serie Magna a escala 1/50.000, prestando especial atención a los contactos litológicos y a las estructuras en las zonas donde concurren los factores anteriormente descritos. La cartografía se ha revisado y comprobado en campo utilizando como técnicas complementarias la fotointerpretación, a partir de las fotografías aéreas a escala 1/33.000 (1967, vuelo americano, IGN) y escala 1/20.000 (1993, Junta de Andalucía), y la teledetección mediante la imagen registrada el 20 de Enero del 2001 por el nuevo sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) del satélite Landsat 7, que ha resultado especialmente útil en la determinación de los lineamientos estructurales.

Simultáneamente, para la mejor definición de las características geométricas del acuífero, se han interpretado e integrado los datos de las columnas litológicas de los sondeos mecánicos existentes y se ha realizado la actualización del inventario de puntos acuíferos, tarea para la cual se ha contado con la colaboración de las empresas de sondeos SOMBER, S.A. y PERSOND S.A. Durante la realización de este nuevo inventario se han medido niveles piezométricos que, aunque insuficientes para elaborar un mapa de isopiezas detallado, unidos a las medidas periódicas de la Red de Control Piezométrico y la piezometría preexistente, constituyen una información fundamental para determinar la evolución del acuífero.

Esta información puntual del subsuelo, junto con la imagen de los lineamientos obtenida por teledetección, ha servido de base para el diseño de una campaña de investigación

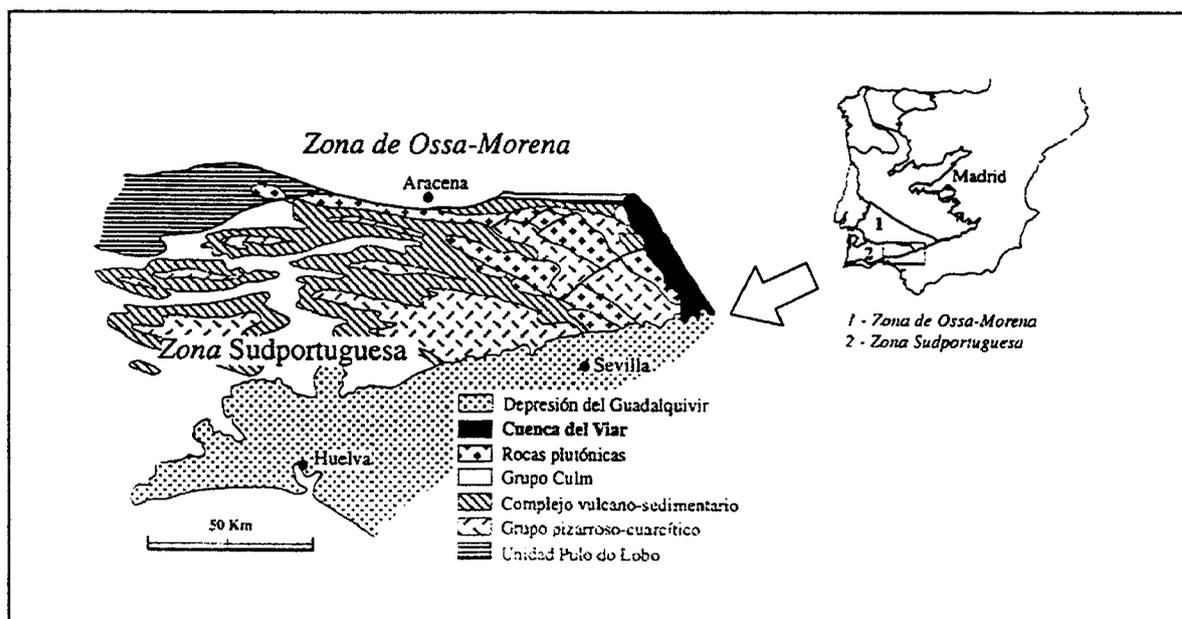
geofísica destinada a definir la continuidad del acuífero en las zonas de interés, realizada simultáneamente con la ejecución de sondeos mecánicos de reconocimiento que han permitido comprobar la “bondad” del método geofísico empleado y la realización de la toma de muestras de agua a distintas profundidades.

Los datos obtenidos de esta investigación han servido para completar el conocimiento geométrico e hidroquímico de la zona, así como para designar la ubicación final de futuros sondeos de abastecimiento y áreas de recarga.

5.- GEOLOGÍA

5.1.- MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se encuentra situada en el contacto entre la Depresión del Guadalquivir y el límite entre las zonas de Ossa - Morena (ZOM) y Sudportuguesa (ZSP) del Macizo Ibérico (Figura 3), límite que constituye un contacto tectónico de orden mayor interpretado como una sutura hercínica.



Al norte, la ZOM está formada por rocas intensamente deformadas siguiendo una directriz estructural NO-SE. Incluye una amplia variedad de rocas (mármoles, metapelitas, gneises, rocas calcosilicatadas, calizas...), con edades comprendidas entre el Precámbrico y el Carbonífero que han sido deformadas bajo diferentes condiciones metamórficas. Al noreste destacan vastas extensiones de rocas plutónicas (granitos, granodioritas).

En la ZSP se desarrolla una tectónica poco profunda caracterizada por cabalgamientos y pliegues de vergencia hacia el S y SO, deformación que afectó a la sucesión estratigráfica devono-carbonífera. Las rocas más antiguas, pizarras, filitas y cuarcitas del Grupo PQ (Grupo de pizarras y cuarcitas); afloran en núcleos de domos con una orientación aproximada E-O. Este grupo queda rodeado por las rocas del Complejo Vulcanosedimentario (CVS) que presentan importantes y complejos cambios laterales de facie y de espesor, y contienen reconocidos yacimientos de sulfuros masivos. Depósitos turbidíticos de tipo flysch recubrieron a las secuencias litoestratigráficas anteriores.

Simultáneamente con la deformación, y con posterioridad a ella, se produce la intrusión de rocas ígneas plutónicas formando un importante batolito en el extremo oriental de la ZSP. La parte oriental de este batolito constituyó el zócalo sobre el que se depositaron los sedimentos pérmicos de la Cuenca del Viar.

Finalmente, los sedimentos terciarios de la Depresión del Guadalquivir cubrieron las zonas meridionales de la ZSP, la Cuenca del Viar y la ZOM, que constituyen el zócalo paleozoico de la zona. Los materiales acuíferos, pertenecientes a los primeros términos de la serie transgresiva miocena, limitan al norte con el citado zócalo paleozoico, y al sur con los materiales margosos de la serie miocena marina que rellena la Depresión del Guadalquivir.

Resaltar, que la importancia de la descripción geológica y estructural reside en identificar los diferentes materiales y estructuras que, por sus características y disposición, pueden suponer un incremento en el espesor del acuífero o de una alimentación extra del mismo.

5.2.- ESTRATIGRAFÍA Y LITOLOGÍA

Los conjuntos litológicos y estratigráficos diferenciados y representados en el mapa geológico, que se incluye en el Anexo I, son los siguientes:

5.2.1.- ZÓCALO PALEOZOICO

Constituyen los afloramientos de la zona norte del estudio que definen la unidad estructural de la Meseta. Estratigráficamente están representados:

- DEVÓNICO SUPERIOR. Litológicamente formado por pizarras arenosas y areniscas. Tiene escasa representación en la zona, localizándose al NE de Villanueva del Río y Minas en contacto concordante con los materiales del carbonífero inferior.

- CARBONÍFERO INFERIOR. Aflora en los alrededores del cerro de la Encarnación y está constituido por pizarras que incluyen un banco de calizas oolíticas y una banda de roca volcánica. Coronando todo el paquete aparece un potente tramo de cuarcitas masivas.

En conjunto, éstos materiales devono-carboníferos, constituyen la Serie de la Sierra Traviesa.

- CARBONÍFERO SUPERIOR. Formado por bancos de conglomerados y pudingas bajo los cuales aparece una alternancia de pizarras y areniscas con diferentes niveles carbonosos que, en el pasado, fueron objeto de explotación. Afloran en la región de Villanueva del Río y Minas y la serie se encuentra discordante sobre la Serie anterior y recubierta casi totalmente por la cobertera terciaria.

- PÉRMICO. Está representado por la Secuencia Detrítica Roja (SDR), que constituye la parte superior del relleno de la cuenca del río Viar. Se trata de capas rojas de origen fluvial, con una potencia mínima de 160 m., formadas por conglomerados, areniscas y lutitas que se distribuyen en tramos predominantemente conglomeráticos, areniscosos y lutíticos respectivamente. Al oeste, la SDR se dispone discordante sobre el borde del macizo básico de Castilblanco, mientras que al este está en contacto mecánico con las cuarcitas masivas del carbonífero inferior. Hacia el sur se hunde bajo los materiales del Mioceno.

Los conglomerados son polimodales y poligénicos, con cantos angulosos a muy redondeados de cuarcita, cuarzo hidrotermal, arenisca, pizarra, esquistos, granitoides y diabasa. La matriz (5-50%) es de arenisca o conglomerado muy fino y pobremente seleccionada. Destaca la gran heterometría de cantos y matriz y la existencia de tamaños intermedios entre ambos.

Las areniscas presentan un tamaño de grano variable, selección pobre y empaquetamiento cerrado por compactación mecánica. Se trata de litoarenitas y grauvacas líticas, su matriz es arcillosa y comparte los espacios intergranulares con diversos tipos de cementos, entre los que destaca el óxido de hierro.

Las lutitas se presentan formando niveles masivos de limos y arcillas de intensa coloración rojiza.

Los conglomerados y areniscas representan depósitos de relleno de canal (lags y barras conglomeráticas y/o arenosas), mientras que las lutitas corresponden a depósitos de la llanura de inundación del medio fluvial.

Estos materiales del Pérmico ponen fin a la serie sedimentaria paleozoica detallada. Aparecen además en la zona diferentes afloramientos de rocas ígneas y metamórficas que forman también parte del zócalo paleozoico, los cuales se describen a continuación.

- ROCAS PLUTÓNICAS. Asociada a la etapa tectogenética de la Orogenia Hercínica tiene lugar la intrusión de rocas graníticas que se presentan en la zona formando una

alternancia de bandas de composición ácida y básica. Los tipos petrográficos ácidos son principalmente granodioritas, pasando a cuarzdioritas al O de Villaverde del Río; mientras que las rocas intrusivas básicas son sobre todo gabros y alguna diorita.

Cronológicamente primero se produce la intrusión de rocas ácidas que posteriormente son atravesadas por las rocas de naturaleza más básica.

Las bandas presentan una orientación NO-SE y se extienden hacia el SE bajo los sedimentos terciarios. Esta orientación, netamente hercínica, hace suponer que la mecánica de encajamiento se realiza a favor de fracturas preexistentes.

En ese sentido, destaca el contacto rectilíneo entre ambos conjuntos intrusivos al NE de Guillena, donde el último tramo de la masa gabroidea está relleno de anfibolitas muy tectonizadas formando milonitas que llegan hasta Burguillos. La evidencia parece demostrar que se trata de un contacto por falla que en la última porción visible de ella se dio la extrusión de diabasas que sufrieron metamorfismo, pasando los piroxenos a anfíboles.

- ROCAS VOLCÁNICAS INTRUSIVAS. Se trata de rocas básicas, esencialmente diabasas, que afloran al N de Burguillos. En conjunto constituyen una gran extensión de rocas verdes, con disyunción bolar, muy compactas y sin ninguna orientación interna visible. Cronológicamente serían posteriores a todas las rocas intrusivas.

Respecto a su origen existen dos hipótesis:

- se trata de una extensa colada volcánica que se expandió utilizando, como conductos de salida, una densa red de diques en el granito. La potencia de la colada no debe ser grande puesto que son comunes los asomos de granito dentro de ella.

- forman parte del conjunto intrusivo básico (Macizo de Castilblanco) que le limita por el O, pero con variaciones laterales de tipo textural.

La polémica no está resuelta. Aunque se piensa que la segunda hipótesis es la más probable, no se descarta que sea una colada volcánica pero con una extensión mucho más reducida.

- ROCAS FILONIANAS. El principal afloramiento se localiza al O de Burguillos y está constituido por anfibolitas asociadas a pizarras negras muy silíceas. Presentan textura milonítica y dos sistemas de microfracturas, casi perpendiculares entre sí, conjugadas a 35-40° del sistema principal de fracturación. La tectonización ha dado lugar a estructuras flaser y plegamiento tipo kind-band. Dentro de este grupo también deben incluirse numerosos diques que cortan las masas plutónicas.

- ROCAS METAMÓRFICAS. Asociado al emplazamiento de los granitos se produce un metamorfismo de contacto que transforma las primitivas pizarras devónicas en gneises, pizarras mosqueadas, esquistos micáceos y pizarras.

Aparecen dos afloramientos principales:

- N de Guillena: presenta una gradación metamórfica decreciente hacia el S, aflorando únicamente ortogneises que quedan parcialmente recubiertos por los materiales del terciario.

- N de Villaverde del Río: comprende un conjunto de pizarras mosqueadas y rocas metamórficas indiferenciadas que engloban pequeños afloramientos de las rocas graníticas que originan el metamorfismo.

5.2.2.- MIOCENO SUPERIOR

Discordante y transgresiva sobre el zócalo paleozoico se superpone la serie marina constituida, en su parte inferior, por la formación detrítica "Mioceno transgresivo de Base"; y en su parte superior por la formación margosa "Margas azules tortonienses". El tránsito entre ambas formaciones es gradual, por lo que el contacto es, a veces, estimativo.

- MIOCENO TRANSGRESIVO DE BASE. Litológicamente la formación incluye conglomerados basales y elementos rodados procedentes del zócalo, arenas, areniscas y calizas. Presenta una potencia variable y su principal característica son los frecuentes cambios laterales de facies que dan lugar a diferentes secuencias estratigráficas.

En la zona de estudio los afloramientos forman una banda con una anchura media de 2 a 4 kms, que se extiende desde Guillena hasta Villanueva del Río y Minas y desciende hacia el sur con una pendiente media del 2 al 3% sin plegamiento notable. En algunas zonas, como sucede al oeste de Burguillos, el espesor es mínimo, dejando al descubierto los materiales

paleozoicos.

Se han cartografiado tres facies diferentes dentro del conjunto de ésta formación:

- "Formación Roja": constituida por conglomerados rojizos con elementos detríticos gruesos bien clasificados. Se localiza entre la Ribera del Huesna y el río Viar, en contacto con los materiales permo-carboníferos con los que está genéticamente relacionada. La potencia de éstos sedimentos normalmente varía entre 3 y 12 m.
- "Facies de Borde": formada por un conjunto de arenas fosilíferas con bancos de areniscas calcáreas interstratificadas. Se sitúa encima de la anterior separada por un contacto erosivo, o directamente sobre el zócalo paleozoico cuando no aparece la anterior. Constituye la facies de mayor extensión dentro de la zona y su espesor normal varía entre 15 y 20 m.
- "Margas arenosas" esta tercera facies sólo aparece en las proximidades del A° de Galapagar y es semejante a la anterior, presentando como diferencia niveles arcillosos dentro del conjunto de las arenas. El espesor es de unos 7 a 8 m.

En general, la serie miocena de base alcanza su mayor potencia en Villanueva de Minas (90 - 100 m.) y disminuye hacia el oeste hasta los 30 - 40 m. en las proximidades de Cantillana.

- MARGAS AZULES TORTONIENSES. Constituyen el principal relleno de la Depresión del Gualdalquivir y se sitúan concordantes sobre los materiales detríticos transgresivos de base formando todo el conjunto una serie monoclinial, siendo el paso de una formación a otra gradual.

La formación está constituida fundamentalmente por margas azul-grisáceas (amarillentas en superficie por meteorización) compactas y a veces plásticas que pasan progresivamente a techo y muro a margas arenosas, presentando en ocasiones pequeñas interstratificaciones de arenas conchíferas o de areniscas. En la región de Alcalá del Río presentan abundancia de yesos.

La potencia de esta formación aumenta progresivamente hacia el sur de forma homogénea.

5.2.3.- CUATERNARIO

Los materiales agrupados en el cuaternario incluyen las terrazas fluviales del Guadalquivir y afluentes importantes, así como los aluviones actuales y grandes meandros abandonados. No se han diferenciado estas formaciones constituidas fundamentalmente por gravas y arenas de espesor variable según la zona.

5.3.- TECTÓNICA Y ESTRUCTURA DEL ACUÍFERO

El contacto entre el zócalo Paleozoico de la Meseta y el Mioceno de la Depresión del Guadalquivir marca dos estilos tectónicos diferentes, impresos por la sucesión de la orogenia hercínica y la alpina.

En el zócalo paleozoico de la zona se aprecian claramente las directrices NO-SE de la orogenia hercínica. Destacan, como rasgos más importantes de ésta deformación:

- las fracturas localizadas al O de Burguillos, incluido el contacto rectilíneo de anfibolitas con textura milonítica.

- la alternancia de bandas intrusivas de composición ácida y básica relacionada con el emplazamiento de los granitos a favor de fracturas preexistentes.

- la falla situada al O de Villaverde del Río que afecta a la diabasa y a las granodioritas y cuarzodioritas subyacentes.

- y la geometría alargada de la cuenca del Viar cuyo límite oriental constituye una falla inversa (falla inversa del Viar), siendo el bloque de muro un gran pliegue tumbado con eje paralelo a la falla.

La geometría del acuífero está muy condicionada por el relieve de este substrato paleozoico y su posterior evolución, lo que motivará la existencia de zonas más elevadas y más deprimidas (paleorelieves) que determinarán, en gran medida, el espesor de los materiales acuíferos. Así mismo la denudación del edificio orogénico formado dará lugar a una reactivación de la red de drenaje, por lo que cabe esperar la existencia de paleocauces

(rellenos de canal o lag) bajo los sedimentos miocenos.

La orogenia alpina da lugar a la formación de las Cordilleras Béticas de las cuales la Depresión neógena del Guadalquivir constituye su cuenca de antepais, siendo el macizo hercínico el borde pasivo y las zonas subética y prebetica el borde activo del orógeno.

Los materiales neógenos y cuaternarios que rellenan la depresión constituyen una serie monoclinial que se apoya discordante sobre el zócalo paleozoico.

La línea estructural que determina el contacto del zócalo paleozoico con el Mioceno de la depresión, está definida como un hundimiento progresivo hacia el S del zócalo paleozoico a través de flexuras sucesivas de dirección ENE-OSO o bien por una red de fallas paralelas (semigraben) con desniveles variables, de 50 a 300 m.

Los datos de campo, columnas litológicas y estudios geofísicos han revelado - en anteriores estudios - que en la zona de Villanueva del Río y Minas éste zócalo se hunde progresivamente alcanzando en Tocina una profundidad de 250 m, y posteriormente a 3 km o 4 km un hundimiento por falla en dirección sur, mientras que en la región de Burguillos la línea de flexión se localiza a unos 10 km al sur.

A este accidente tectónico se superponen otros de dirección general N-S que en ocasiones pueden compartimentar la serie miocena como se supone que ocurre en la falla de Viar, que discurre por el río del mismo nombre. De menor entidad y con esta orientación se sitúan fallas en Cantillana y en Villanueva del Río y Minas, así como las fallas de dirección NE-SO y NW-SE en los alrededores del A° Trujillo y Parroso.

5.3.1.- TELEDETECCIÓN Y TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS

Para caracterizar más detalladamente el estado de fracturación de los materiales y obtener mayor información sobre su disposición estructural, se ha realizado un estudio de las lineaciones existentes en la zona, mediante el empleo de técnicas de teledetección.

La interpretación de las imágenes de satélite (Landsat 7, ETM+) a escala 1:200.000 y 1:50.000, que se ha complementado con el estudio de la fotografía aérea a escala 1:33.000

y 1:20.000 y la observación directa de campo, se presenta en el Anexo II: Teledetección y técnicas complementarias.

Las imágenes ponen de manifiesto la presencia de cuatro sistemas principales de lineamientos:

- N 110-120 a E-O, es la dirección predominante y más marcada en toda la región y se corresponde con las principales fases del plegamiento hercínico.
- N 40-70 (ENE-OSO), también de origen hercínico, ha condicionado la formación de la Depresión del Guadalquivir y constituye un accidente tectónico de primer orden.
- N 140, esta dirección junto con la anterior se interpretan como desgarres conjugados asociados a las fases compresivas hercínicas y que han rejugado durante los episodios de fracturación tardihercínica. Las fases principales de la deformación alpina se articulan a favor de éstos accidentes hercínicos y tardihercínicos reactivados del zócalo paleozoico.
- N-S ($\pm 10-20^\circ$ al E y O), asociada a la distensión neógena-cuaternaria.

Las observaciones de campo y las medidas directas realizadas en distintos afloramientos de materiales graníticos del entorno de Burguillos, reflejan que, en general, los lineamientos N 110 -120 se corresponden con zonas intensamente fracturadas que llevan asociadas la intrusión de diques de diabasa; mientras que en el resto de direcciones no presentan un grado de fracturación tan intensa ni el emplazamiento de diques básicos. En este sector, la traza de los lineamientos se continúa en los sedimentos miocenos, lo cual puede significar un menor espesor de sedimentos que refleja de mejor manera la morfología del substrato.

Los lineamientos se han observado igualmente dentro de las anfibolitas que presentan una textura milonítica donde la lineación mineral es E-O con direcciones de fracturación asociadas de N 120 y aproximadamente N-S; y en los materiales metamórficos situados al norte del A° Siete Arroyos, que aunque no llegan a desarrollar texturas miloníticas, sí presentan una foliación con neofeormación de minerales.

Dentro de los sedimentos pérmicos del Viar, las lineaciones están muy marcadas. El accidente tectónico más importante queda definido por la falla inversa del Viar que se continúa hasta los alrededores del A° Parroso donde se observa un pequeño afloramiento

de brecha cuarcítica con una intensa deformación, llegando a la formación de cataclastitas en la base del cabalgamiento.

El seguimiento de las lineaciones dentro del mioceno presenta grandes dificultades debido a la escasez de afloramientos. En general los lineamientos en el área de Cantillana, se corresponden con los contactos entre las formaciones, que dan pequeños escarpes morfológicos, aunque, en ocasiones, únicamente se identifican por un cambio en el uso de suelo por lo que es difícil precisar si se trata realmente de la expresión morfológica en superficie de un accidente tectónico. En el sector del Viar, los lineamientos de dirección N 60 y N 120 quedan dentro de pequeños arroyos, asociados posiblemente a la formación de la Depresión del Guadalquivir.

Lo más destacado de éstas alineaciones en el mioceno es que coinciden con la red de drenaje actual, los arroyos discurren encajados en éstos accidentes, principalmente en la dirección N-S y en toda la banda de afloramiento. No existen indicios de una deformación importante en el terciario aunque sí parece que se han producido basculamientos posteriores a su sedimentación y también parece muy posible que se halla producido la reactivación de planos de fractura preexistentes, ya que las direcciones de lineamientos son básicamente las mismas. En este sentido destaca la lineación ENE-OSO de la flexión del zócalo que permite el relleno neógeno de la depresión del Guadalquivir, y que se expresa de manera muy neta en la imagen como lineamientos de gran recorrido afectando a los materiales terciarios.

La reactivación de discontinuidades previas a un proceso de deformación es un fenómeno frecuente. El análisis poblacional de fallas realizado en las canteras de mármoles de la Sierra Traviesa en la falla del Viar (García - Navarro, E., et al; 1998) pone de manifiesto que la mayoría de las fallas analizadas corresponden a discontinuidades anteriores rejugadas, hecho que observan también en campo ya que se han encontrado planos de falla con varias poblaciones de estrías (lo que evidencia que se han movido en momentos distintos), y existen relaciones de paralelismo entre las fallas con la foliación o contactos litológicos.

En el citado estudio la mayoría de las fallas muestran buenos criterios cinemáticos asociados al deslizamiento, por lo que puede establecerse una sucesión en las mismas. Del total de 130 fallas medidas con dirección y sentido de movimiento, el 30% son fallas

normales y sinistralas, el 45% son fallas inversas y el 25% son fallas de deslizamiento de tipo dextral.

- Las fallas normales tienen dirección NO-SE con buzamientos más frecuentes de 60° SO y las fallas sinistralas tienen dirección media NNE-SSO con buzamientos frecuentes de 60 - 80°. Ambos tipos de fallas se encuentran intersectadas por las fallas de tipo inverso y nunca al revés por lo que se deduce que son anteriores a éstas últimas.
- Las fallas inversas son las más frecuentes, presentan orientación NO-SE y buzamientos altos tanto al NE como al SO aunque las mayores buzan al NE formando un sistema de escamas.
- La última familia de fallas que debió formarse son las fallas dextrales que presentan una dirección media N-S con buzamientos en general mayores de 70°.

Éstas tres familias de direcciones son coincidentes con las lineaciones observadas en todo el dominio de la zona de estudio.

Como resumen a lo anteriormente expuesto puede decirse:

- Las direcciones de lineaciones observables en fotografía aérea, imágenes de teledetección, observaciones de campo y referencias bibliográficas son coincidentes.
- Éstas lineaciones dentro del dominio paleozoico, se identifican, generalmente, con zonas de fuerte deformación.
- Las familias de direcciones se han estudiado mediante análisis poblacional de fallas en la Sierra Traviesa, estableciendo la sucesión de eventos de deformación.
- En el dominio mioceno, los escasos afloramientos y el intenso cultivo impide determinar zonas fracturadas; las lineaciones se identifican por escarpes morfológicos y por el encajamiento de la red de drenaje. En ocasiones la traza se sigue hasta el Paleozoico luego se trata de fallas miocenas que han reactivado planos de falla anteriores (mismas direcciones pero con menor deformación).

5.4.- HISTORIA GEOLÓGICA Y EVOLUCIÓN TECTOSEDIMENTARIA

Durante el Devónico medio superior, en una cuenca geosinclinal, se depositan sedimentos detríticos de naturaleza arcillosa y grauváquica. El depósito continúa hasta el Carbonífero inferior, momento en que tienen lugar las principales fases de la orogenia hercínica (entre el Westfaliense y el Estefaniense) que pliega todos los materiales según la dirección NE-SO.

Con el fin de éstos movimientos se produce una regresión por emersión; la tectónica de fracturación después de las principales fases de deformación hercínica condiciona la aparición de pequeñas cuencas continentales aisladas de carácter molásico donde continúa la sedimentación. Se depositan así discordantes sobre los materiales plegados devono-carboníferos, los sedimentos lacustres que conforman la cubeta de Villanueva del Río y Minas y los sedimentos fluviales y lacustres de la Cuenca del Viar que abarcan todo el Pérmico.

Simultáneamente con la deformación se produce la intrusión de rocas ígneas plutónicas que forman un extenso batolito (extremo oriental ZSP) que constituye el zócalo sobre el que se depositaron los sedimentos pérmicos del Viar.

Postorogénicamente, aprovechando direcciones hercínicas se producen manifestaciones volcánicas de tipo básico como indica la presencia de diques en el macizo de Castilblanco.

Con posterioridad a la génesis de la cuenca del Viar se formó una falla inversa en cuyo bloque de techo (ZOM) se desarrolló una serie de fallas inversas y cabalgamientos, y en el bloque de muro (Cuenca del Viar) tuvo la formación de un gran pliegue tumbado con un gran flanco inverso que afectó a todos los materiales de la cobertera pérmica. Esta etapa contractiva debió tener lugar con posterioridad al depósito de los materiales de la cuenca del Viar.

Al final de la orogenia tuvo lugar una emersión del paleozoico, provocando una laguna estratigráfica que abarca hasta la transgresión del mar mioceno. Con posterioridad al finiaquitaniense se origina el surco neógeno del Guadalquivir, por esta depresión penetró la transgresión marina de edad tortoniense.

6.- HIDROGEOLOGÍA

6.1.- CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS MATERIALES

Desde el punto de vista hidrogeológico, y de acuerdo con las litologías presentadas, pueden considerarse **terrenos de baja permeabilidad** los siguientes conjuntos de materiales:

- La Serie Devónico - Carbonífera. Constituida fundamentalmente por pizarras arcillosas y compactas, donde las fracturas son de escasa importancia y generalmente están rellenas de cuarzo.

- Los conglomerados y areniscas del Pérmico. Se caracterizan por su pobre selección, con tamaños intermedios entre los cantos y la matriz. Contienen abundante cemento y presentan un alto grado de compactación mecánica, lo que confiere al depósito en conjunto un comportamiento muy poco permeable.

- Los materiales graníticos. Se presentan alterados en superficie dando lugar a la formación de suelos tipo lehn entre los que destacan bolos graníticos de gran tamaño. También son frecuentes las zonas fracturadas dentro del cuerpo plutónico inalterado por lo que, a efectos hidrogeológicos, puede considerarse que la formación en conjunto funciona como un medio poco permeable, si bien localmente presenta una permeabilidad más elevada asociada a las grandes fracturas y al manto de alteración granítico. Éstas zonas, que pueden constituir acuíferos de cierto interés local, constituyen áreas de circulación preferente y son susceptibles de aportar un volumen adicional de agua a otras formaciones acuíferas, incrementándose de esta forma las tasas de alimentación y recarga.

- Las diabasas. Aparecen generalmente muy compactas y poco alteradas, aunque también se encuentran en zonas afectadas por fracturas, donde alternan con diques de naturaleza más ácida. Su comportamiento hidrogeológico es similar al de los granitos, y su interés como materiales acuíferos, se limita exclusivamente a las zonas fracturadas relacionadas con su emplazamiento.

- Las anfíbolitas. A pesar de presentar una fracturación importante, contienen una elevada fracción arcillosa procedente de la milonitización, por lo que su interés hidrogeológico se reduce notablemente. No obstante, el contacto litológico define una lineación muy marcada

que puede tener significación a gran escala en el zócalo paleozoico.

- Las rocas metamórficas. El metamorfismo de contacto sufrido por las originales pizarras devónicas, de naturaleza ya poco permeable, favorece la aparición de una gran cantidad de minerales arcillosos y micáceos, lo que confiere a este grupo de materiales unas características poco adecuadas para formar acuíferos; aunque de nuevo la existencia de zonas fracturadas dentro del conjunto puede tener cierto interés local.

- Las margas azules tortonienses. Se incluyen también dentro de éste grupo, por su menor permeabilidad, los términos intermedios entre las margas azules y la formación detrítica del mioceno transgresivo de base.

Como **terrenos permeables**, y únicos materiales susceptibles de constituir acuíferos importantes, aparecen en la zona:

- Los materiales del Cuaternario. Constituyen un acuífero excelente, si bien quedan excluidos de los objetivos concretos de éste estudio dado que el grado de explotación actual es elevado, son más vulnerables a la contaminación y responden de forma muy rápida ante situaciones de sequía.

- Los conglomerados y areniscas fosilíferas del Mioceno transgresivo de base. Se trata de sedimentos detríticos en general poco consolidados, de tamaño de grano variable, con pasadas de materiales más finos que conforman un acuífero multicapa y permeable por porosidad intergranular. El techo del acuífero estaría constituido por las margas azules tortonienses, y el muro por el conjunto de materiales poco permeables que integran el zócalo paleozoico.

En función de las características presentadas puede asegurarse que, para conseguir los objetivos del estudio, la investigación hidrogeológica debe estar orientada a la formación del Mioceno transgresivo de base, pero dando relevancia a aquellas zonas del acuífero asociadas a materiales que, aunque por su litología no constituyan acuíferos *s.s.*, sí sean susceptibles de aportar un volumen adicional de recursos a través de sus zonas fracturadas.

A escala regional, y dentro de la Cuenca del Guadalquivir, éste acuífero queda delimitado por la Unidad Hidrogeológica Niebla - Posadas (05.49).

6.2.- LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA NIEBLA - POSADAS (05.49)

La unidad hidrogeológica Niebla -Posadas (Figura 1), que comprende el sistema acuífero núm. 26/a según la antigua nomenclatura del IGME, presenta una superficie permeable de 287 km² que se extiende sobre una banda de dirección ENE-OSO de 15 Km de longitud y unos 2 Km de anchura media localizada al Norte de la Depresión del Gualdalquivir y en la línea de contacto con la Meseta.

El acuífero está constituido por conglomerados de base, gravas, arenas, arenas fosilíferas, areniscas, calizas y arcillas, que, con frecuentes cambios laterales de facies y de espesor, se disponen discordantes sobre los materiales paleozoicos de la Meseta los cuales constituyen el substrato general de la cuenca y el límite Norte de esta Unidad. Éstos materiales se hundieron cambiando lateralmente a facies, generalmente, más arcillosas que se acuñan hacia el centro de la depresión, bajo las margas azules del Mioceno superior (Tortonense) que constituyen el techo y límite Sur del acuífero. Se trata por tanto de una estructura monoclinal típica de fondo de saco, como muestran las Figuras 4 y 5.

La potencia media es de 10 -25 m. aumentando hacia el E, pero muy condicionada por la tectónica del zócalo Paleozoico, y disminuyendo hacia el Sur para pasar progresivamente a facies margosas y arcillosas.

Los parámetros hidráulicos son muy variables dadas sus diferentes litologías. Las transmisividades alcanzan valores que oscilan entre $6 \cdot 10^{-2}$ y $8 \cdot 10^{-5}$ m²/s, y el coeficiente de almacenamiento pasa de libre (10^{-2}) hasta confinado (10^{-4}).

6.3.- GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO

6.3.1.- DISPOSICIÓN GENERAL

El acuífero se presenta en forma de prisma que se acuña progresivamente hacia el SE bajo las margas azules del Tortonense. La geometría es en general sencilla pero localmente compleja ya que está fuertemente condicionada por la morfología del substrato y la tectónica regional, lo cual determina que - en estudios precedentes - se hayan diferenciado 5 sectores en la U.H. con un comportamiento hidráulico diferente:

1. Niebla - Gerena: limitado por dos fallas, la de Guadamar al E y la del Tinto al W que siguen la dirección del cauce de los ríos.
2. Gerena - Cantillana: comprendido entre las fallas del Guadamar y la del Viar.
3. Cantillana - Lora del Río: la conexión lateral está limitada por la falla del Viar en el borde oriental y por el levantamiento del zócalo paleozoico en los alrededores de Lora del Río. Dentro de la zona, los levantamientos del zócalo rompen la homogeneidad del acuífero.
4. Lora del Río - Hornachuelos: se encuentra limitado en su borde occidental por el levantamiento del zócalo en Lora del Río y en su borde oriental por el río Bembezar.
5. Hornachuelos - Posadas: se encuentra limitado por los dos flancos de la Sierrezuela (paleozoico).

El área de estudio (Guillena - Villanueva del Río y Minas) estaría incluida dentro de los sectores 2 y 3. La geometría general del acuífero puede verse en las siguientes figuras:

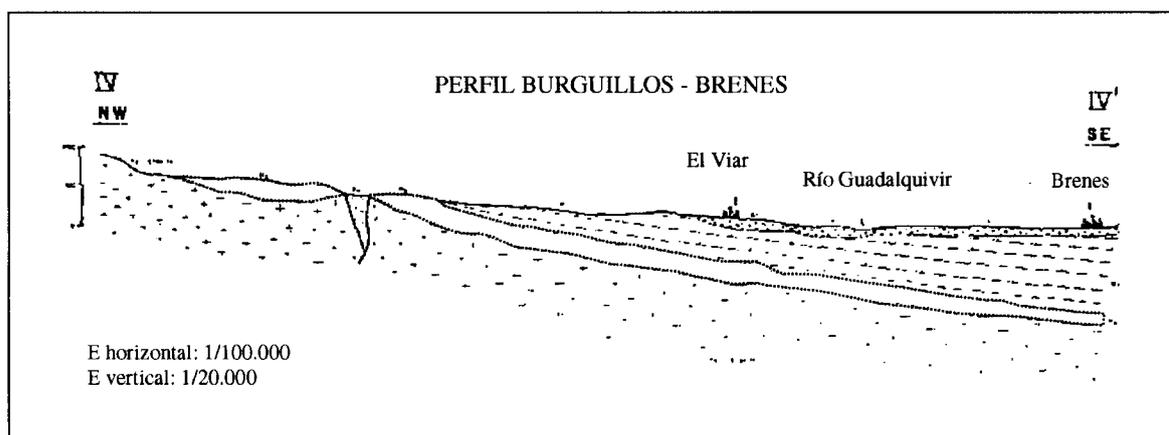


Figura 4.- Geometría del acuífero en el sector Burguillos - Brenes. (Fuente: IGME, 1983)

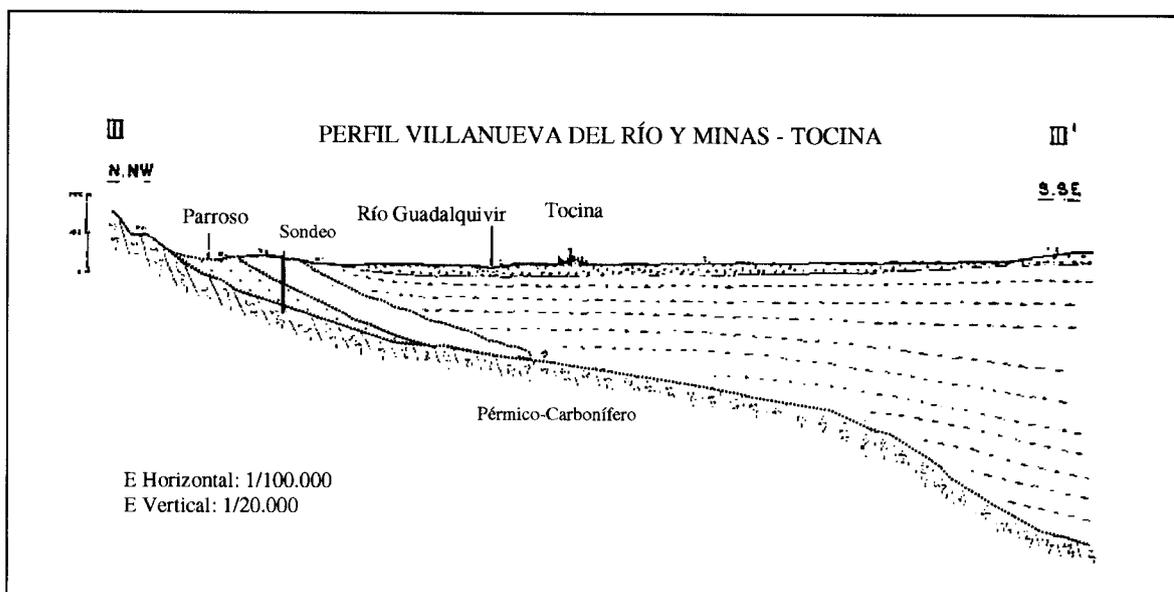


Figura 5.- Geometría del acuífero en el sector Villanueva del Río y Minas - Tocina. (Fuente: IGME, 1983)

6.3.2.- DEFINICIÓN GEOMÉTRICA

Dada la fuerte dependencia de la geometría del acuífero con la morfología del substrato y la estructuración tectónica, es preciso proceder a un estudio más detallado del espesor que presenta la formación en cada punto y de la profundidad a la que se alcanza el zócalo paleozoico. Se trata por tanto de integrar la información existente del subsuelo, (fundamentalmente sondeos mecánicos y SEV), con los datos estructurales obtenidos mediante teledetección, completando la ausencia de información con exploración geofísica y reconocimientos mecánicos con el fin de obtener una mayor definición de la geometría del acuífero.

Para ello se ha procedido a reinterpretar todas las descripciones litológicas de los puntos acuíferos existentes y se ha realizado un nuevo inventario; información que se adjunta en el Anexo III.- Inventario de Puntos Acuíferos. El número de puntos con información litológica (detallada o sintética) asciende a un total de 140.

La geometría del acuífero se muestra a continuación de forma gráfica a través de una serie de perfiles litológicos sintéticos, cuya situación se recoge en el mapa de la Figura 7. Cada perfil incluye el caudal que proporcionan los sondeos y el espesor de formación acuífera atravesada, así como un breve comentario de los aspectos más destacados del perfil.

Los perfiles se presentan, en general, a escala horizontal 1/50.000, aunque para poner de manifiesto detalles de la geometría, pueden presentarse a 1/25.000 o incluso mayor. La escala vertical, 1/ 2.000, se ha exagerado para destacar el espesor de la formación acuífera, pues de otro modo - dado su escaso espesor -, quedaría sin representación.

La identificación de los materiales descritos en las columnas litológicas del inventario, se realiza de acuerdo con la siguiente leyenda (Figura 6). Ocasionalmente, un mismo color puede definir varias descripciones; la identificación de la litología concreta (si no se incluye en el perfil por motivos de espacio) puede hacerse consultando el inventario del Anexo III que recoge las columnas completas.

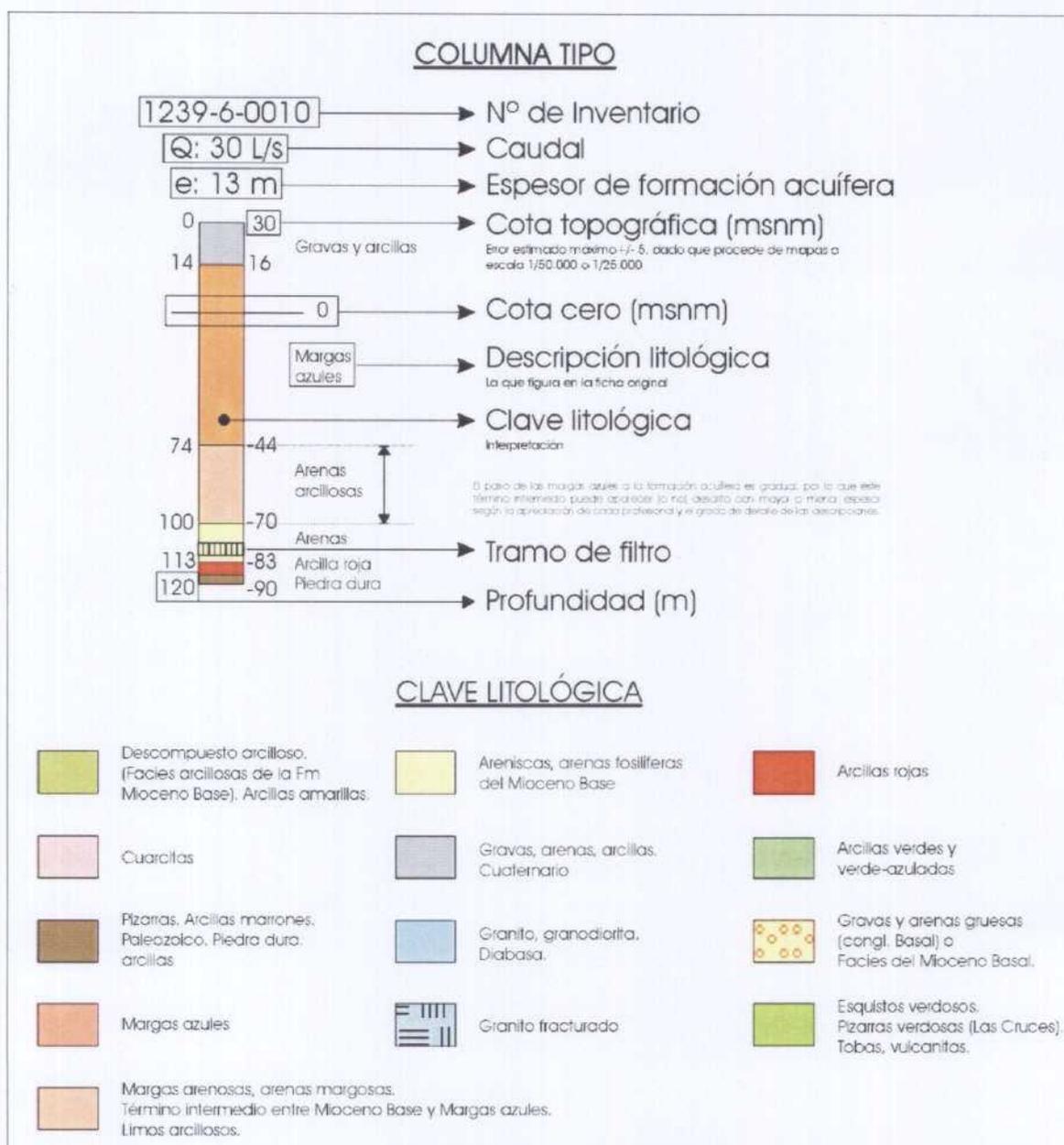


Figura 6.- Leyenda para la lectura de los perfiles litológicos sintéticos.

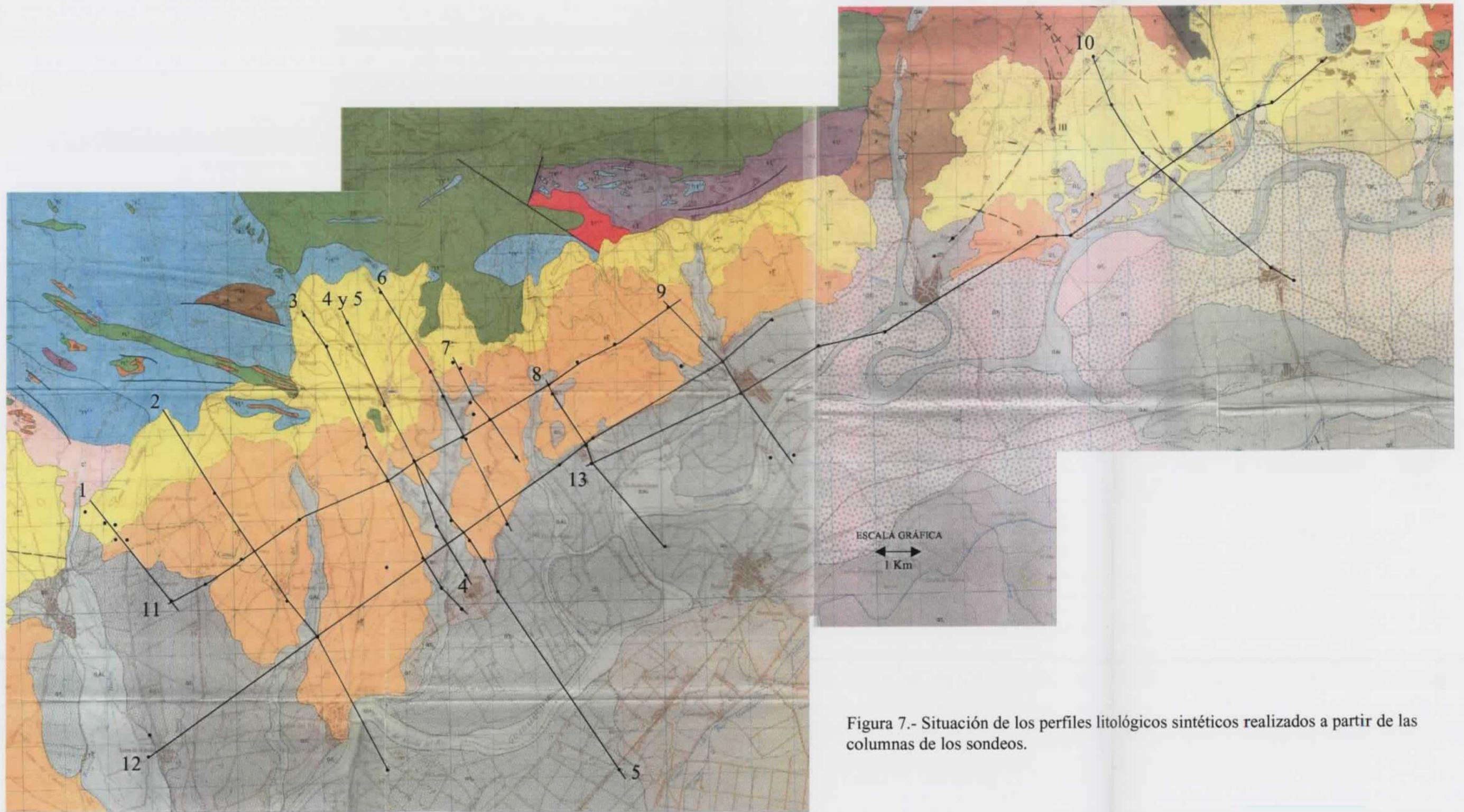


Figura 7.- Situación de los perfiles litológicos sintéticos realizados a partir de las columnas de los sondeos.

LEYENDA

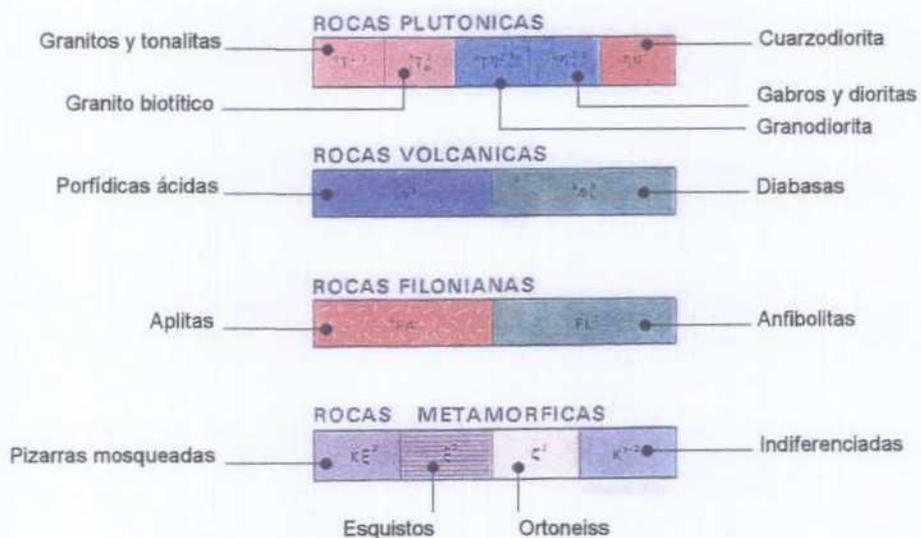
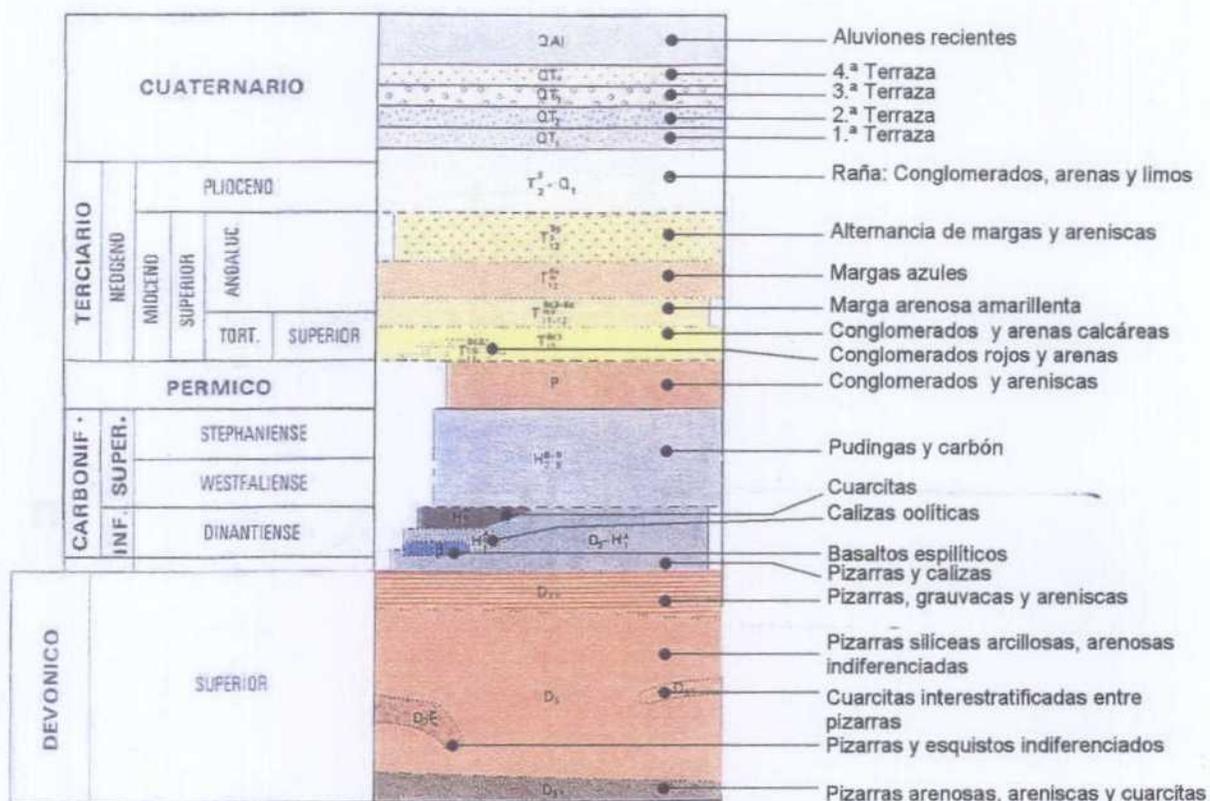


Figura 7 bis.- Leyenda del mapa de situación de los perfiles litológicos sintéticos realizados a partir de las columnas de los sondeos.

PERFIL 1: EMBALSE EL GERGAL - CORTIJO CABALLERO

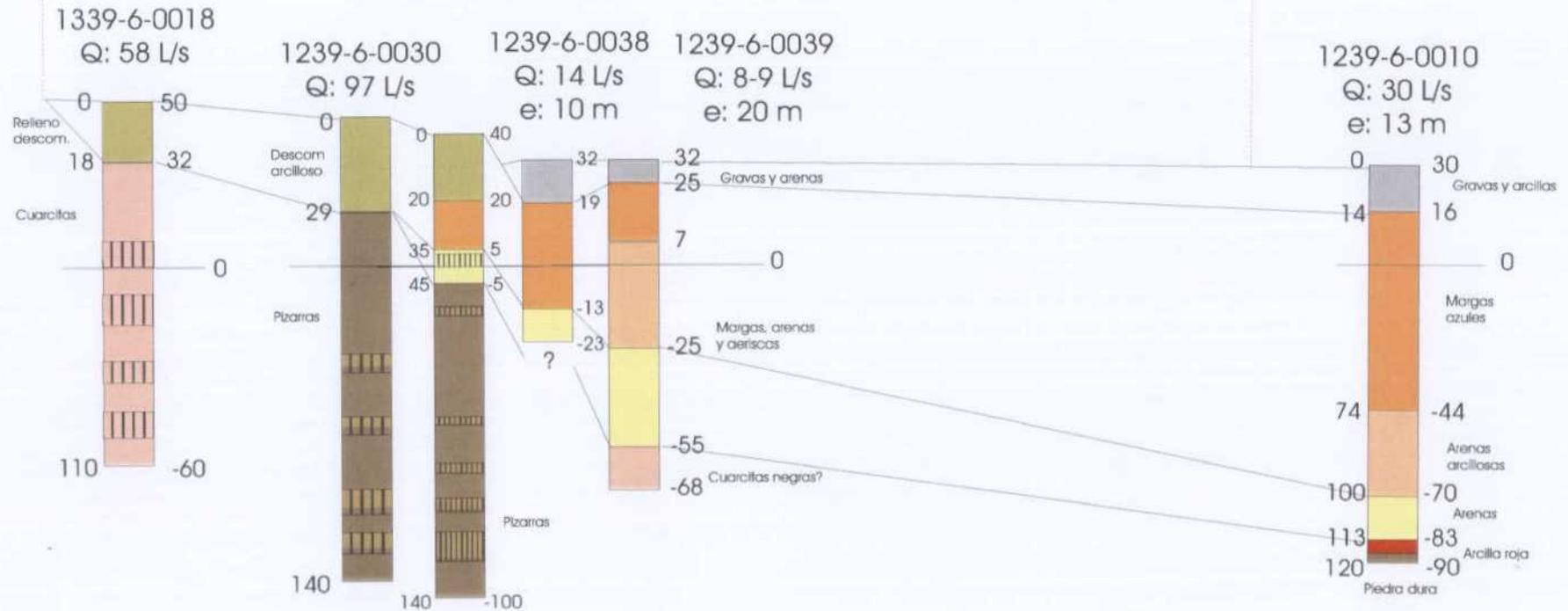
ESCALA HORIZONTAL 1/15.000

ESCALA VERTICAL 1/2.000

Embalse El Gergal

1239-6-0035
Q: 40 L/s Arenisca
100 L/s pizarra
e: 10 m Ar

C° Caballero



En las inmediaciones del embalse, la formación acuífera presenta unas facies más margosas. Se observa que el tramo productivo se acuña en el sondeo 1239-6-0030, donde los caudales importantes proceden de niveles fracturados del Paleozoico. La formación acuífera desciende hasta encontrarse a una profundidad de 100 m a la altura de Guillena (1239-6-0010).

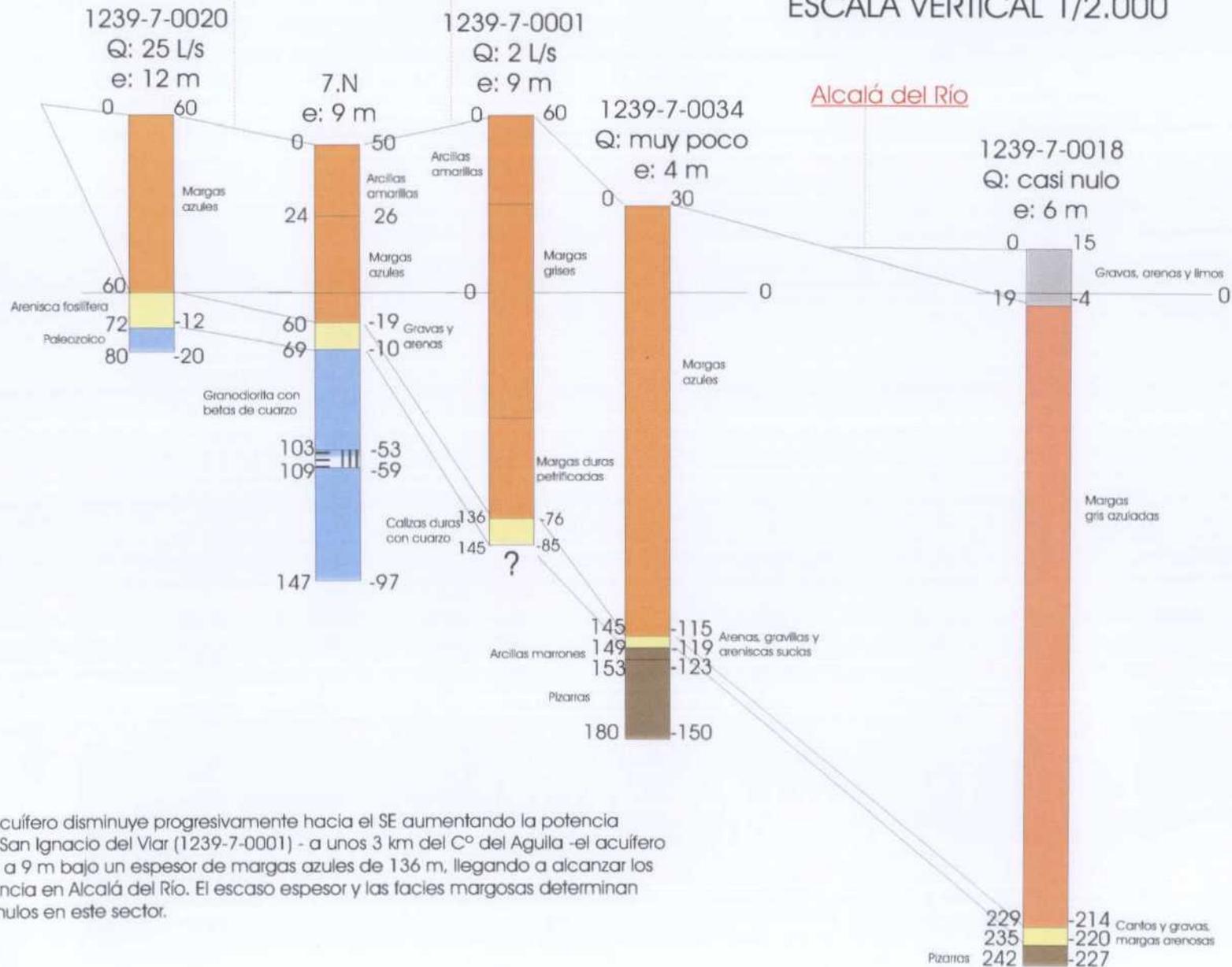
C° El Aguila

San Ignacio del Viar

PERFIL 2: CORTIJO DEL AGUILA - ALCALÁ DEL RÍO

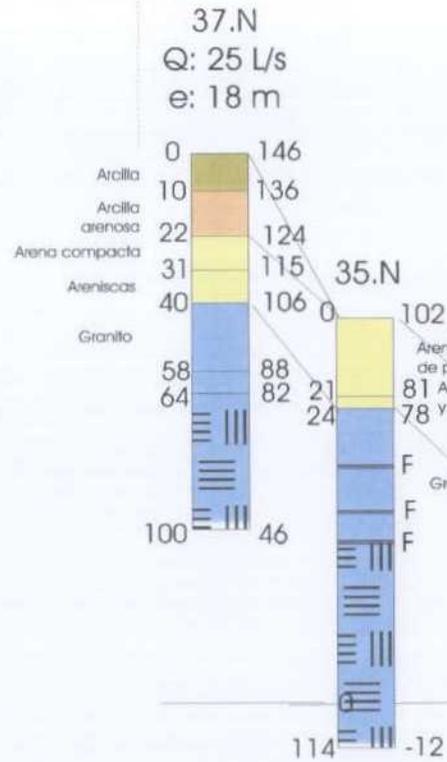
ESCALA HORIZONTAL 1/50.000

ESCALA VERTICAL 1/2.000

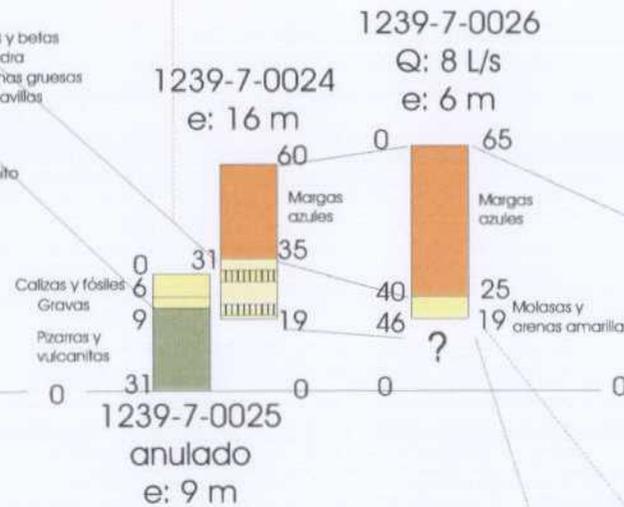


El espesor de acuífero disminuye progresivamente hacia el SE aumentando la potencia de margas. En San Ignacio del Viar (1239-7-0001) - a unos 3 km del C° del Aguila -el acuífero se ha reducido a 9 m bajo un espesor de margas azules de 136 m, llegando a alcanzar los 210 m de potencia en Alcalá del Río. El escaso espesor y las facies margosas determinan caudales casi nulos en este sector.

C° Las Cardonas



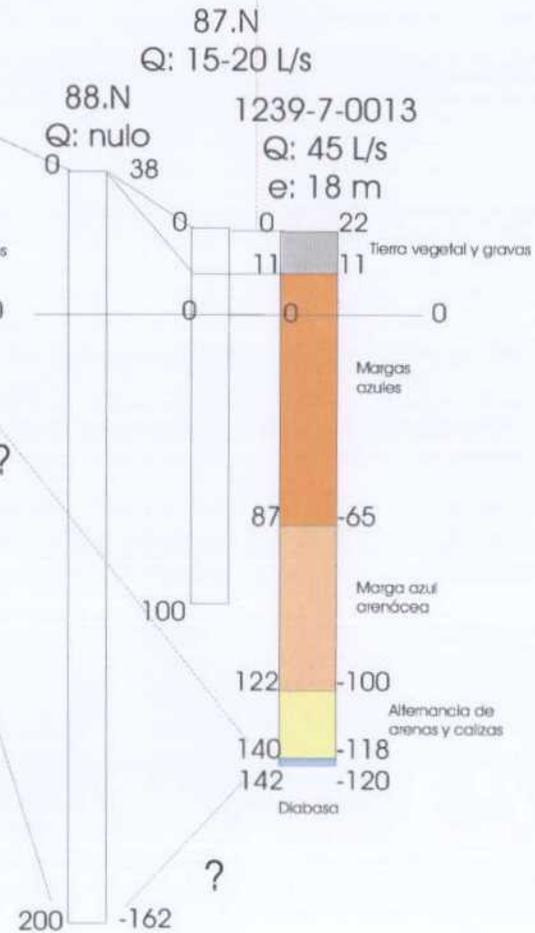
Burguillos



PERFIL 3: BURGUILLOS - ESQUIVEL
ESCALA HORIZONTAL 1/50.000
ESCALA VERTICAL 1/2.000

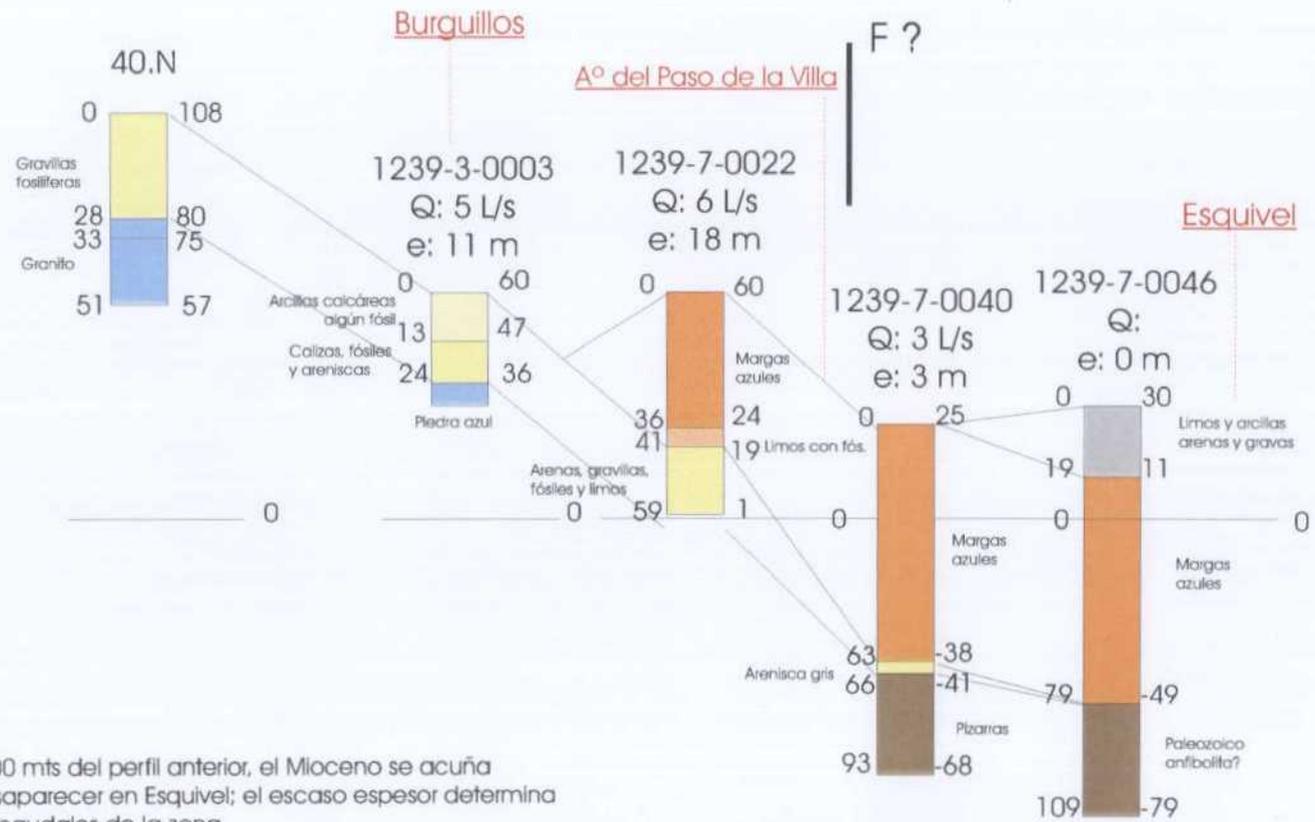
F ?

Esquivel

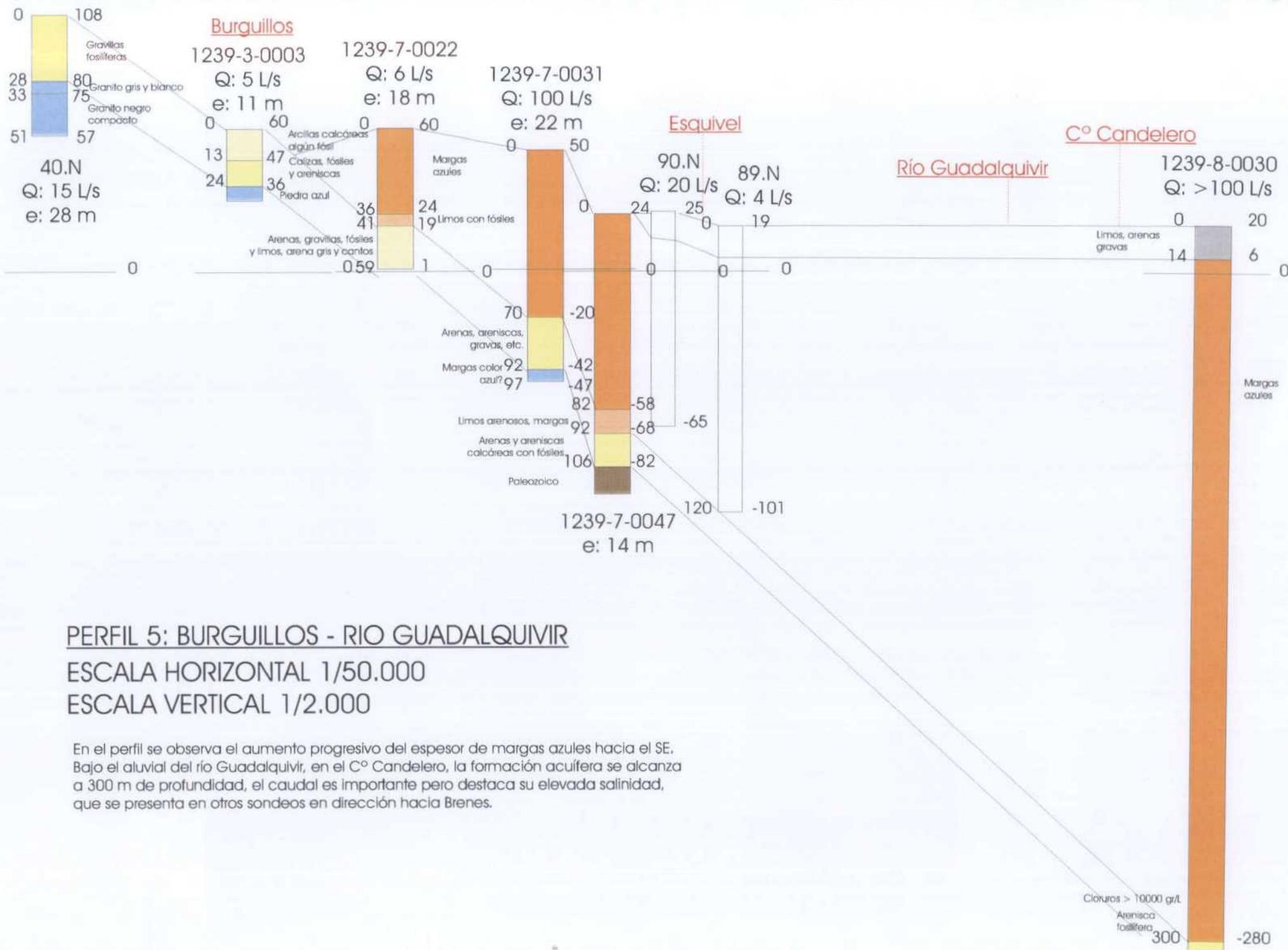


Al N de Burguillos el caudal de los sondeos procede fundamentalmente de los granitos. Hacia el S el Mioceno de base es poco productivo, presentando en Esquivel un espesor de 18 m con un caudal de 45 L/s que pudiera estar relacionado con la existencia de una fractura, dado el salto de al menos 100 m en el muro del Paleozoico en una distancia de 3.3 km.

PERFIL 4: BURGUILLOS - ESQUIVEL (bis)
 ESCALA HORIZONTAL 1/50.000
 ESCALA VERTICAL 1/2.000



A unos 600 mts del perfil anterior, el Mioceno se acuña hasta desaparecer en Esquivel; el escaso espesor determina los bajos caudales de la zona.



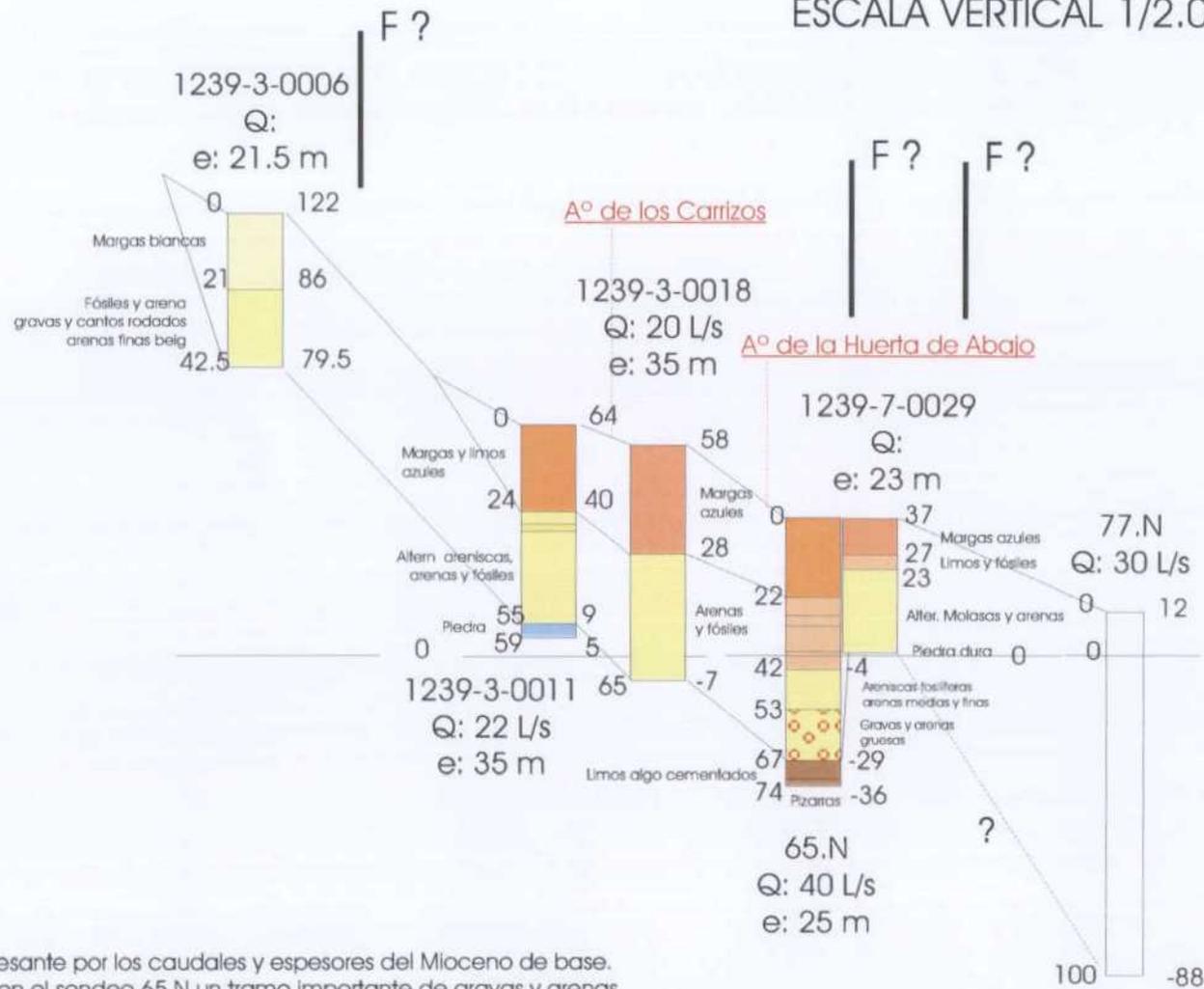
PERFIL 5: BURGUILLOS - RIO GUADALQUIVIR

ESCALA HORIZONTAL 1/50.000

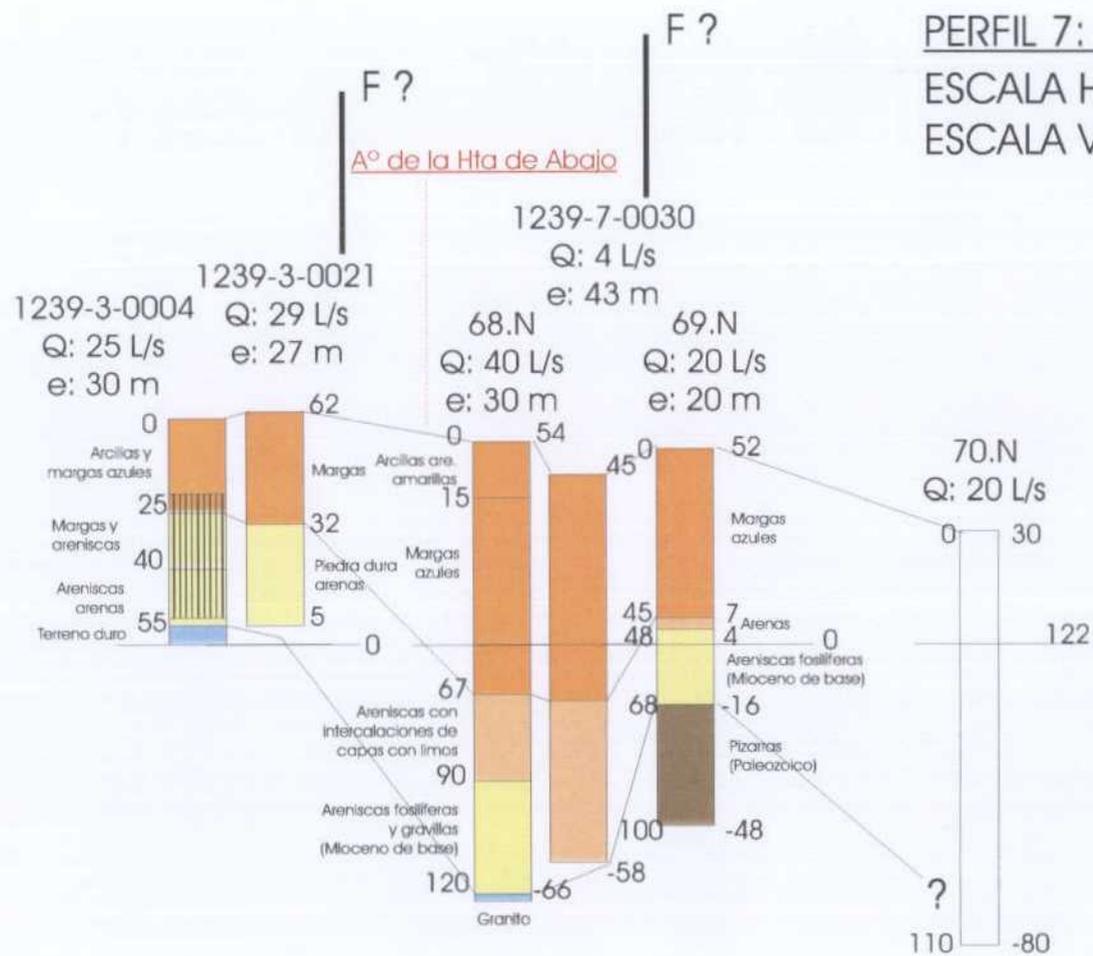
ESCALA VERTICAL 1/2.000

En el perfil se observa el aumento progresivo del espesor de margas azules hacia el SE. Bajo el aluvial del río Guadalquivir, en el C° Candeleros, la formación acuífera se alcanza a 300 m de profundidad, el caudal es importante pero destaca su elevada salinidad, que se presenta en otros sondeos en dirección hacia Brenes.

PERFIL 6: BURGUILLOS - C° DE VOLANTE
 ESCALA HORIZONTAL 1/50.000
 ESCALA VERTICAL 1/2.000



Perfil interesante por los caudales y espesores del Mioceno de base. Aparece en el sondeo 65.N un tramo importante de gravas y arenas gruesas, posiblemente relacionado con la lineación que discurre paralela al A° de la Huerta de Abajo.



PERFIL 7: ALTO DEL A° HUERTA DE ABAJO

ESCALA HORIZONTAL 1/25.000

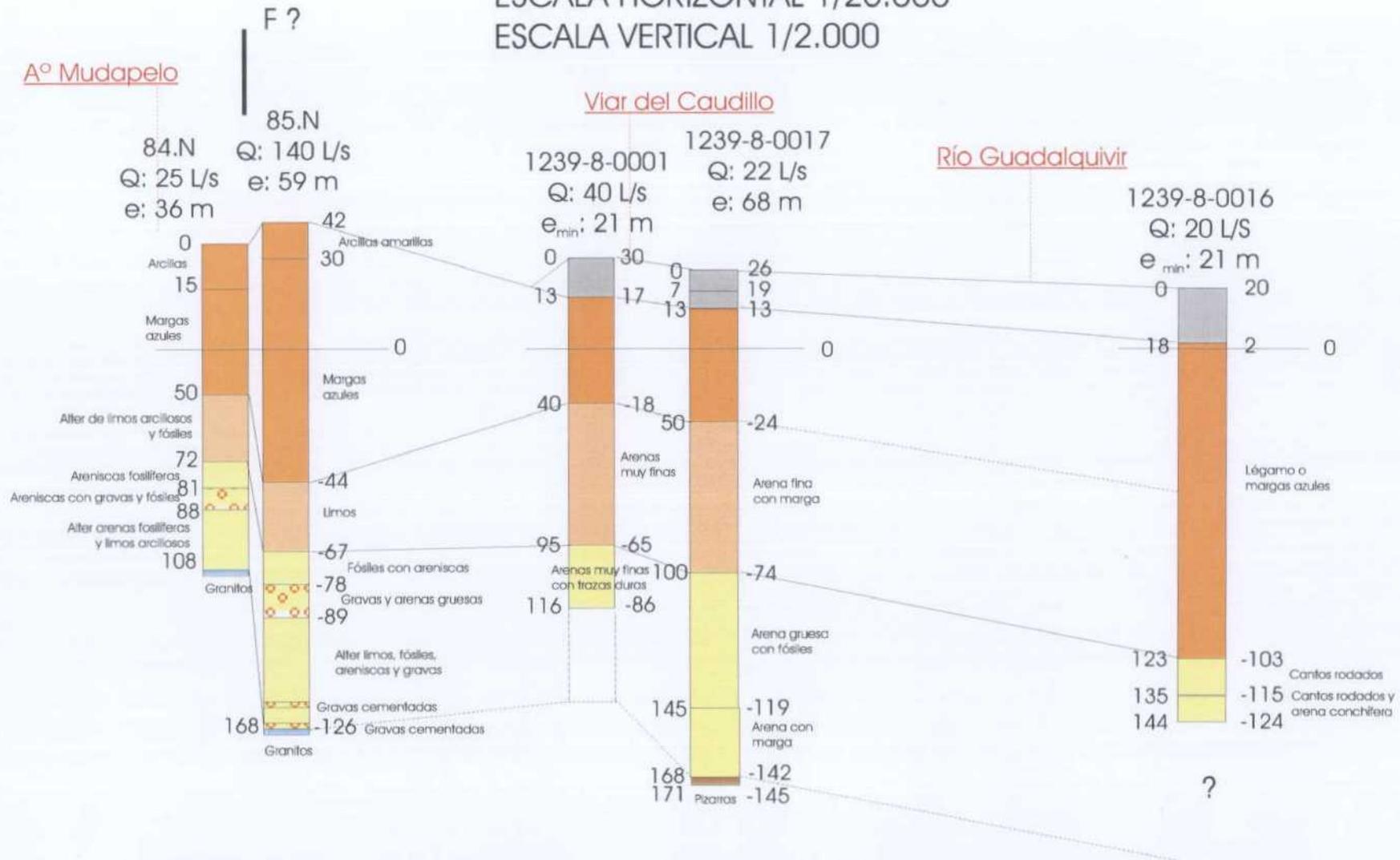
ESCALA VERTICAL 1/2.000

Buenos caudales y espesores. Se observa la irregularidad del substrato paleozoico, la fractura más importante presenta un salto de 70 m en 800 m; las fracturas deducidas por teledetección lelimitan una pequeña cubeta en el substrato.

PERFIL 8: MUDAPELO - VIAR DEL CAUDILLO

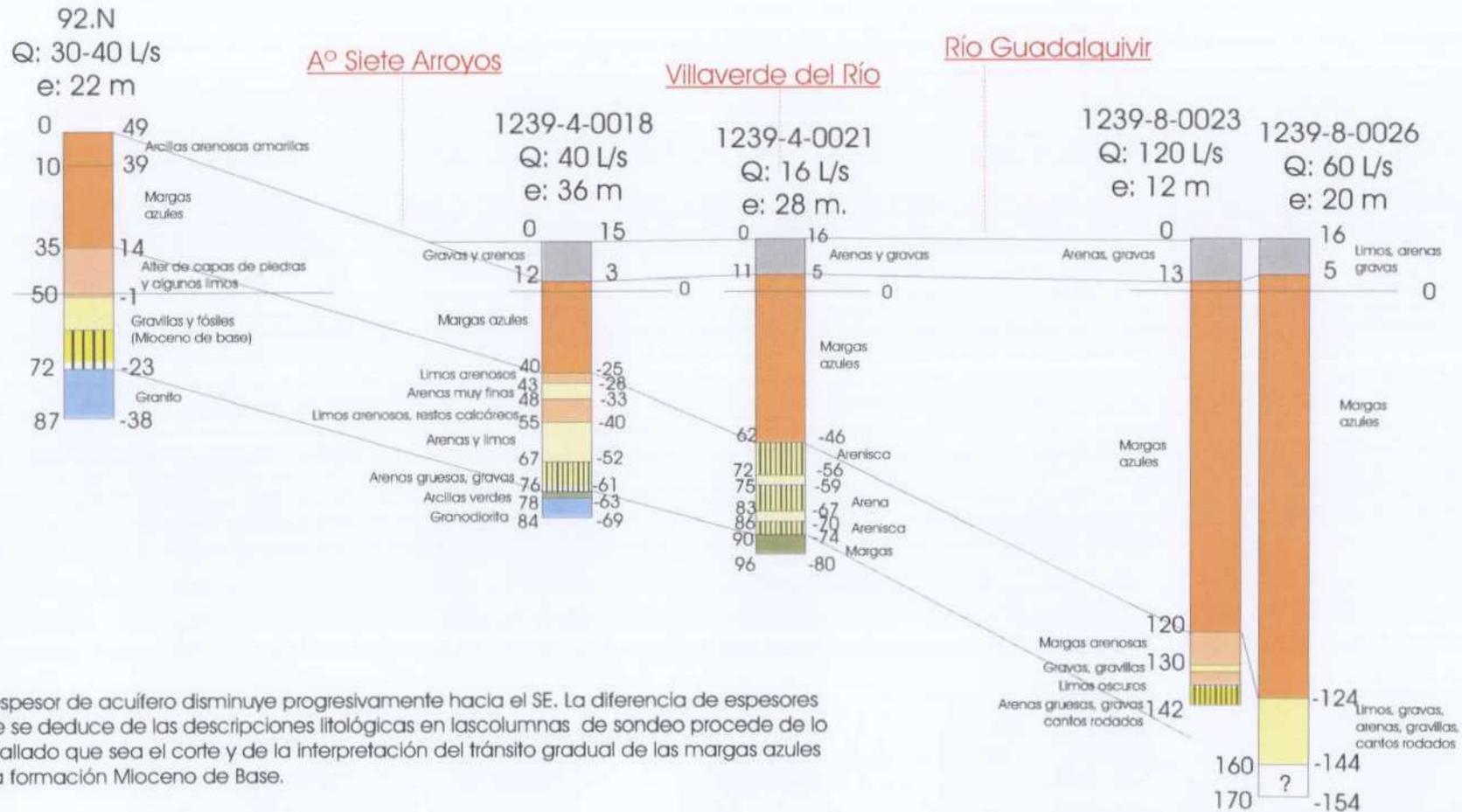
ESCALA HORIZONTAL 1/25.000

ESCALA VERTICAL 1/2.000

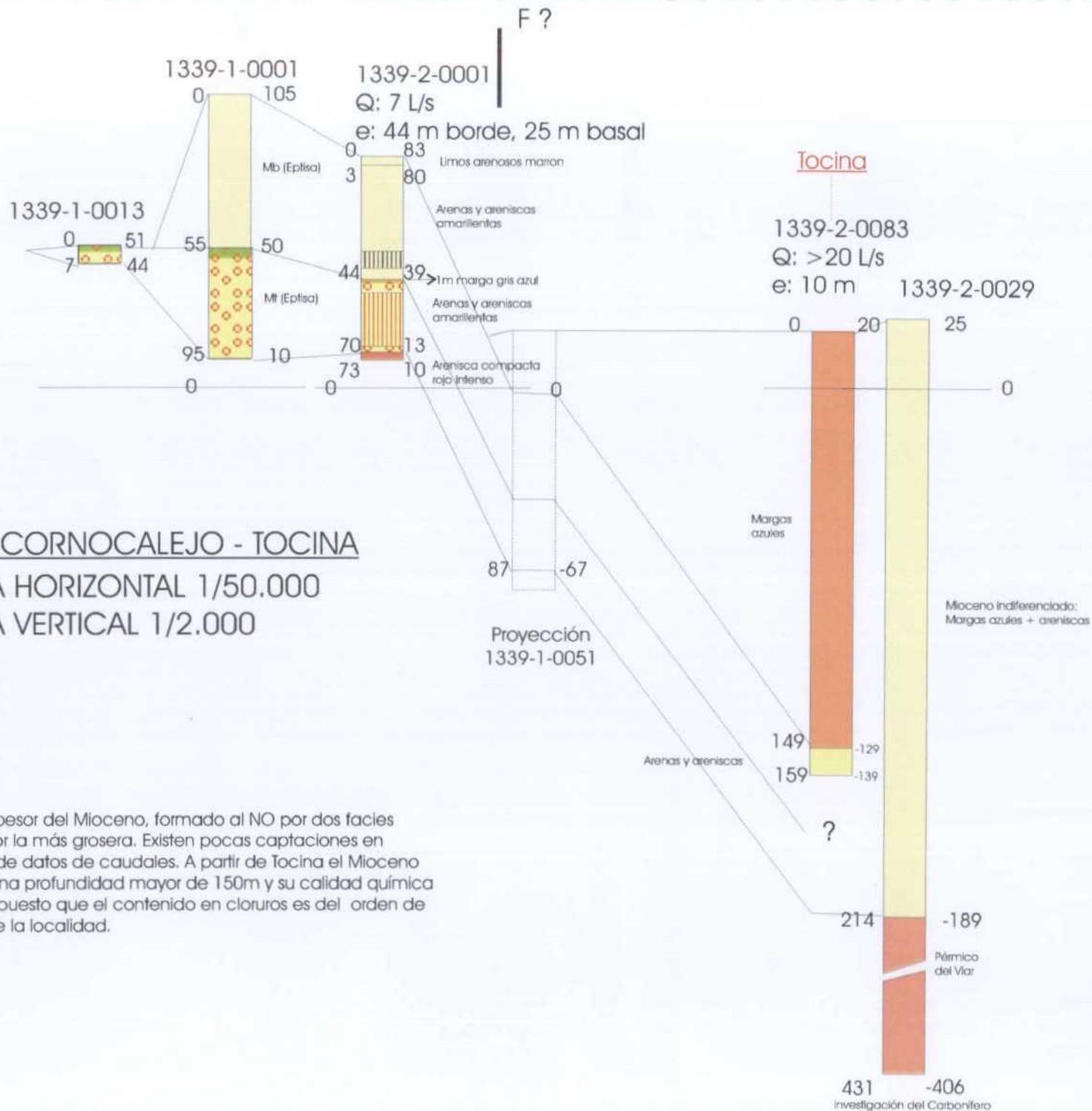


Este perfil pone de manifiesto un salto importante en el sustrato paleozoico entre los sondeos 84 y 85 (60 m en una distancia de 250 m) que podría interpretarse como una fractura que explicaría el caudal excepcional de 140 L/s que presenta el sondeo 85. El espesor de la formación acuifera, a partir de este supuesto accidente, es del orden de 60 m; aunque el sondeo 1239-8-0001 no atraviesa completamente la formación, los datos de una perforación cercana (1239-8-0018), situada a unos 200 m al NE, confirman la correlación propuesta. Las facies se caracterizan por presentar una fina alternancia de areniscas fosilíferas, gravas y limos, con un porcentaje relevante de la fracción gruesa por lo que el acuífero en este sector proporciona caudales interesantes, que suelen superar los 40 L/s.

PERFIL 9: A° SIETE ARROYOS - VILLAVERDE DEL RÍO
 ESCALA HORIZONTAL 1/25.000
 ESCALA VERTICAL 1/2.000



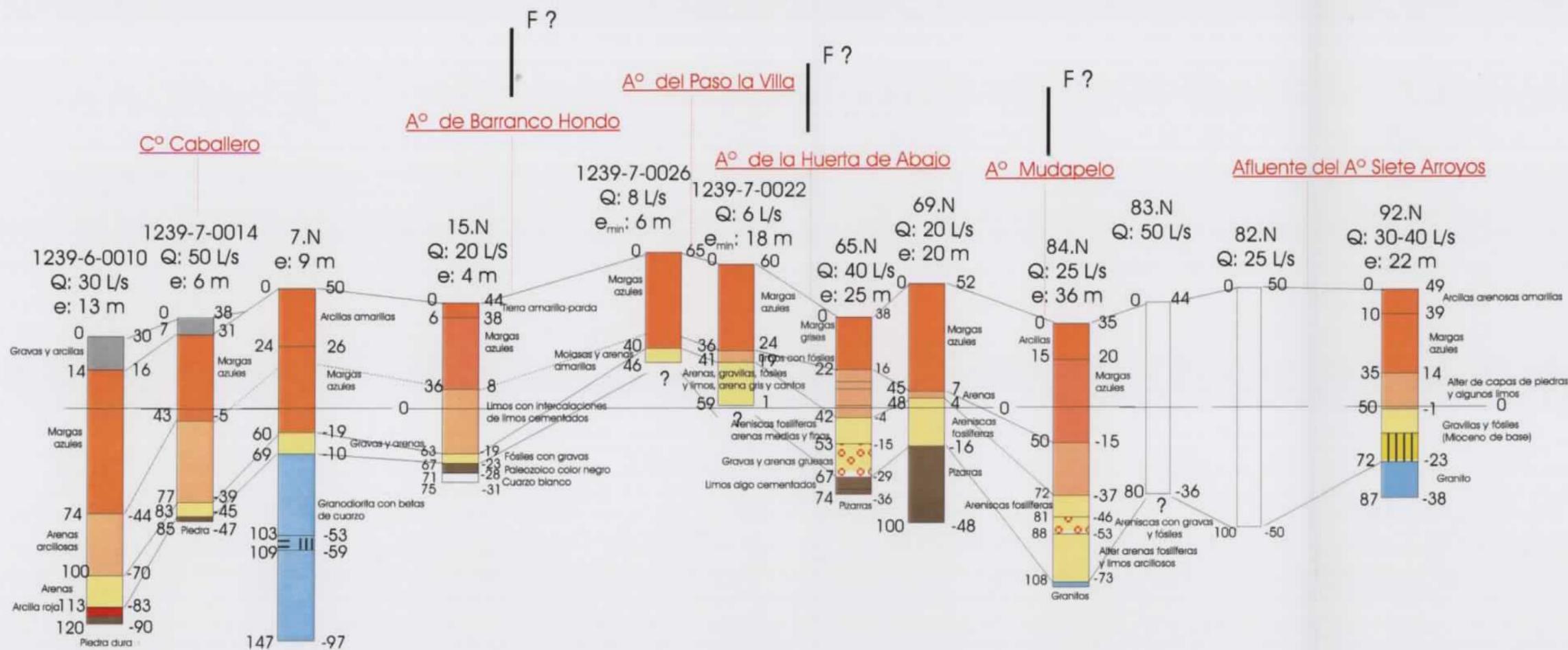
El espesor de acuífero disminuye progresivamente hacia el SE. La diferencia de espesores que se deduce de las descripciones litológicas en las columnas de sondeo procede de lo detallado que sea el corte y de la interpretación del tránsito gradual de las margas azules a la formación Mioceno de Base.



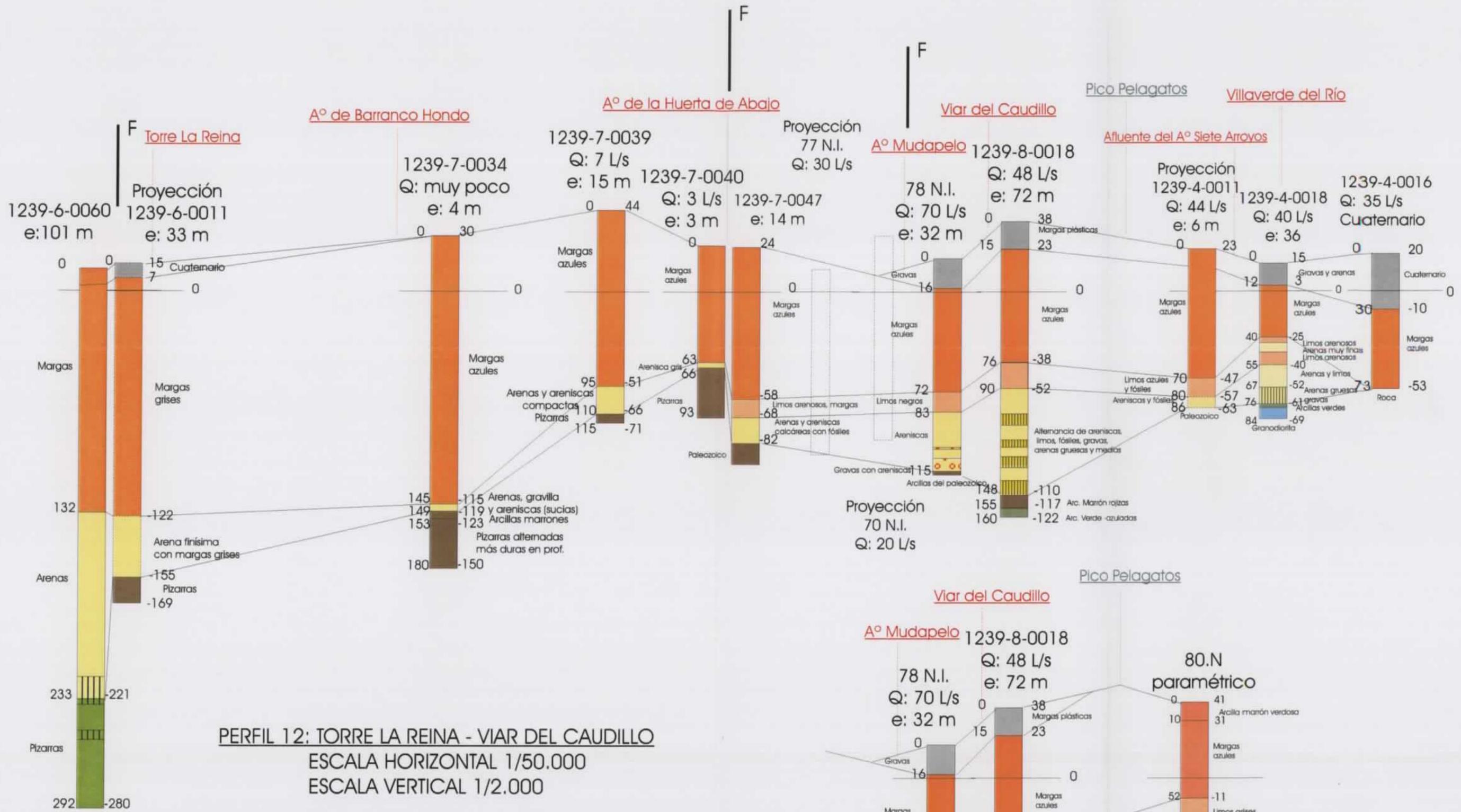
PERFIL 10: ALCORNOCALEJO - TOCINA
 ESCALA HORIZONTAL 1/50.000
 ESCALA VERTICAL 1/2.000

Destaca el importante espesor del Mioceno, formado al NO por dos facies diferentes, siendo la inferior la más gruesa. Existen pocas captaciones en el sector y no se dispone de datos de caudales. A partir de Tocina el Mioceno de Base se encuentra a una profundidad mayor de 150m y su calidad química empieza a ser deficiente puesto que el contenido en cloruros es del orden de 3000 mg/L en el centro de la localidad.

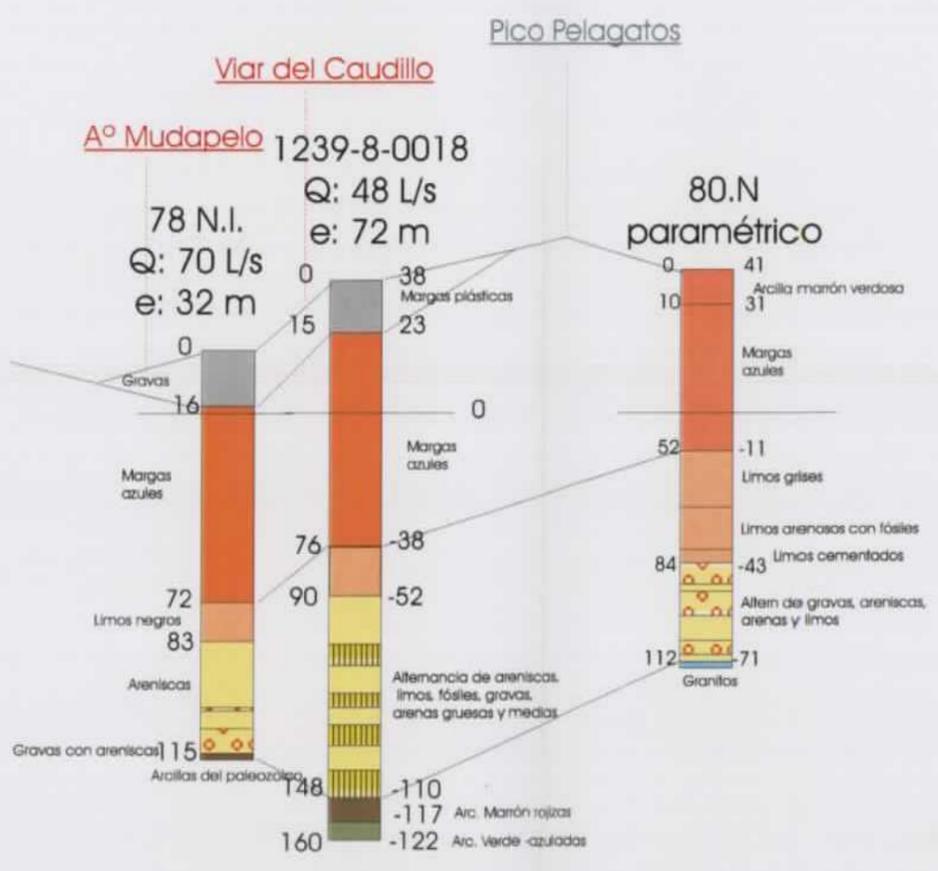
PERFIL 11: C° CABALLERO - A° MUDAPELO
 ESCALA HORIZONTAL 1/50.000
 ESCALA VERTICAL 1/2.000

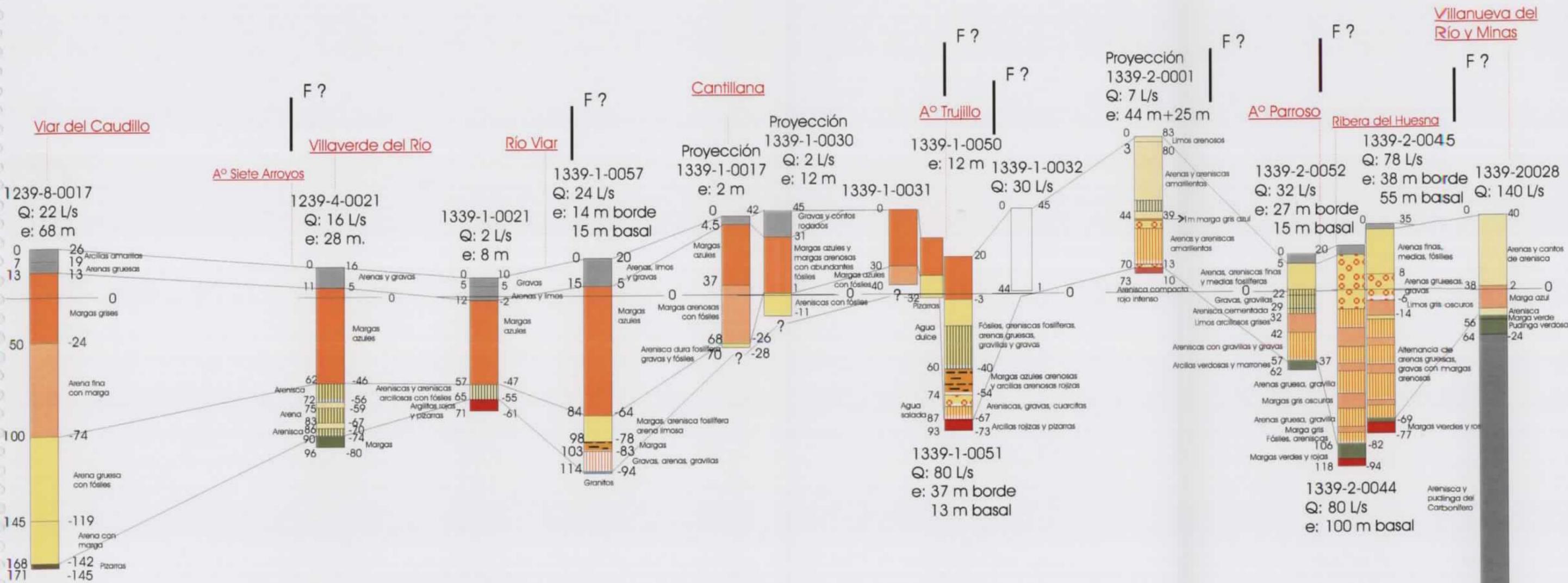


En general la topografía parece reflejar la morfología del substrato, que presenta levantamientos y hundimientos a pequeña escala. Los caudales empiezan a ser importantes a partir del A° de la Huerta de Abajo.



La primera fractura en Torre La Reina presenta un salto de 66 m en una distancia de 200 m. Entre los sondeos 1239-7-0040 y 1239-7-0047 el salto es menor, de 41 m en unos 450 m. Se produce un aumento de caudal a partir de este accidente. Del Viar del Caudillo a Villaverde del Río, disminuye la potencia, el porcentaje de gruesos; es a partir del punto 1239-8-0018 (abastecimiento al Viar) por el arroyuelo hacia el Pico de Pelagatos donde de nuevo aparece un porcentaje mayor de gravas, por lo que este sector constituye un área adecuada para ubicar un sondeo interesante. Parece confirmarse el mayor espesor de formación acuífera en los arroyos, que a su vez coinciden con los lineamientos estructurales; los arroyos se presentan encajados en líneas de fractura.





PERFIL 13: VIAR DEL CAUDILLO - VILLANUEVA DEL RÍO Y MINAS
 ESCALA HORIZONTAL 1/50.000
 ESCALA VERTICAL 1/2.000

El perfil muestra los levantamientos y hundimientos del zócalo debidos al sistema de fracturas que configuran depresiones en las que se favorece la sedimentación y la acumulación de sedimentos gruesos, así como el encajamiento de la red de drenaje a favor de éstos accidentes deducidos de la cartografía geológica y el análisis de las imágenes de teledetección. Destaca la coincidencia de los arroyos con las fracturas de dirección N-S, y el mayor espesor de facies gruesas en esos sondeos.

Los perfiles y el estudio de las columnas litológicas en general, ponen de manifiesto que:

- El acuífero entre Guillena y Burguillos (perfiles 1, 2 y 3), en el área de afloramiento, presenta unas facies más margosas (se describe la parte superior del mioceno como descompuesto arcilloso o arcillas amarillas), poco productivas, con bajos caudales. Los caudales elevados proceden de materiales fracturados del zócalo paleozoico (granitos y pizarras) salvo excepciones muy puntuales, como es el caso de los sondeos 1239-9-0035 (Q: 40 L/s) y 1239-7-0020 (Abastecimiento a Alcalá del Río, Q: 25 L/s) que atraviesan probablemente paleocanales en el fondo, de difícil ubicación. Hacia el Sur, en la zona confinada la situación es similar, disminuyendo además el espesor de acuífero (perfil 2, entre San Ignacio del Viar y Alcalá del Río) y además se describe en alguna columna la facies como "arenas sucias". En este sector la profundidad a la que se encuentra el acuífero es superior a los 130 m., lo cual dificulta además su explotación.
- Al N de Burguillos el espesor es muy reducido y los pozos explotan casi únicamente los granitos fracturados del zócalo paleozoico; el grado de explotación es elevado dada la densidad de puntos inventariados, procedentes del nuevo inventario.
- Es a partir del A° Mudapelo hacia el NE (Zona del Viar del Caudillo y Villaverde del Río) donde aparece la zona más favorable para la ubicación de sondeos. Los caudales y espesores son importantes, las facies presentan términos groseros de notable espesor y en general se caracterizan por un potente espesor de una alternancia de limos, arenas y gravas, con bastantes arenas gruesas y gravas. Es la zona más interesante. Los sondeos productivos suelen estar situados en el contacto con los arroyos (A° de la Huerta de Abajo, Mudapelo, afluente NW-SE del A° Siete Arroyos) como muestran los perfiles 11 y 12.
- Esta situación, la coincidencia de elevados caudales en el contacto con los arroyos, también parece suceder entre Cantillana y Villanueva del Río y Minas (perfil 13), aunque no se dispone de sondeos suficientes para determinar esta relación.
- La escasa información del subsuelo en el área de Cantillana - Villanueva del Río y Minas y la existencia comprobada de una zona de interés en el sector del Viar del Caudillo - Villaverde del Río, determina que se profundice en el conocimiento de éstos sectores. Para ello se propone la realización de una campaña de investigación geofísica (SEV) y

mecánica (5 sondeos de reconocimiento) en el área, cuyo diseño y desarrollo se recoge en el Anexo IV.- Campaña de Sondeos eléctricos verticales y Anexo V Sondeos Mecánicos de Investigación.

6.3.3.- RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN MECÁNICA Y GEOFÍSICA

Previo a la realización de la campaña de sondeos mecánicos, se ha realizado una campaña de geofísica (S.E.V.), en la zona comprendida entre Burguillos y Villanueva del Río y Minas, diseñada para investigar las discontinuidades marcadas en el estudio de teledetección y con la finalidad de definir en profundidad las mismas. En el Anexo IV se muestra el Informe de la Campaña de Sondeos Eléctricos Verticales (S.E.V.).

Dicha campaña constó de 35 S.E.V. y para su interpretación se han utilizado los datos de 40 sondeos mecánicos de la base de datos del Inventario de Puntos de Agua del IGME.

Las principales conclusiones de este estudio son:

- La constatación del hundimiento de la cuenca sedimentaria de norte a sur y el consiguiente aumento en esta dirección de la potencia de las margas. El hundimiento se produce según discontinuidades que mantienen la dirección de la cuenca N 60°.
- Se aprecia una distribución del zócalo diferente al E y al O de Cantillana. La parte al oeste es más homogénea, si bien se aprecia la acción sobre el zócalo de las líneas de fractura de dirección norte-sur o N 120°, sobre las que se encuentra encajada la parte más importante de la red fluvial y a la que se asocian depresiones o zonas de hundimiento. Por su parte, la zona oriental de Cantillana, a partir del cauce del río Viar y vinculado al conjunto de fallas del Viar, muestra un hundimiento pronunciado del zócalo.
- En la zona oriental, entre Cantillana y Villaverde del Río, se conoce, por sondeos mecánicos antiguos, la presencia de aguas saladas en el acuífero Mioceno de Base. Este fenómeno produce una distorsión en la interpretación de los S.E.V. ya que amplía la potencia de la zona conductora (margas) y hace que se sume parte del zócalo al paquete conductor.
- Finalmente, como conclusión al estudio geofísico, se propone como zona más idónea para la realización de sondeos mecánicos de investigación de las aguas subterráneas del acuífero Mioceno, el sector comprendido entre Esquivel y

Villaverde del Río y al este de Cantillana, entre el pueblo y el río Guadalquivir, a fin de delimitar y definir cuantitativamente y cualitativamente las características del acuífero en esta zona de marcado hundimiento del zócalo.

La campaña de sondeos mecánicos se realizó en las zonas propuestas anteriormente, proximidades del arroyo Mudapelo y El Viar, entre Esquivel y Villaverde del Río, y al este de Cantillana, cerca del casco urbano y justo pasado el río Guadalquivir.

Las perforaciones fueron realizadas mediante sonda a rotoperCUSión neumática a ϕ 220 mm, quedando entubados dos sondeos en PVC de ϕ 125 mm.

En el Anexo V se muestra el Informe sobre los Sondeos Mecánicos de Investigación.

Las conclusiones principales de dicho informe son las siguientes:

- Los cinco sondeos realizados atraviesan potencias de tramos acuíferos superiores a 40 m, y muestran valores de caudales estimados superiores a 50 l/s.
- En general, las perforaciones han mostrado indicios, bajo el Mioceno de Base, de estar en zonas de discontinuidad, bien por muestras de fractura del basamento cristalino granítico (S-1), bien por muestras de rellenos aluviales de paleocanales (S-6) o bien por muestras de paleorelieves en sentido amplio (S-2).
- Estas discontinuidades, tal como se planteaba en la hipótesis inicial, funcionan en conexión hidráulica con el acuífero aportándole caudales procedentes de su zona de recarga (Paleozoico) y proporcionándole mayor espesor, lo que se traduce en mayor producción de las captaciones.
- La calidad de las aguas de los sondeos de la zona Mudapelo-El Viar es apta para el consumo humano, si bien se aprecia un pequeño exceso en el contenido de las mineralizaciones de Al, Fe y Mn. Respecto a los sondeos al este de Cantillana, la calidad de sus aguas no es apta para el consumo debido a su elevada mineralización, que aumenta con la profundidad y llega a alcanzar los 53.000 μ S/cm en el S-4.

6.4.- FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO

6.4.1.- RECARGA Y DESCARGA

La recarga natural del acuífero se realiza principalmente a partir de la infiltración directa del agua de lluvia sobre la superficie aflorante y de la escorrentía superficial de los materiales paleozoicos situados al N. Localmente puede producirse una alimentación subterránea desde niveles más permeables o fracturados del paleozoico.

La descarga en régimen natural se produce mediante el drenaje hacia los cauces superficiales y a través de los manantiales situados en el contacto con las margas azules tortonienses.

En la actualidad la descarga se realiza por bombeo, en captaciones destinadas a abastecimiento urbano y regadío, y mediante el drenaje natural - durante el período de lluvias - de los cauces superficiales que atraviesan transversalmente el afloramiento; funcionando los cauces como drenes o fuentes de recarga según la época del año y del equilibrio que se establezca entre la recarga natural y las extracciones.

6.4.2.- PIEZOMETRÍA

El agua subterránea en el sector de estudio circula preferentemente en sentido NO-SE, aunque localmente puede variar ligeramente. El mapa de isopiezas realizado en 1994 por la Dirección General de Obras Hidráulicas (Figura 8) muestra un sentido de flujo general hacia el SE, excepto en las inmediaciones de Cantillana y Villanueva del Río y Minas donde la circulación se produce hacia el SO.

En el área de acuífero libre, la superficie piezométrica está situada generalmente entre 60 y 40 msnm; destaca la elevación del nivel piezométrico en el área de Burguillos que desciende desde cotas de 120 msnm hasta la cota 0 al sur de la población, bajo las margas azules tortonienses, lo que parece indicar una recarga adicional en el sector.

La conexión lateral del acuífero entre Villaverde del Río y Cantillana, que supuestamente está limitada por la falla normal del Viar, se refleja en la figura como una indeterminación

puesto que el trazado de la isopieza de 0 msnm en la hoja de Alcalá del Río (962) se continúa con la isopieza de 20 msnm en la hoja de Lora del Río (963), lo cual debe suponer un error en el trazado. No existe por tanto ningún dato hidrogeológico fiable que apunte hacia la desconexión lateral del acuífero, si bien sería necesario establecer una piezometría detallada de la zona para comprobarlo. En este sentido, la correlación de columnas litológicas presentada anteriormente en el perfil 13, no parece indicar tal desconexión, aunque sí se produce un salto en el substrato de 40 m en una distancia de unos 1300 m, entre los sondeos 1339-1-0021 y 1339-1-0057, que podría dificultar el flujo lateral, pero no compartimentar el acuífero; en otros lugares el salto de falla es mucho mayor p.e. en el Aº Trujillo, donde sí podría darse esa desconexión.

La evolución temporal de la superficie piezométrica del acuífero se determina a partir de los datos existentes en la Red de Control Piezométrico de éste Organismo (Figura 9).

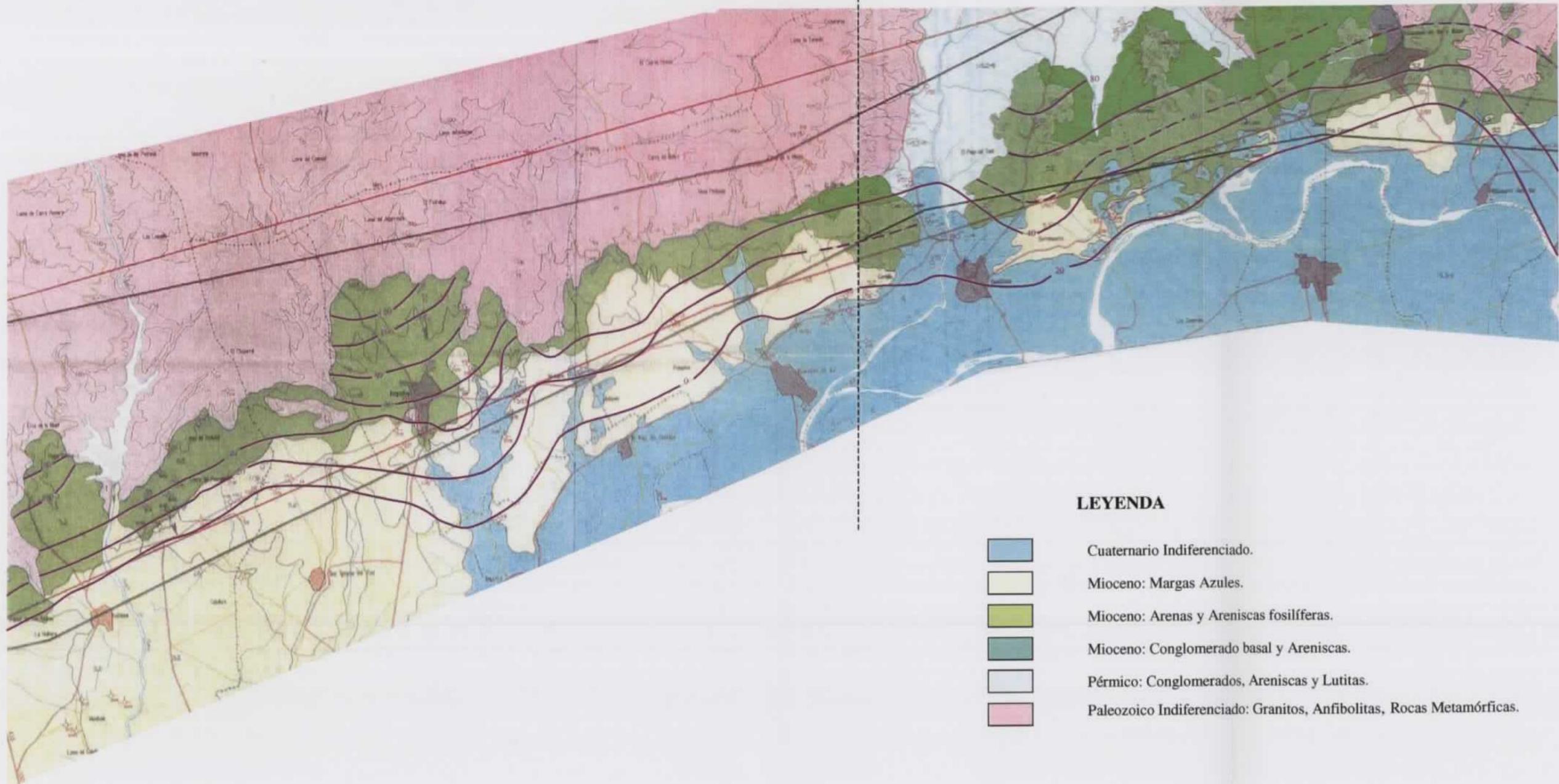
En el área de estudio, la red está constituida por 5 puntos homogéneamente distribuidos (aunque uno de ellos está temporalmente interrumpido), cuya situación puede verse en el mapa de la Figura 9. El seguimiento del nivel se realiza desde el año 1983 con una periodicidad cuatrimestral, si bien desde hace algunos años las medidas son más frecuentes, llegando a ser bimensuales.

La densidad de la Red de Control Piezométrico actualmente operativa (4 puntos), atendiendo a una superficie acuífera aflorante de unos 57 Km², es de 1 punto por cada 14 Km² (1/14), valor muy superior al que presenta la Cuenca del Guadalquivir en conjunto y a la media del territorio español, 1/35 y 1/55 respectivamente (DGOHCA, 2000), por lo que el grado de seguimiento del nivel piezométrico del acuífero se considera suficientemente representativo.

ISOPIEZAS DEL ACUÍFERO MIOCENO DE BASE. 1994.

Hoja 962. Alcalá del Río

Hoja 963. Lora del Río

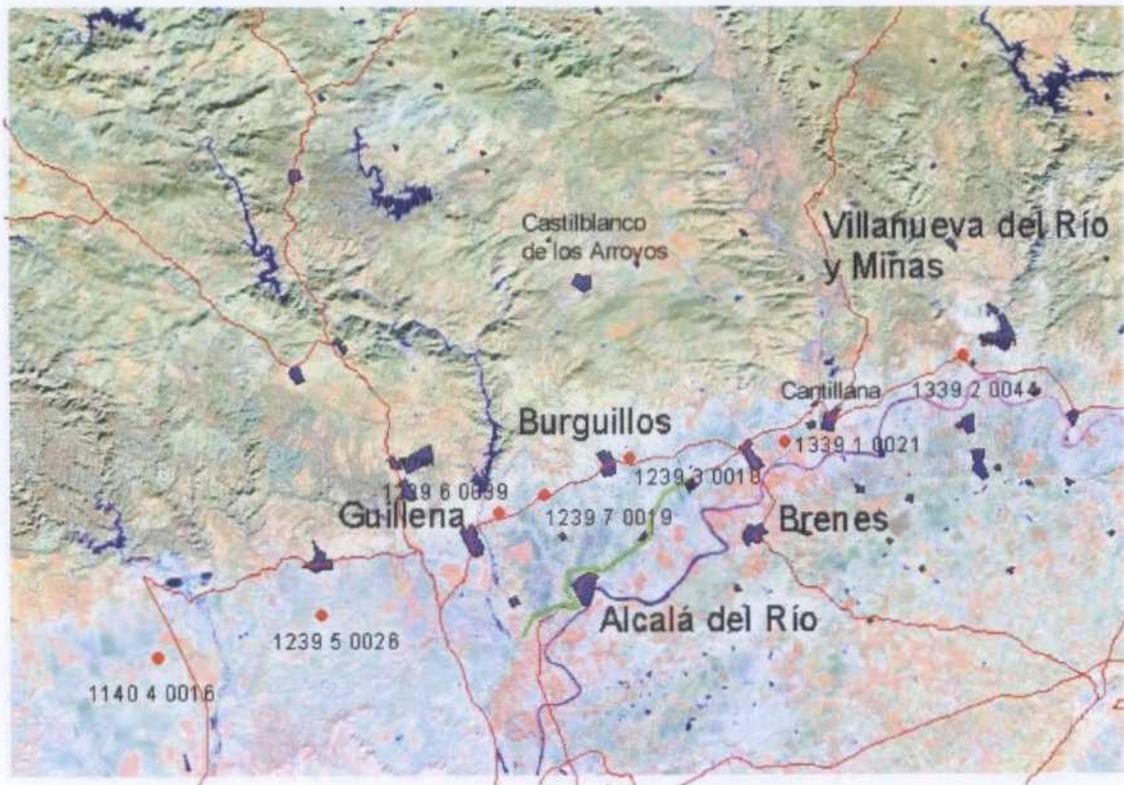


LEYENDA

-  Cuaternario Indiferenciado.
-  Mioceno: Margas Azules.
-  Mioceno: Arenas y Areniscas fosilíferas.
-  Mioceno: Conglomerado basal y Areniscas.
-  Pérmico: Conglomerados, Areniscas y Lutitas.
-  Paleozoico Indiferenciado: Granitos, Anfibolitas, Rocas Metamórficas.

Figura 8.- Mapa de Isopiezias. 1994. Escala 1/100.000. Fuente: Dirección General de Obras Hidráulicas.

Figura 9. Mapa de situación de la red piezométrica



La evolución piezométrica que presenta el acuífero, de SO a NE es la siguiente:

- **Punto 1239-6-0039** (Figura 10). Situado a unos 2.2 Km al NE de Guillena.

El nivel presenta una evolución anual constante, oscilando entre las cotas 5 y 10 msnm.; desciende durante los meses estivales recuperándose con el período de lluvias. Se acusa la sequía de 1995 con descenso máximo de 17.21 m. La tendencia del nivel a largo plazo, para el período de medidas existente (1994 - 1997), es estable.

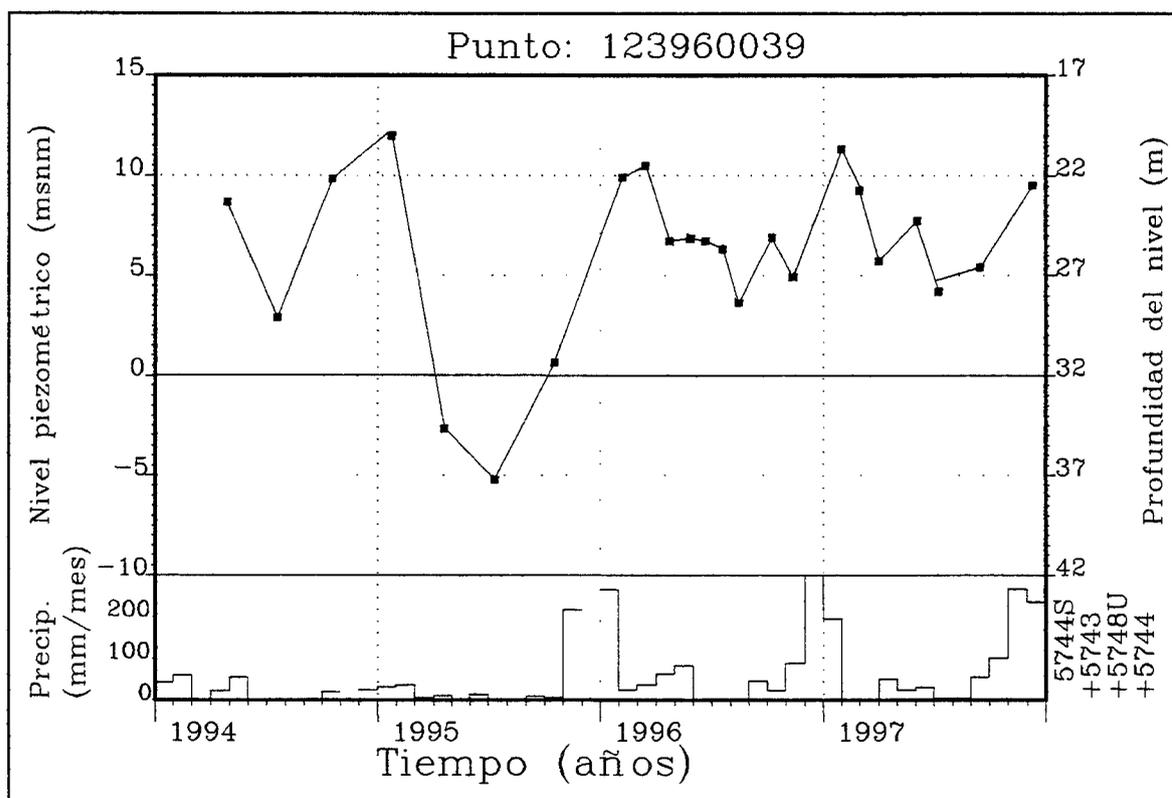


Figura 10.- Evolución piezométrica al NE de Guillena

- **Punto 1239-7-0019** (Figura 11). Situado entre Guillena y Burguillos.

El nivel se recupera de la sequía de 1981/83 ascendiendo a partir de Septiembre de 1983 y se mantiene durante los años 84/87 a una cota media de unos 28 msnm hasta el brusco descenso de Septiembre de 1987, no relacionado aparentemente con la pluviometría.

Posteriormente el acuífero recupera una cota media de 20 msnm, produciéndose a partir de 1994 un descenso continuado que sitúa el nivel en la actualidad a una cota de 11 msnm.

En general el punto refleja una variación de nivel estacional, mostrando una clara tendencia al descenso. El descenso acumulado desde el máximo nivel (Marzo 1986) hasta la actualidad (Mayo 2001) es de 18.75 m.

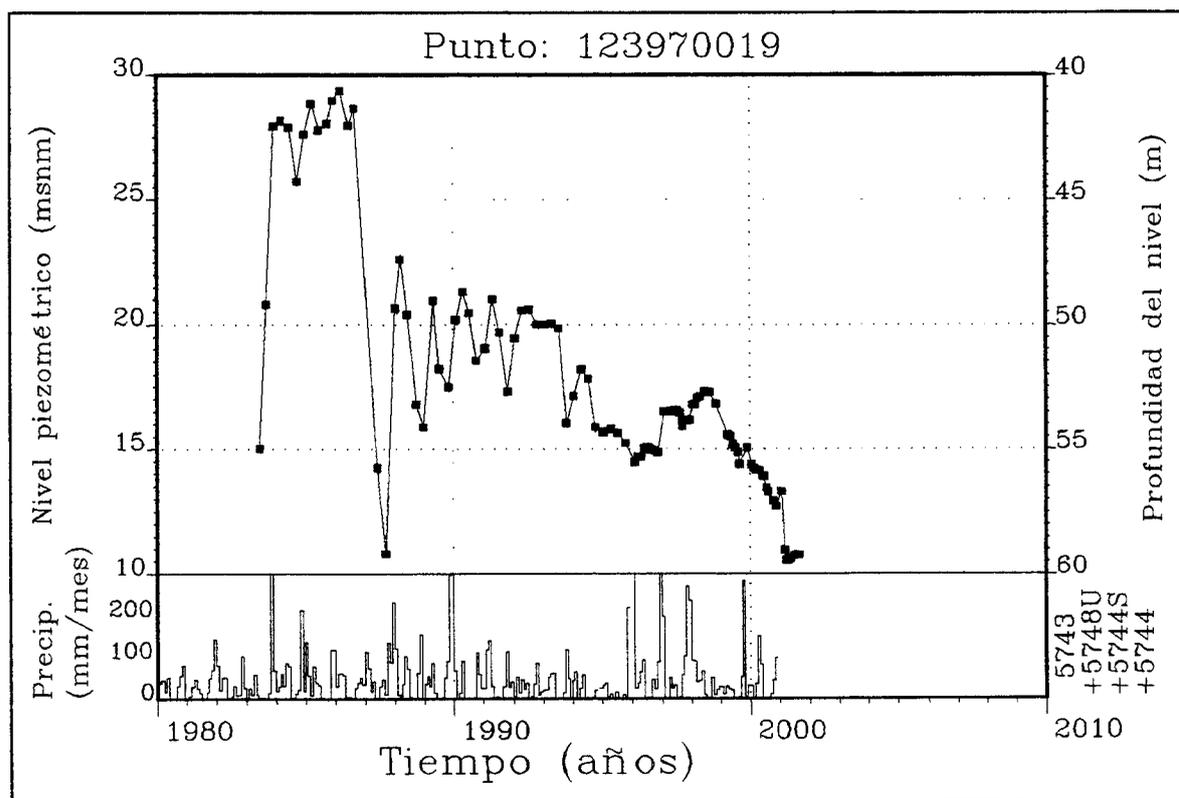


Figura 11.- Evolución piezométrica entre Guillena y Burguillos

- **Punto 1239-3-0018** (Figura 12). Situado a unos 1.2 Km al NE de Burguillos, cerca del A° de la Huerta de Abajo.

El nivel a partir de Septiembre de 1983 se mantiene a una cota media de 46.5 msnm con una oscilación estacional aproximada de ± 1 m. A partir de Abril de 1991 se inicia un descenso continuado que dura hasta 1996 situando el nivel a una cota de 30 msnm. El posterior período lluvioso (1996/98) hace ascender el nivel a 40 msnm. Se refleja la menor pluviometría del año 1999, situándose en la actualidad el nivel a una cota de 35 msnm.

Esta evolución es muy similar al punto anterior, con una clara tendencia al descenso del nivel. El descenso acumulado desde el máximo (Diciembre 1984) hasta la actualidad (Mayo 2001) es de 12.82 m.

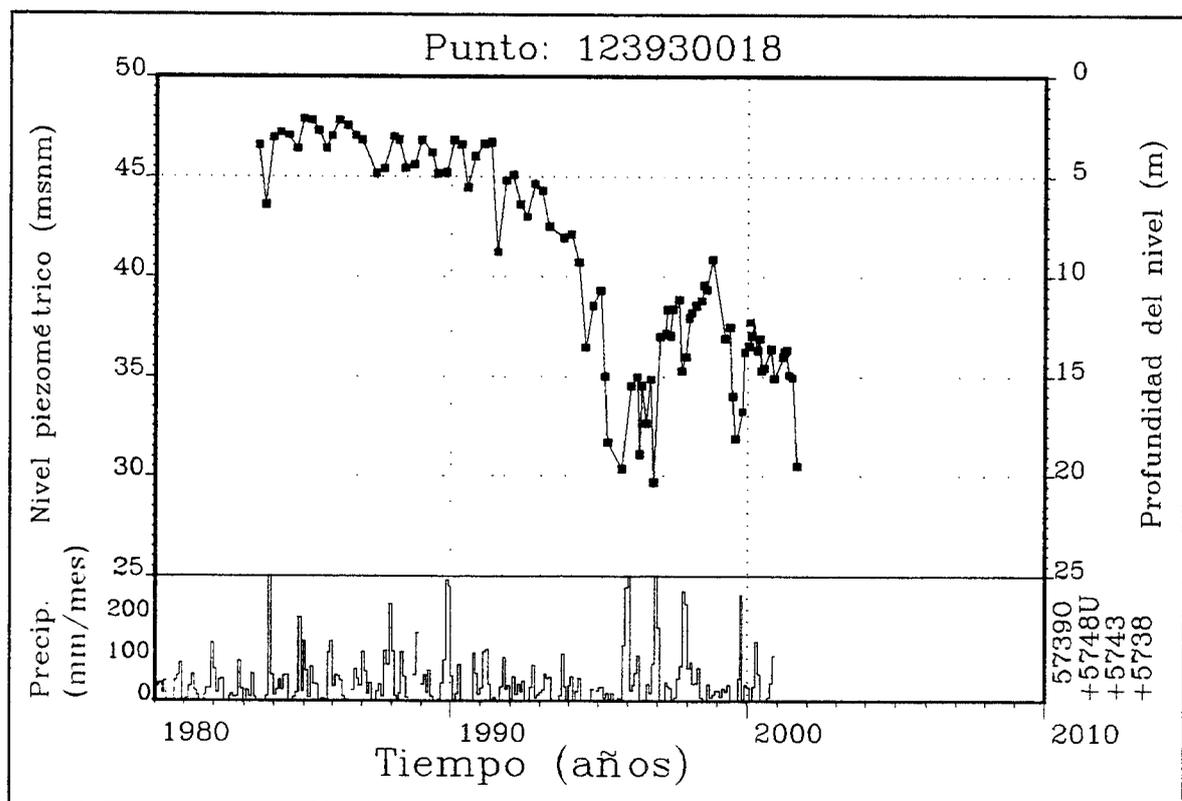


Figura 12.- Evolución piezométrica al NE de Burguillos

- **Punto 1339-1-0021** (Figura 13). Situado a unos 2 Km al NE de Villaverde del Río, entre ésta localidad y Cantillana.

El acuífero en éste punto es surgente, desde 1983 hasta 1989, la cota de surgencia se sitúa a 20 msnm. A partir de 1989 se inicia un suave descenso de nivel (5 m en 6 años), produciéndose en Enero de 1995 un brusco descenso de casi 15 m en Octubre de 1995, coincidente con el final del período de sequía 92/95, como ocurre en los anteriores puntos. De igual forma, los años lluviosos 96 a 98 sitúan el nivel a una cota media de 15 smnm.

La tendencia del acuífero en este punto es al ligero descenso, siendo su valor acumulado, desde el máximo (al inicio en 1983) hasta la situación actual (Mayo 2001), de 4.65m.

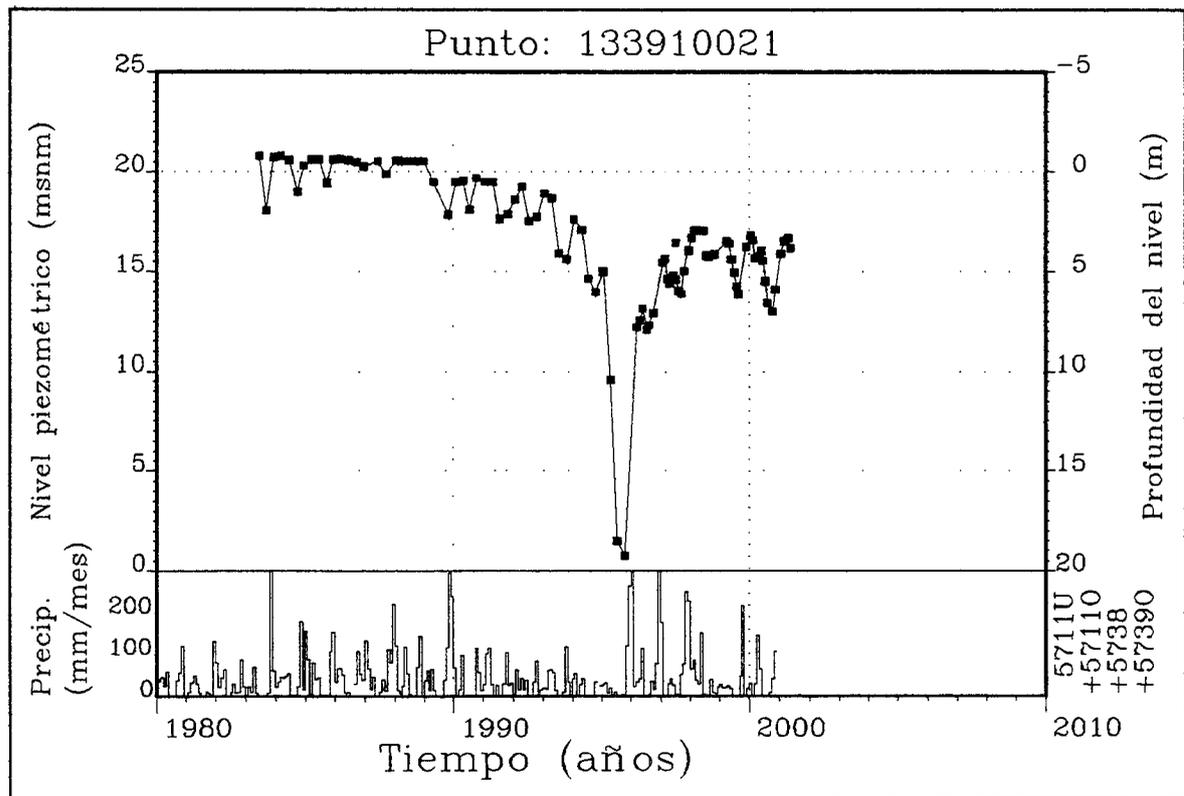


Figura 13.- Evolución piezométrica entre Villaverde del Río y Cantillana.

- **Punto 1339-2-0044** (Figura 14). Situado en la Ribera de Huesna a 2 km de Villanueva del Río y Minas.

La evolución piezométrica en este punto es notablemente diferente a la de los puntos anteriores pues muestra una clara tendencia al ascenso de nivel. Desde una cota de 26 msnm, el acuífero inicia una subida gradual que sitúa el nivel a 27.5 msnm durante la sequía 92/95. A partir de Octubre de 1995 se inicia de nuevo el ascenso paulatino, estando en la actualidad a una cota de 31 msnm.

En total el acuífero ha subido, desde el mínimo valor (Septiembre 1984) hasta la actualidad (Mayo 2001), 15.84 m.

El origen de esta tendencia debe de estar en la disminución de las extracciones debido probablemente, a la menor actividad minera de la zona que extraía grandes volúmenes de agua para el drenaje de la mina. Por ello el acuífero en la actualidad se está llenando, acusando al mismo tiempo las variaciones estaciones y anuales climáticas.

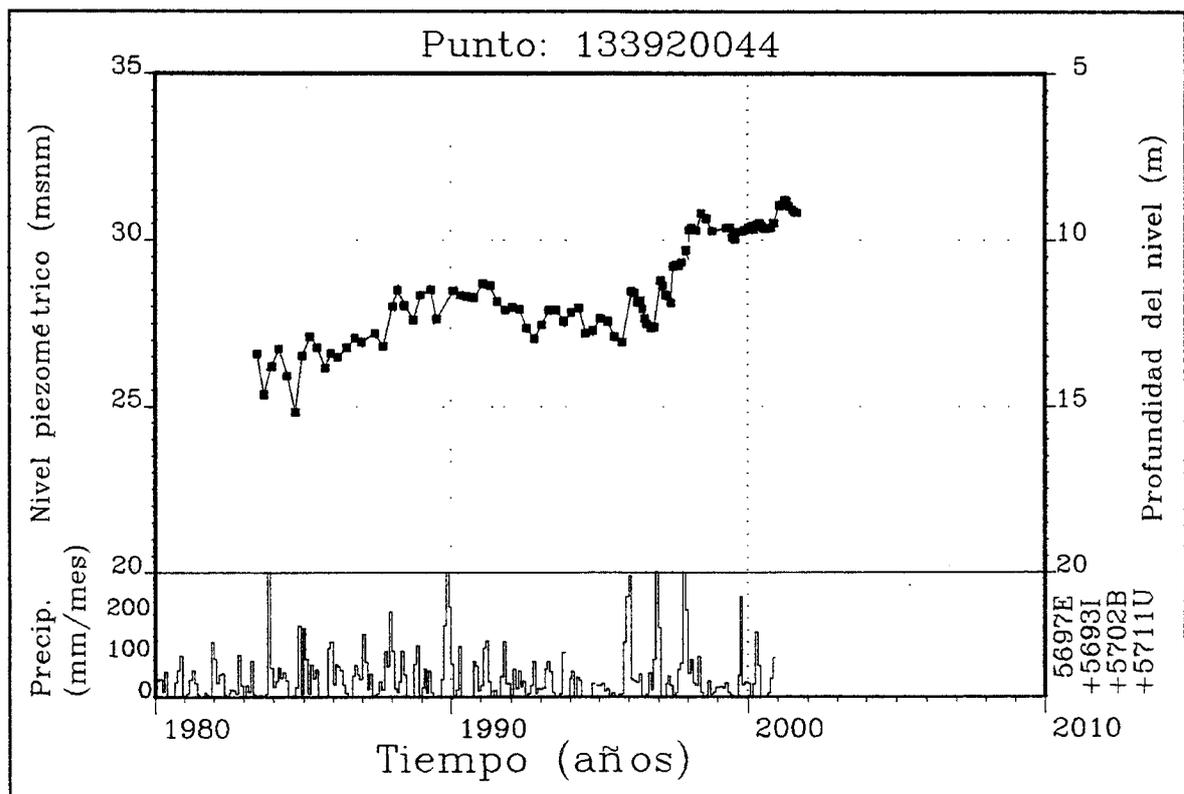


Figura 14.- Evolución piezométrica en Villanueva del Río y Minas.

De la observación de las gráficas anteriores, así como de otras correspondientes a puntos próximos al área de estudio pero fuera de ella (ANEXO IX), se deducen las siguientes conclusiones respecto a la piezometría:

- La zona al sur y sureste de la localidad de Guillena, en el entorno a la Rivera de Huelva y hasta la Torre del Águila, el nivel ha ido sufriendo sucesivos descensos debidos tanto a la entrada en funcionamiento de nuevas explotaciones como al efecto conjunto de los periodos de sequía, de forma que en la actualidad se acumulan más de 15 m de descenso sin visos de recuperación. Esta zona puede decirse que está técnicamente sobreexplotada.
- En el entorno de Burguillo comienza a verse una recuperación del acuífero ya que si bien los descensos en determinadas épocas han sido pronunciados (hasta 15 m sobre el régimen considerado natural en la zona), también se ha observado una respuesta a las precipitaciones, situándose en la actualidad el nivel entre 7 m y 10 m.
- El entorno de Villaverde del Río es la zona que presenta menos influencia de las extracciones y un régimen más parecido al natural o no influenciado, y en ella, la diferencia media de niveles entre la actualidad y la época anterior a 1990, es de 2 m.
- Ya en las proximidades de Villanueva del Río y Minas, el punto de control piezométrico presenta una evolución anómala ya que desde 1983, año en que comenzaron las mediciones, la tendencia anual de la evolución piezométrica ha sido permanentemente ascendente. La justificación de este fenómeno hay que buscarla en la influencia que tiene el piezómetro por los bombeos de la mina de Villanueva, que pararon aproximadamente en esa época. Desde 1998 dichos descensos son menores y parece haberse alcanzado un régimen natural 4 m por encima del que había en 1983.
- Finalmente comentar, que los piezómetros situados al este de la zona de estudio indican un incremento de la explotación entre Peñaflores y Posadas, que ha llevado a una situación de descenso acumulado 1983-2001 de entre 15 m y 20 m, con valores extremos de descenso entre 25 m y 40 m.

6.4.3.- PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Las propiedades hidráulicas del acuífero deducidas de los ensayos de bombeo que se han realizado en la zona, y que constan en los archivos de éste Instituto, se resumen en la siguiente tabla.

TABLA I.- PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL ACUÍFERO MIOCENO DE BASE (IGME)

PUNTO	USO Abto.	FECHA	TIEMPO BOMBEO	T (m ² /s)	Q _m (L/s)	q (L/s/m)	B (s ² /m ⁵)	S
1239-8-0018	El Viar	25/03/81	27 horas	1,3-1,9x10 ⁻³	49,5	1,53	500	
1339-1-0057	Cantillana	04/07/95	8 horas	29-32 m ² /d	24			3x10 ⁻³ estimado
1339-2-0044	Villanueva del R. y M.	23/04/81	10 horas	5,5x10 ⁻³	81,42	5,1	1780	
1339-2-0045	Villanueva del R. y M.	02/04/81	10 horas	6,77x10 ⁻³	82,73	4,87	1610	
1339-2-0052	Tocina	15/11/77	24 horas	3,37x10 ⁻³	32,3	5,021	1475	
1339-2-0081	Tocina	12/03/85	4 h 30 min	4x10 ⁻³	5			6,8x10 ⁻³
1239-4-0018	Villaverde del Río	26/12/84	2 h 25 min	1x10 ⁻³	44			4,3x10 ⁻⁴
1239-4-0019	Villaverde del Río	22/10/91	3 horas	5x10 ⁻⁴	3			
1239-6-0024	Agrícola	10/01/85	10 horas	1x10 ⁻³	49			
1239-6-0025	Agrícola	08/03/85	7 horas	3x10 ⁻⁴	11			

Otros valores existentes en el entorno de la zona de estudio (Yacimiento "Las Cruces") se presentan en la Tabla II.

TABLA II.- PROPIEDADES HIDRÁULICAS EN LA ZONA DEL YACIMIENTO "LAS CRUCES"

UNIDAD	TRANSMISIVIDAD (m ² /día)	PERMEABILIDAD (m/día)	COEF. ALMACENAMIENTO
Margas del Terciario		2x10 ⁻⁴ a 5x10 ⁻⁷	
Areniscas del Terciario	8 a 191	0.4 a 0.8	5x10 ⁻⁵ a 4x10 ⁻⁴
Rocas fracturadas del Paleozoico	10 a 505	0.3 a 17	10 ⁻³ a 10 ⁻⁴

(Fuente: Cobre Las Cruces, S.A., Diciembre 2000)

Las estimaciones de permeabilidad de las margas se basan en el programa de ensayos de inyección llevado a cabo en el sondeo GT13 por el IGME en 1999. Las estimaciones de la arenisca se obtienen de los estudios hidrogeológicos y las propiedades hidráulicas de las rocas fracturadas se estimaron a partir de datos de ensayos de bombeo.

7.- HIDROQUÍMICA

El conocimiento de las características químicas de las aguas subterráneas representa un aspecto muy importante dentro de cualquier investigación hidrogeológica, máxime cuando la finalidad de la investigación vaya a ser la utilización de los recursos hídricos para el abastecimiento de la población, como es el caso del presente estudio. Es entonces cuando éstas características químicas deben cumplir con unos requisitos mínimos de calidad para poder ser consumidas por el hombre.

Así pues, en función de la composición y cantidad de elementos disueltos que presente - es decir, en función de su "calidad" - el agua es susceptible de ser utilizada en diferentes aplicaciones (agricultura, industria, población...), pero se establece como uso prioritario, para las aguas de mejor calidad, el abastecimiento urbano.

7.1.- DATOS DE PARTIDA

Para el estudio de la calidad química de las aguas del acuífero se ha realizado la recopilación de todos los datos químicos existentes en este Organismo desde 1960 hasta la actualidad, lo que representa un total de 184 análisis químicos procesados, que se incluyen íntegramente en el Anexo VI. La información se ha completado con la toma de muestras puntuales durante la realización de los sondeos mecánicos de investigación.

El origen de los datos preexistentes procede, fundamentalmente, de las siguientes fuentes:

- IGME. Análisis realizados para distintos sondeos de abastecimiento público.
- IGME, 1982. Estudio hidrogeológico actualizado del Sistema Acuífero 26 "Mioceno de Base". Tramo Niebla - Posadas.
- IGME. Red de Control de Calidad de Puntos Acuíferos.

El total de puntos acuíferos (pozos, sondeos, manantiales) que contienen información química en el sector de estudio es de 44, y su distribución espacial queda reflejada en el mapa de la Figura 15.- Situación de los Puntos Singulares de Calidad y de la Red de Control de Calidad de la U.H. 05.49, Sector Guillena - Villanueva del Río y Minas.

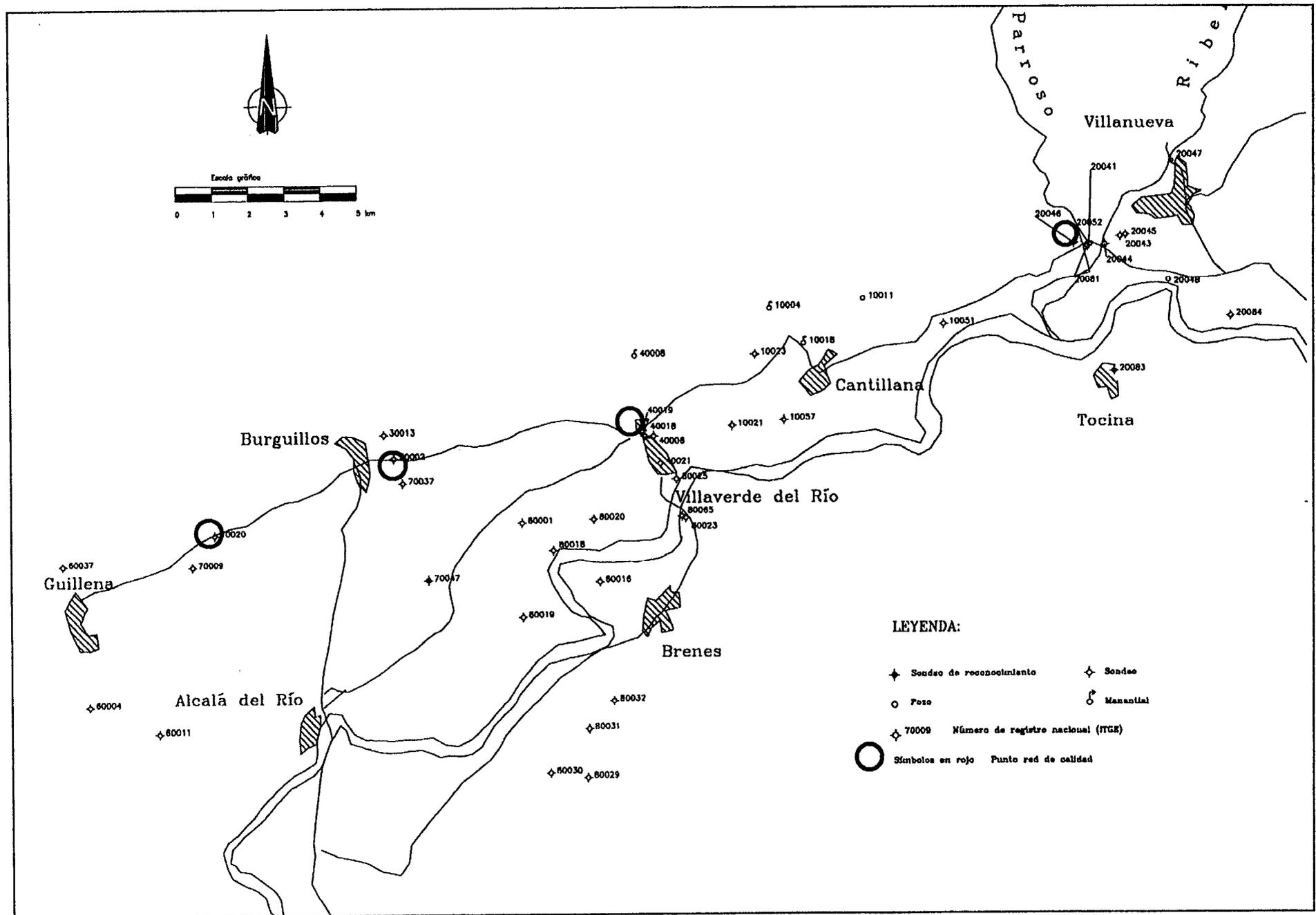


Figura 15.- Situación de los Puntos Singulares de Calidad y de la Red de Control de Calidad de la U.H. 05.49, Sector Gillena - Villanueva del Río y Minas

Destaca la utilidad de la Red de Control de Calidad para determinar la evolución temporal química del acuífero. En el área de estudio, está constituida por 4 puntos homogéneamente distribuidos, en los que se realizan análisis químicos completos con una periodicidad semestral desde el año 1991 (aunque existe una primera medida en 1982).

Si se tiene en cuenta que la superficie acuífera aflorante del sector es de unos 57 km², la densidad de la red de control resultante es de 1 punto por cada 14 km² (1/14 km²), valor que comparado con el de la Cuenca del Guadalquivir en conjunto y con la media del territorio español, 1/376 y 1/300 respectivamente (DGOHCA, 2000), resulta muy elevado; por lo que se considera que el grado de seguimiento de la calidad de las aguas del acuífero es excelente.

7.2.- CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL ACUÍFERO

La U.H. 05.49 presenta distintas facies químicas asociadas a la presencia de diferentes facies litológicas. En general predominan las aguas Bicarbonatadas Ca-Mg aunque en determinadas zonas la facie dominante es Clorurada Sódica.

El análisis de las facies en el área de estudio pone de manifiesto la existencia de una distribución espacial del tipo de agua. En el mapa de la Figura 16, elaborado con el primer análisis existente en cada punto, se observa que predominan las facies Bicarbonatadas Ca y/o Mg al norte de la unidad, entre Guillena y Cantillana, zonas donde el acuífero es libre o está confinado por las margas a escasa distancia del contacto con el afloramiento (1-2 Km). Éstas facies van pasando progresivamente hacia el SE a facies intermedias, bicarbonatadas - cloruradas, hasta llegar a ser claramente cloruradas sódicas.

En la región de Villanueva del Río y Minas dominan las aguas cloruradas-bicarbonatadas o cloruradas sódicas al E de la Ribera del Huesna, apareciendo también términos sulfatados relacionados con los materiales carboníferos.

La distribución espacial de éstas facies se presenta a continuación en la Figura 16, y en la Figura nº 17 se presenta la caracterización química de las diferentes muestras de agua.

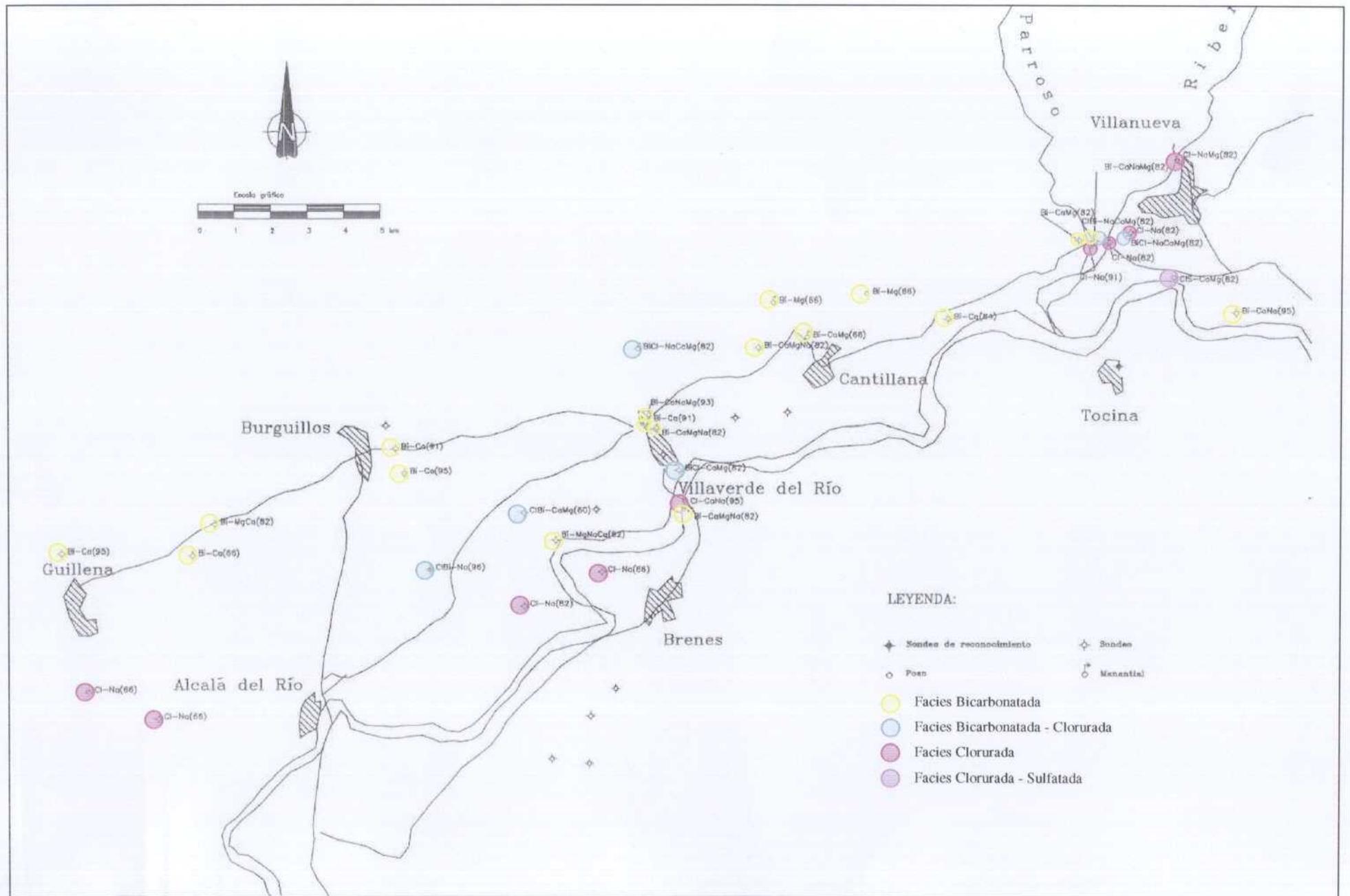
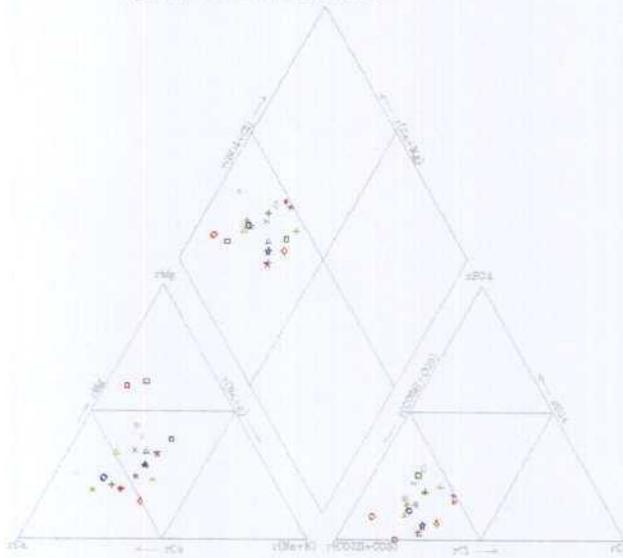


Figura 16.- Distribución espacial de facies químicas. Sector Gillena - Villanueva del Río y Minas. Elaborado con el primer análisis de cada punto.

Diagrama de Piper-Hill-Langelier

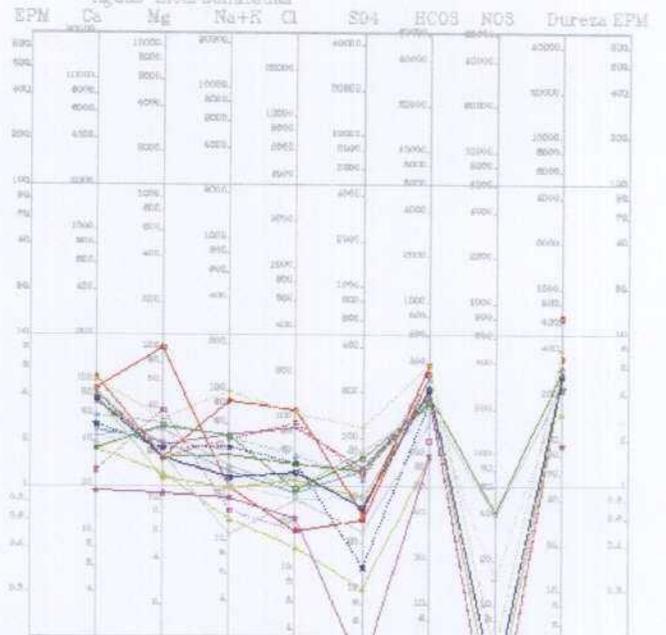
Aguas Bicarbonatadas



- 133910011 14-04-88
- 133910004 29-03-88
- △ 133910018 01-06-88
- ◇ 133910023 10-10-82
- ★ 133900041 22-10-83
- ⊕ 133930002 20-04-83
- ∨ 133940006 01-10-84
- 133940016 16-05-81
- ▲ 133940016 20-04-83
- ⊕ 133980037 19-01-85
- ⊖ 133970020 21-10-82
- 133970037 18-01-95
- 133900016 10-11-82
- △ 133900025 22-05-82
- ◇ 133910051 17-01-84
- ★ 133930046 22-10-82
- ⊕ 133920084 01-01-85
- ∨ 123070009 01-08-86

DIAGRAMA DE SCHOELLER - BERKALOF

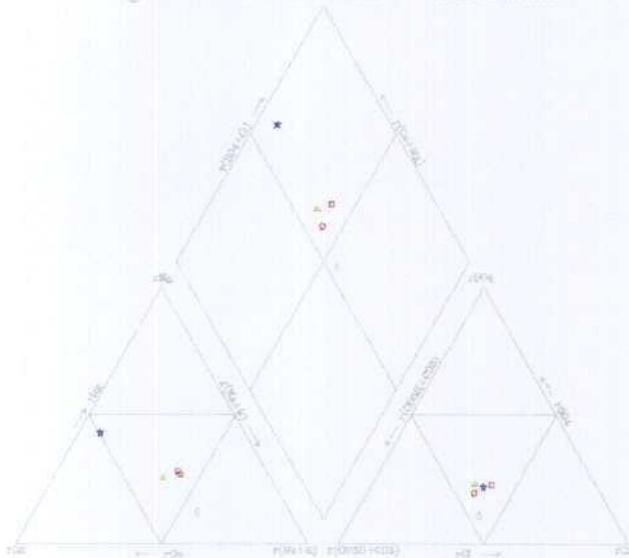
Aguas Bicarbonatadas



- 133910011 14-04-88
- 133910004 29-03-88
- △ 133910018 01-06-88
- ◇ 133910023 10-10-82
- ★ 133900041 22-10-83
- ⊕ 133930002 20-04-83
- ∨ 133940006 01-10-84
- 133940016 16-05-81
- ▲ 133940016 20-04-83
- ⊕ 133980037 19-01-85
- ⊖ 133970020 21-10-82
- 133970037 18-01-95
- 133900016 10-11-82
- △ 133900025 22-05-82
- ◇ 133910051 17-01-84
- ★ 133930046 22-10-82
- ⊕ 133920084 01-01-85
- ∨ 123070009 01-08-86

Diagrama de Piper-Hill-Langelier

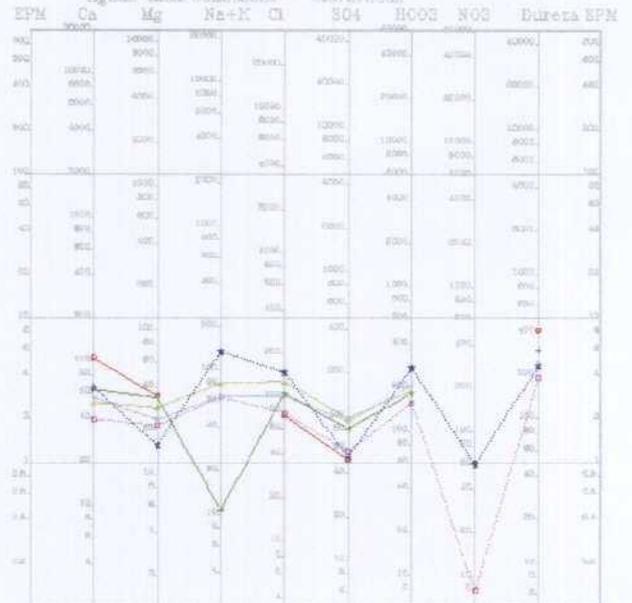
Aguas Bicarbonatadas - Cloruradas



- ◇ 133920043 13-07-82
- 133920052 21-10-82
- △ 133940008 10-11-82
- ◇ 128070047 13-08-96
- ★ 133980025 18-11-82

DIAGRAMA DE SCHOELLER - BERKALOF

Aguas Bicarbonatadas - Cloruradas



- ◇ 133920043 13-07-82
- 133920052 21-10-82
- △ 133940008 10-11-82
- ◇ 128070047 13-08-96
- ★ 133980025 18-11-82

Figura 17.- Diagramas de Piper y de Schoeler-Berkalof de los tipos de aguas en el área de estudio.

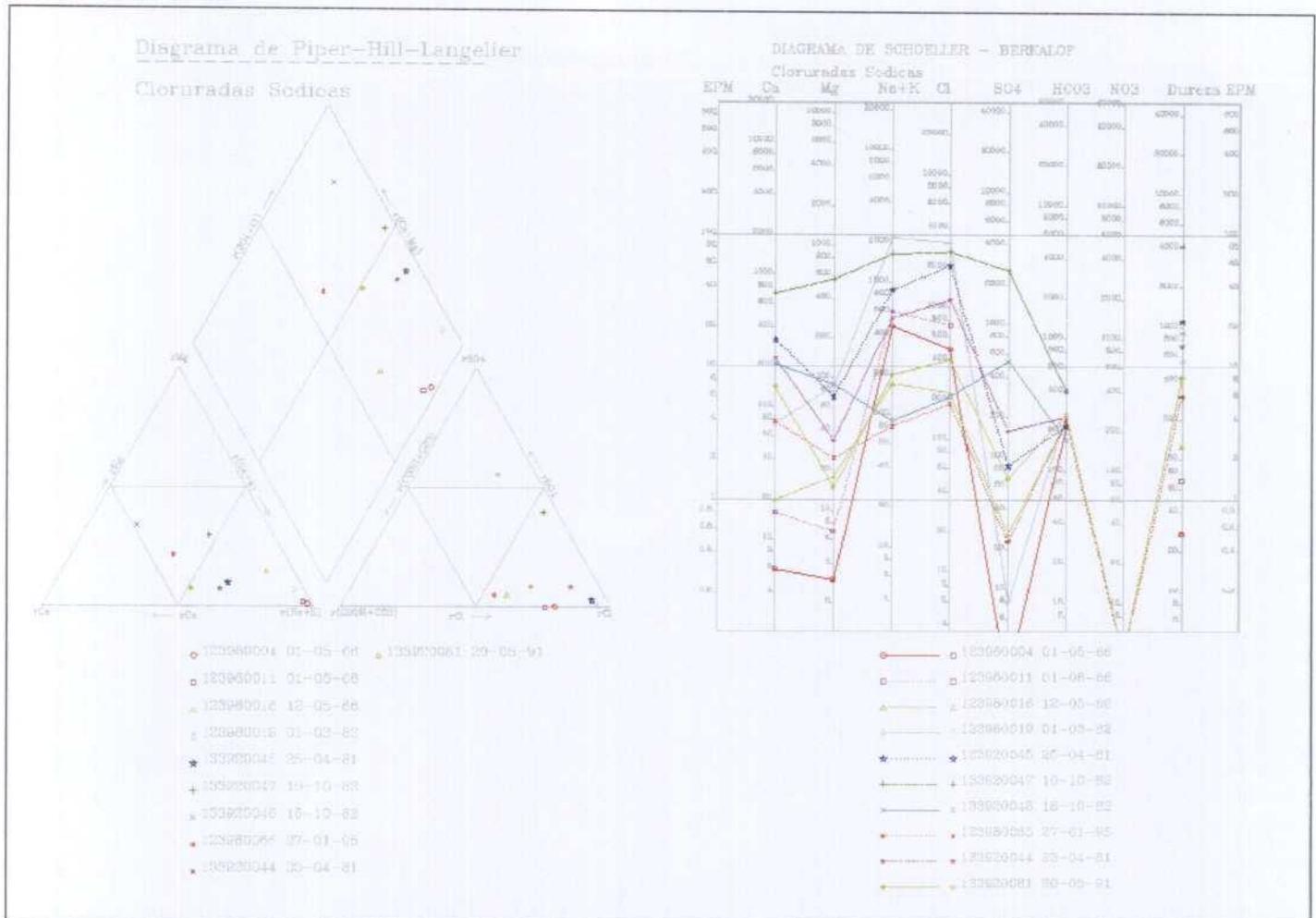


Figura 17.- Diagramas de Piper y de Schoeller-Berkalof de los tipos de aguas en el área de estudio.
Continuación

Las aguas bicarbonatadas presentan una mineralización débil, con valores medios de conductividad de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una dureza elevada. El contenido en ion cloruro no alcanza, en general los 100 mg/l, salvo casos puntuales; mientras que las facies cloruradas presentan fuerte mineralización (conductividad media entre 900 y 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y el contenido en ion cloruro es siempre superior a los 100 mg/l.

Esta distribución espacial también se observa en el mapa de la *Figura 18.- Contenido en ion cloruro de las aguas del acuífero. Primer valor*, elaborado con el mismo criterio que el anterior. El contenido en cloruros aumenta desde el N, donde presenta unos valores medios de 30-40 mg/l, hacia el SE y hacia la región de Villanueva del Río y Minas. Destaca la existencia de valores puntuales muy elevados en la dirección Brenes - Tocina - Villanueva del Río y Minas.

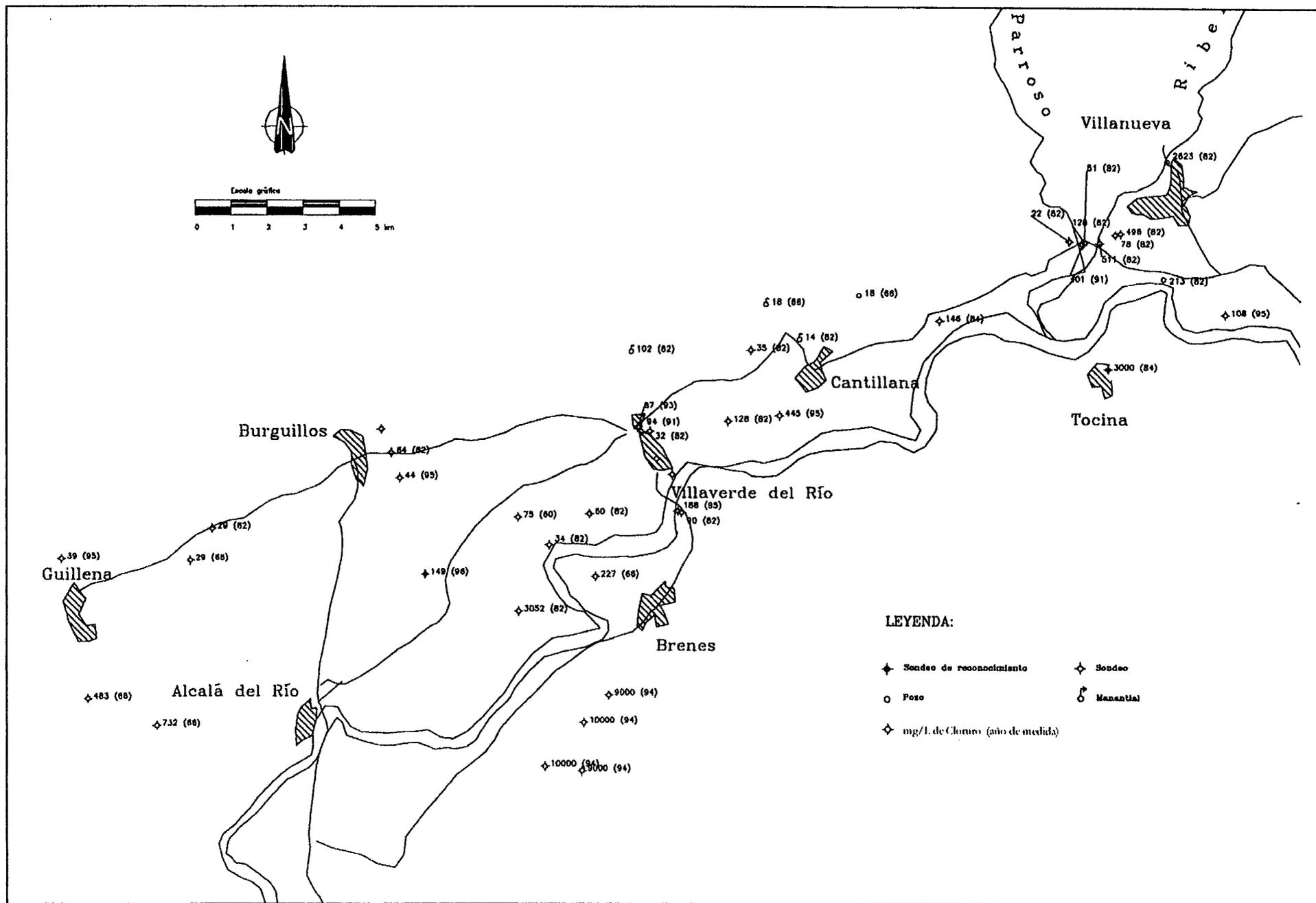


Figura 18.- Concentración de ion Cloruro en las aguas del acuífero. Sector Gillena - Villanueva del Río y Minas. Elaborado con el primer análisis de cada punto.

La primera referencia de anomalías químicas del acuífero mioceno en la región de Villanueva del Río y Minas data del año 1928 cuando se menciona la existencia de aguas de composición análoga a la del mar en un sondeo, localizado cerca de esta localidad (punto 1339-2-0028), de 402 m. de profundidad realizado para la investigación del Carbonífero.

Es en los años 80 cuando de nuevo se detectan anomalías químicas en la región, en los sondeos realizados para el abastecimiento de Villanueva del Río y Minas, situados muy cercanos a los de abastecimiento a Tocina. La siguiente tabla resume los datos más significativos de la anomalía química detectada en éstos sondeos cuya situación puede verse en la Figura 15.

TABLA III.- ANOMALÍAS QUÍMICAS EN LA ZONA DE VILLANUEVA DEL RÍO Y MINAS							
Sondeo	Situación	Prof.	Año Perfor.	cloruros	conduc	fecha	observaciones
1339-2-0043	E R. Huesna	126	1981	2127	7930	01/10/82	Abandonado por hundimiento
							Muestra tomada en bombeo
1339-2-0044	E R. Huesna	128	1981	1900	4132	23/04/81	10 h. de bombeo
Sondeo 1bis				790	2593	21/06/81	en reposo
				1049	3695	01/09/81	tramo 56-66
				1014	3605	01/09/81	tramo 66-82
				830	2842	01/09/81	tramo 82-96
				794	2842	01/09/81	tramo 96-110
				851	2930	03/11/81	reposo. Tomamuestras (super.)
				511	1654	22/10/82	reposo. Tomamuestras (super.)
1339-2-0045	E R. Huesna	112	1981	2092	6714	25/04/81	E.B. (10 h)
Sondeo II				496	1690	22/10/82	reposo. Tomamuestras (super.)
1339-2-0046	W Huesna	76	1981	71	600	15/12/81	en bombeo
Sondeo III				22	154	22/10/82	en bombeo
1339-2-0041	W Huesna	62	1976	51	447	22/10/82	en bombeo
1339-2-0052	W Huesna	62	1977	128	696	21/10/82	en bombeo
1339-2-0081	W Huesna	62	1985	401	1544	20/05/91	en bombeo

Se observa que las aguas situadas al W de la Ribera del Huesna presentan baja salinidad mientras que al E aparecen concentraciones elevadas. La salinización aumenta con el tiempo de bombeo puesto que se produce la mezcla de aguas procedentes de niveles acuíferos más salinos y profundos con niveles superiores de menor concentración salina, como ocurre en el punto 1339-2-0044. Pasado un tiempo del bombeo la estratificación vertical de las aguas tiende a restablecerse pero queda un agua mezcla de unos 500 mg/l de Cl⁻ debido a que los niveles inferiores salinizados presentan un potencial hidráulico mayor

que los superiores, con lo que se produce la circulación vertical de las aguas a través del sondeo que ha puesto en comunicación distintos niveles de éste acuífero multicapa.

Una posible explicación al hecho de que los sondeos al E y W de la Ribera del Huesna presenten estas diferencias de salinidad puede deberse a la configuración geológica del entorno. La representación esquemática de las columnas litológicas de los sondeos que se presenta en la Figura 19 muestra que los tramos con alta salinidad situados al E, están a cota inferior al muro del acuífero en la zona W, debido probablemente, a la falla de dirección aproximada N-S que discurre por el A° Parroso o a la continuación en profundidad de la falla inversa del Viar.

Por ello se concluye que éstos niveles no parecen tener una continuidad lateral homogénea. La entrada de agua del antiguo mar mioceno se vería favorecida por esta situación geológica, quedando atrapada por niveles arcillosos que dificultaron el lavado de esta agua congénita.

Sin embargo análisis posteriores en los sondeos 1339-2-0046 y 1339-2-0081 muestran un contenido elevado en cloruros, del orden de 600 mg/L, por lo que de alguna manera pueden tener relación con la salinidad detectada en los sondeos de Villanueva del Río y Minas.

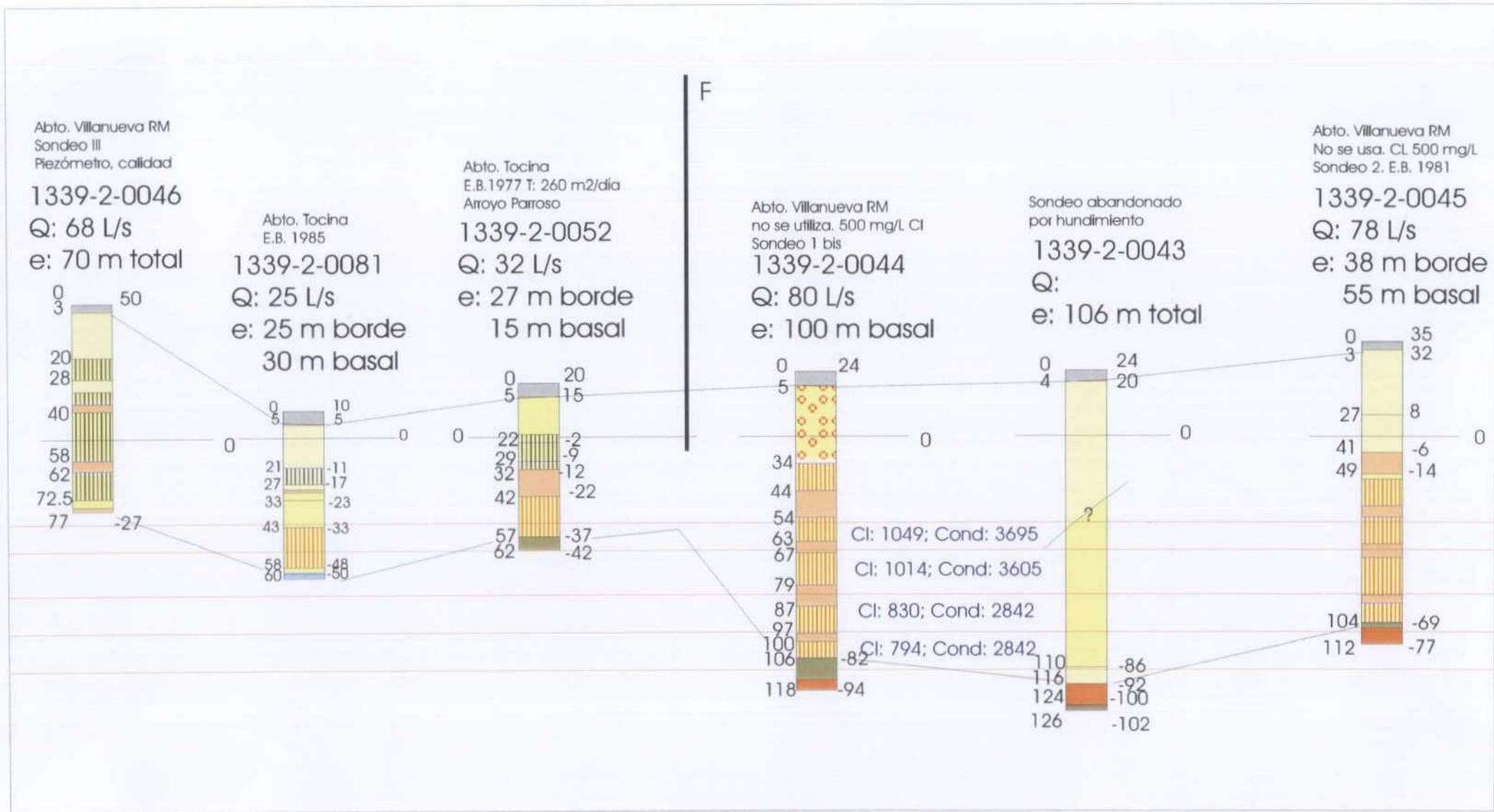


Figura 19.- Esquema de los sondeos situados al E y O de la Ribera de Huesna con indicación de los tramos salinos.

La estratificación vertical de las aguas del acuífero se manifiesta de nuevo en la anomalía detectada en el año 1984 en el punto 1339-1-0051 situado en el A° Trujillo para el abastecimiento a Cantillana.

Entre los días 17 a 28 de Enero-84, se tomaron muestras a distintas profundidades detectando un agua salada a 85 m de profundidad. Los resultados de este muestreo se indican gráficamente en la Figura 20, donde se observa que el contenido en cloruros y sodio aumenta progresivamente con la profundidad hasta el metro 85 donde bruscamente alcanza valores de 14916 y 6555 mg/l respectivamente, valores similares al agua del mar por lo que en principio puede suponerse éste su origen.

Una semana más tarde la circulación vertical ascendente de las aguas del nivel salino más profundo había producido la mezcla del agua en la columna del sondeo, la concentración de cloruros oscilaba entre 2000 y 4000 mg/l pero existía, entre los metros 6 y 7, un agua más dulce debido probablemente a un nivel más permeable y de mayor potencial hidráulico que el nivel inferior por donde se producía la entrada de agua del nivel superior que desplazaba las aguas saladas de alrededor, hipótesis que deberá comprobarse con nuevos registros verticales actuales.

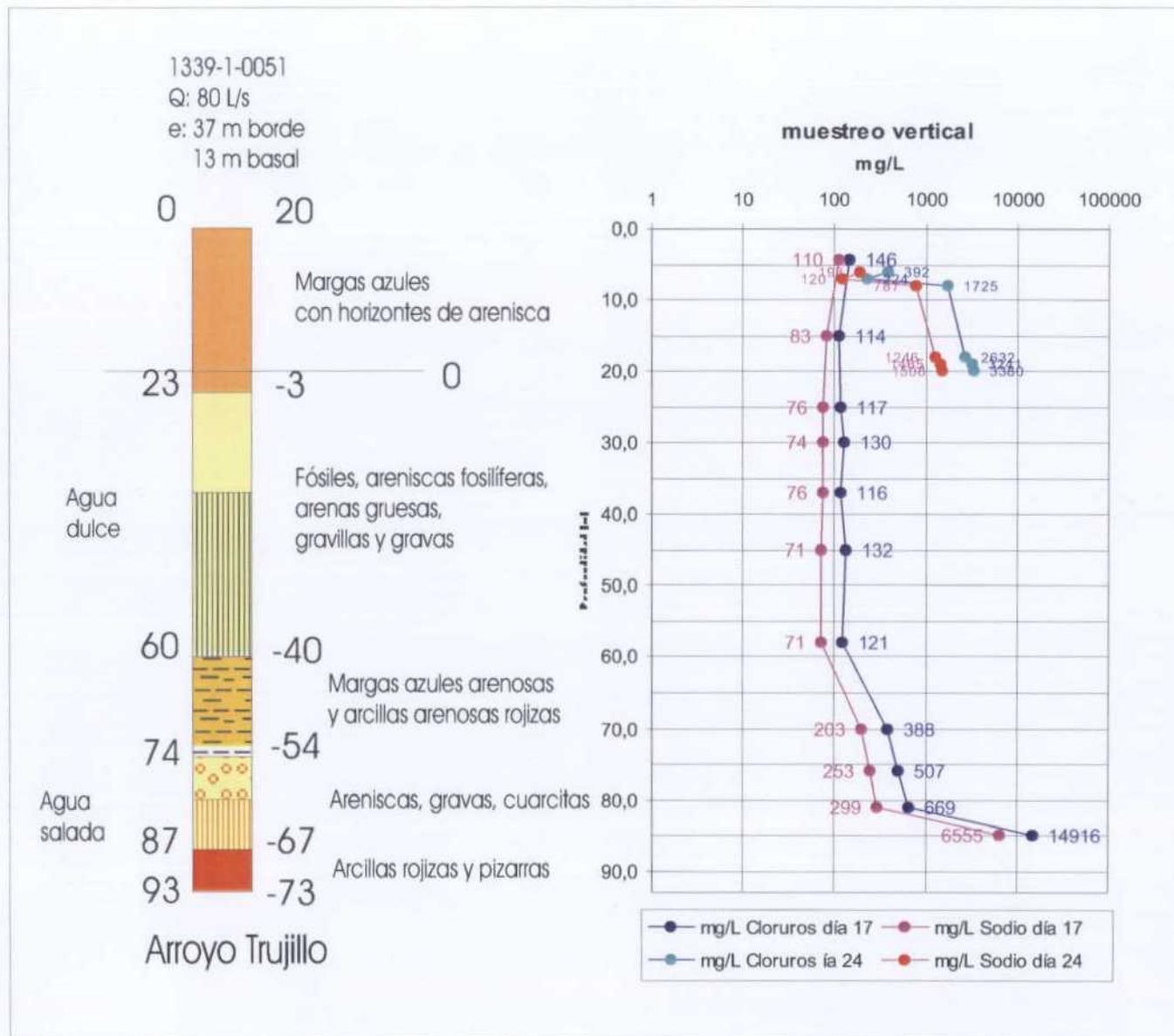


Figura 20.-Muestreo vertical realizado en el sondeo 1339-1-0051 situado en el A° Trujillo.

Los diagramas de Piper y Schoeller para los dos muestreos verticales se presentan en la Figura 21 donde se observa con claridad el paso de un agua bicarbonatada cálcica en superficie a clorurada sódica en profundidad para el día 17-01-84. Posteriormente se observan las aguas mezcladas, también cloruradas sódicas aunque de menor salinidad, diferenciándose el nivel del metro 6-7.

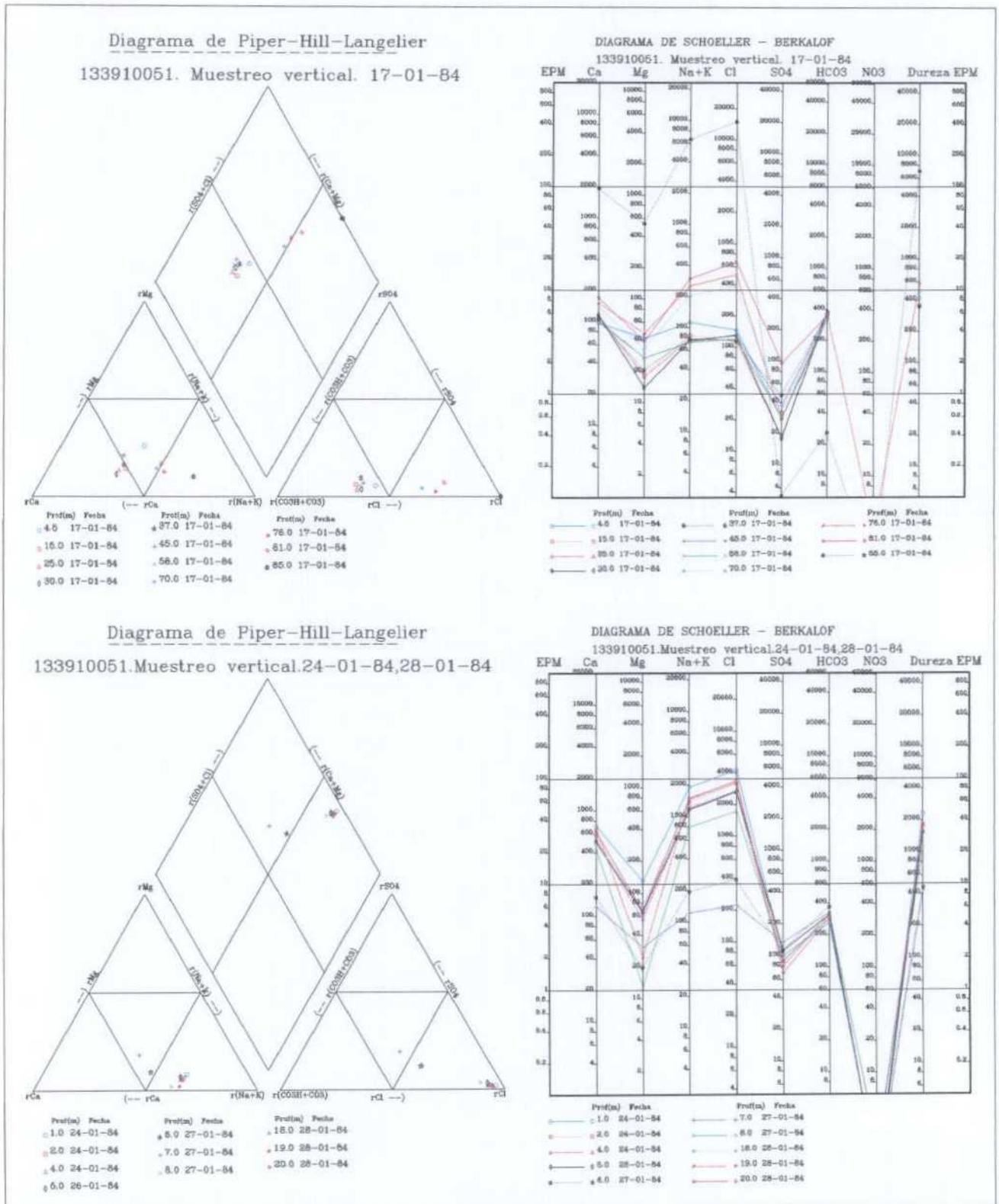


Figura 21.- Diagrama Piper-Schoeller del muestreo vertical en el sondeo 1339-1-0051.

Este muestreo vertical confirma que el origen de la salinidad en los sondeos anteriores procede de niveles inferiores del acuífero como se detectó en el año 1982 en los sondeos de Villanueva del Río y Minas, de manera que se confirma la estratificación vertical de las aguas del acuífero; aunque en aquellos sondeos el contenido en ion cloruro es mucho más bajo que en el A° Trujillo y un poco más bajo que el agua mezcla por lo que se piensa que el punto 1339-2-0051 constituye un caso excepcional en cuanto a su composición.

Comparando las cotas de los niveles salinos en ambos casos vemos que en el punto 51, si el nivel salino tuviese cierta continuidad, debería haberse cortado en otros sondeos lo que apunta de nuevo a su excepcionalidad; no se descarta sin embargo que en el entorno pueda tener cierta continuidad, hecho que deberá tenerse presente si se inicia una captación en este sector, tomando las precauciones necesarias de aislamiento de ese tramo si se interceptara.

Otros valores elevados de cloruros que se pueden observar en el mapa de cloruros, son los 3000 mg/l que se han encontrado en el centro de Tocina (punto 1339-2-0083), donde el acuífero se corta a 140 m, y al oeste de Brenes (punto 1239-8-0019) donde la profundidad estimada del acuífero supera los 150 m; así como los valores del orden de 10000 mg/l detectados al S de Brenes estando el acuífero en éste sector a partir de los 250 m de profundidad.

La visión en conjunto de todos éstos valores parece apuntar a la existencia de un frente salino en la dirección Brenes-Tocina que localmente puede penetrar más en algunos niveles inferiores (Cantillana, Villanueva del Río y Minas, Sur de Guillena) por lo que cabe la posibilidad de que las anomalías químicas detectadas en lugar de ser puntuales pudieran tener una cierta continuidad en esta dirección y en este área de acuífero.

La hipótesis de un frente salino es coherente con la estructura en fondo de saco del acuífero mioceno. La renovación de las aguas a medida que nos alejamos de la zona de afloramiento se ve dificultada, de manera que las aguas presentarán una mayor salinidad y edad hacia el SE; mientras que en la zona de afloramiento la edad y salinidad serán menores, el agua será una mezcla de agua antigua y reciente. Estudios isotópicos realizados en el entorno de Gerena (Yacimiento de "Las Cruces") apuntan en este sentido pues encuentran que el agua subterránea en el acuífero es una mezcla de agua antigua y

reciente, mientras que al sur y sureste del yacimiento, la salinidad es mayor y la edad del agua es de más de 40 años.

Respecto a la campaña de sondeos realizada dentro de este proyecto se han obtenido los siguientes datos respecto a la calidad de sus aguas:

En el sondeo S-1, el caudal estimado durante la perforación y que se observa en superficie es de 25-30 L/s, pudiendo obtener un sondeo de explotación debidamente diseñado un caudal superior a 50 L/s.

Las medidas de conductividad tomadas fueron las siguientes:

Profundidad (m)	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
84	511	20.4
89	567	20.8
94	567	20.9
97	567	20.7

lo que muestra la baja salinidad de las aguas del acuífero en este punto.

Dada la baja mineralización de las aguas, que indica unas características químicas generales similares a las del Sondeo 2, que se comentan a continuación, se toma una muestra al final del sondeo (97 m) para determinar el contenido en metales de las aguas puesto que puntualmente se han detectado en la zona valores elevados en el contenido en Pb y Fe.

Los resultados del análisis se presentan en el Anexo V Apéndice II junto con los límites establecidos en el R.D. 1138/90 y la Dir 98/83/CE como valores máximos admisibles en el

agua destinada para consumo humano. Los valores superan ampliamente dichos límites en el contenido en Al y Fe y sólo ligeramente en el contenido en Mn:

<u>Elemento</u>	<u>Concentración ($\mu\text{g/L}$)</u>	<u>R.D. ($\mu\text{g/L}$)</u>	<u>Dir. ($\mu\text{g/L}$)</u>
Al	8.520	200	200
Fe	6.920	200	200
Mn	74	50	50

En el resto de parámetros analizados, en los que la legislación contempla un valor límite, las concentraciones son admisibles.

En el sondeo S-2, el caudal estimado es de unos 20-25 L/s, considerándose que el aporte mayoritario de agua procede del tramo de arenas situadas entre los 83 m y los 86 m.

En fecha 20-12-01 se realiza un registro vertical de conductividad - temperatura cuyos resultados se indican a continuación y se recogen gráficamente en la Figura 22.

Profundidad (m)	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
2,5	627	18,7
3	605	20,1
4	590	21,3
5	589	21,5
10	585	21,1
15	585	19,6
20	586	19,6
25	586	19,7
30	586	19,9
35	586	20,0
40	586	20,2
45	586	20,4
50	586	20,6
55	586	20,8
60	586	20,9
65	586	21,0
70	586	21,1
75	586	21,2
80	586	21,3
85	586	21,4
90	586	21,5
95	586	21,6

El perfil refleja una conductividad de las aguas baja y uniforme en todo el espesor de acuífero mientras que el gradiente de temperatura, a partir del metro 55, es un poco más bajo de lo normal - las aguas están un poco más frías que lo que corresponde a su profundidad - lo que parece indicar un cierto flujo descendente en el acuífero. Éste hecho estaría en consonancia con la proximidad del sondeo al área de recarga (≈ 1 Km al afloramiento) que mostraría un agua de corta circulación y de composición probable muy cercana a la de recarga; la datación isotópica con tritio aportaría nuevos argumentos para confirmar esta hipótesis.

El día 31-01-02 se toma una muestra de agua a 70 m de profundidad, bombeando el sondeo durante 1 hora, para realizar un análisis químico completo. Los resultados (ANEXO V APÉNDICE II) confirman la calidad del agua, que presenta una facies bicarbonatada sódica-cálcica (que denota la influencia de los granitos subyacentes), de baja mineralización ($562 \mu\text{S/cm}$) y con bajos contenidos en cloruros, sulfatos, magnesio, calcio y sodio, no superando los límites de potabilidad establecidos en legislación vigente en ninguno de los parámetros analizados, salvo en el contenido en Mn (0.09 mg/L) que supera ligeramente el valor admisible (0.05 mg/L).

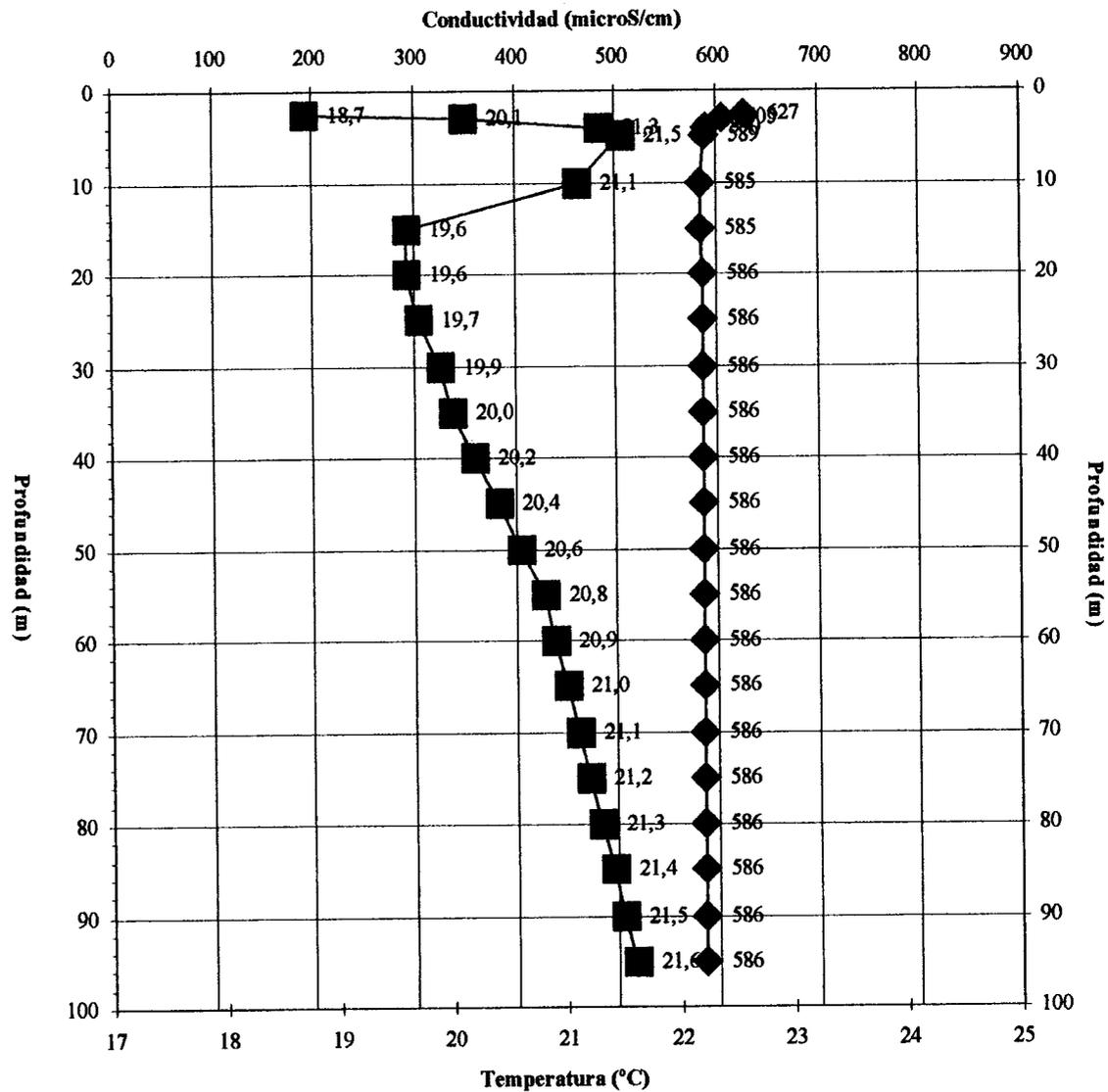


Figura 22. Perfil vertical Conductividad-Temperatura Sondeo S-2

El sondeo S-4, el caudal estimado durante la perforación es de unos 35–40 L/s, estimándose que el mayor aporte de agua se produce en el entorno del metro 66..

La calidad de las aguas del acuífero mioceno en este punto es muy deficiente. Durante la perforación se realiza un registro de conductividad – temperatura desde el primer momento en que se corta el agua, siendo la conductividad inicial (a los 49 m) de 13.580 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aumentando progresivamente hasta alcanzar valores de 38.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a los 74 m de profundidad.

Las características del agua empleada en la perforación, procedente del río Guadalquivir, fueron: C: 2.100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y T^a: 21.5 °C por lo que no interfieren en el registro.

Los resultados del registro efectuado se muestran a continuación, mostrando la Figura 23 el gráfico del perfil vertical.

Se observa que, aunque desde el principio la salinidad es elevada, se produce un aumento brusco a partir del metro 70 cuando se atraviesa el tramo cementado de gravas que semiconfina las facies arenosas de origen continental (abanico aluvial?); a priori se establece que esta salinidad estaría relacionada con las facies rojas del Pérmico.

Se toman muestras para análisis químicos completos a 49, 69 y 87 metros para determinar el posible origen de éstas aguas. Los resultados, incluidos en el APÉNDICE II del ANEXO V, muestran el incremento de salinidad observado en el registro; las facies son claramente cloruradas sódicas, de elevada mineralización, llegándose a alcanzar conductividades del orden de 53.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ al final del sondeo, valor superior al observado normalmente en los mares actuales.

Desde el punto de vista de su aptitud para consumo humano, la calidad es absolutamente deficiente debido a la elevada mineralización que se incrementa con la profundidad; se superan ampliamente los límites de potabilidad establecidos en la legislación en conductividad, cloruros y sodio, y en menor cuantía en el contenido en sulfatos, magnesio y calcio. Destaca el bajo contenido en bicarbonatos, la ausencia de nitratos y una cantidad considerable de materia orgánica.

Profundidad (m)	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
49	13.580	22,7
50	-	21,7
51	14.560	-
52	15.250	-
53	15.600	-
54	16.270	-
55	-	-
56	-	-
57	17.480	21,2
58	17.920	21,3
59	18.050	21,2
60	18.180	21,2
61	18.410	21,3
62	18.180	21,3
63	18.120	21,3
64	18.180	21,2
65	18.230	21,3
66	18.150	21,2
67	18.150	21,2
68	18.160	21,2
69	18.180	21,2
70	18.350	21,3
71	28.000	21,4
72	34.100	21,4
73	38.600	21,6
74	38.200	21,6

* a partir del metro 74 la sonda se sale de escala y no vuelve a dar medida por lo que se supone que la conductividad sigue aumentando en profundidad hasta el final del sondeo.

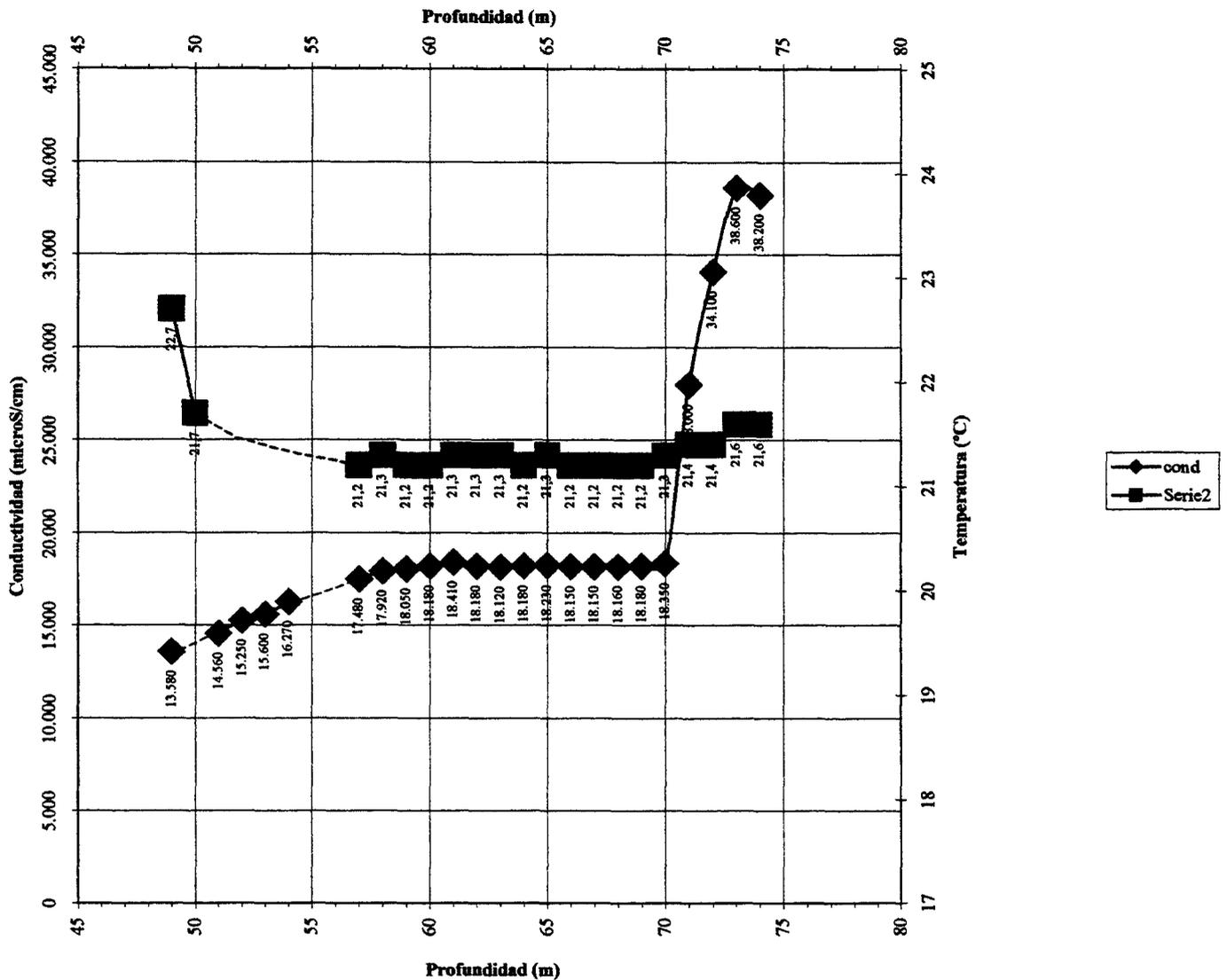


Figura 23. Perfil vertical de Conductividad-temperatura sondeo S-4.

Respecto a su origen, la Figura 24 muestra la relación de éstas aguas con las cortadas a 85 m de profundidad en el del sondeo realizado en 1984 para abastecimiento a Cantillana (1339-1-0051) situado a 1 km aguas arriba sobre el A° Trujillo. Se observa también la similitud que presentan con el agua del mar, si bien el contenido en calcio y sulfatos difiere considerablemente. Las concentraciones iónicas se resumen en la tabla IV.

DIAGRAMA DE SCHOELLER - BERKALOF

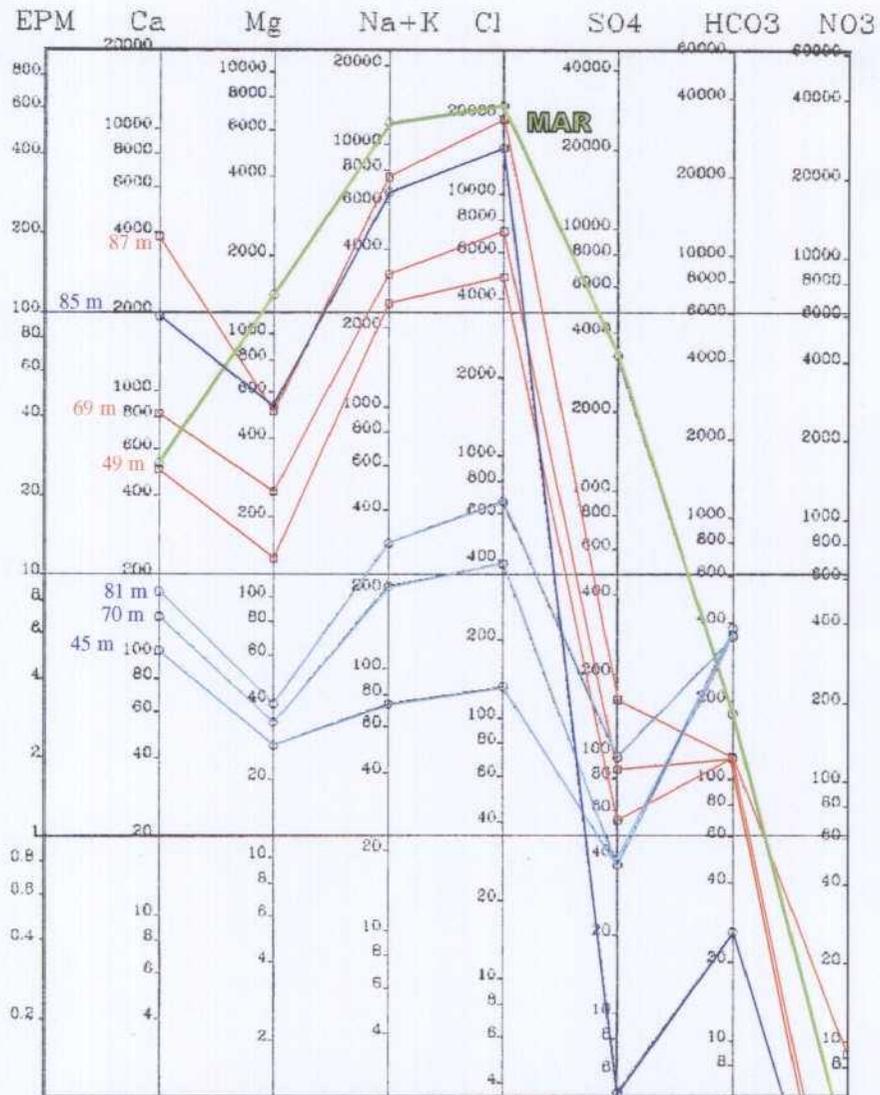


Figura 24.- Relación entre las aguas de los Sondeos 1339-1-0051 (azul) y 1339-1-0061 (rojo) a distintas profundidades y con el agua del mar (verde).

TABLA IV- CONCENTRACION (mg/L) EN LOS SONDEOS RELACIONADOS

Punto	Fecha	Prof	Cond	Cl	SO4	HCO	Na	K	Mg	Ca
Mar Mediter	-	-	44.031	21.743	3279	179	11.800	500	1.418	531
1339-1-0061	30/10/01	49	14.374	4.820	55	122	2.466	40	140	504
		69	20.267	7.200	86	121	3.184	44	250	822
		87	53.333	19.300	160	121	7.418	108	509	3.890
1339-1-0051	17/01/74	45	-	132	37	380	71	4	27	103
		70	-	388	37	357	203	33	138	6
		81	-	669	96	352	299	6	39	172
		85	-	14.916	5	26	6.555	58	532	1930

En principio se piensa que podría tratarse de aguas fósiles de origen marino que han permanecido atrapadas en el terreno durante miles de años con escasa renovación, originadas por la invasión del mar mioceno sobre el continente. La desviación en la composición respecto a un agua marina estaría provocada por los procesos modificadores sufridos durante su larga permanencia en el terreno que alterarían las relaciones iónicas originales del agua marina.

Por tanto, para comprobar la hipótesis sobre el origen de la salinidad, se programó efectuar un análisis isotópico de las aguas del sondeo. La preparación del muestreo, los trabajos realizados y los resultados obtenidos se recogen en el APÉNDICE III del ANEXO V.

Los resultados de la analítica isotópica y la interpretación conjunta de las relaciones iónicas que presentan los análisis realizados y el agua tipo de mar, apuntan a que es difícil explicar su origen a partir de un agua marina. Los valores obtenidos para las desviaciones isotópicas de deuterio y oxígeno-18 ($-27,8\text{‰}$ y $-4,58\text{‰}$, respectivamente) confirman un origen claramente meteórico de estas aguas y no relacionado con el agua marina ni con una mezcla con agua continental ya que los valores deberían ser muy próximos a 0‰ . En cambio los valores corresponden aproximadamente a la desviación isotópica media de las precipitaciones en la zona, valor que no ha debido variar de forma significativa en los últimos miles de años.

La ausencia de tritio ambiental ($0,0 \pm 0,13$ U.T.) confirma que dichas aguas han estado aisladas de las aguas subterráneas recientes y también de las aguas superficiales, sin sufrir ningún proceso de mezcla con aguas de niveles acuíferos someros que pudieran contener aguas recientes. Se trata por tanto de aguas procedentes de precipitación que tuvieron lugar antes del año 1953.

La concentración de carbono-14 de la muestra S-4 refleja que se trata de aguas con una dinámica de renovación del orden de varios miles de años, pero que en cualquier caso no se trata de agua congénita retenida en el terreno durante periodos geológicos. La edad obtenida por diferentes métodos de corrección es del orden de unos 6.500 años, que correspondería a una edad calibrada algo más antigua.

La hipótesis alternativa del origen de la salinidad, es que procedería de la disolución de materiales del terreno, materiales evaporíticos que pudieran estar diseminados en los sedimentos arcillosos. Para corroborar la presencia de dichos materiales sería necesario tomar una muestra inalterada en los materiales impermeables y efectuar un análisis del agua intergranular.

No obstante, para avanzar en el origen de la salinidad, sería recomendable realizar un estudio concreto del tema, con un muestreo más amplio y una caracterización hidroquímica detallada en los puntos singulares de salinidad que aparecen en distintos sectores del acuífero.

El sondeo S-5 tiene un caudal estimado durante la perforación y hasta la profundidad alcanzada, de unos 30-35 L/s, procediendo el mayor aporte de agua de los últimos 20 m.

El agua utilizada en la perforación, procedente de un depósito cercano, tenía una conductividad de 478 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una temperatura de 25 °C. La conductividad medida en los niveles de arenisca englobados dentro del paquete de limos oscila entre 1000-1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A partir del metro 110, cuando el caudal aumenta notablemente, se toman medidas cada metro, registrándose al inicio una conductividad de 921 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que aumenta bruscamente en el metro 122 a 1.700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y termina con valores de 3.410 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a los 125m. Los resultados del registro efectuado se muestran a continuación:

La rápida evolución de conductividad observada en los últimos metros atravesados hace suponer que, posiblemente, ésta seguiría aumentando hasta alcanzar valores similares a los encontrados en el sondeo S-4.

Se han tomado 3 muestras a distintas profundidades (114, 122 y 125 m) para ver las características generales de las aguas (APÉNDICE II del ANEXO V). Se trata de aguas de mineralización media con facies que pasan de cloruradas-bicarbonatadas sódicas a cloruradas sódicas en profundidad.

Profundidad (m)	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
110	921	22,3
111	917	22,5
112	908	22,7
113	921	22,6
114	928	22,9
115	927	22,6
116	939	22,7
117	939	22,8
118	950	22,6
119	954	22,8
120	948	22,7
121	947	22,8
122	1704	22,9
123	2750	22,8
124	3040	22,8
125	3410	22,8

La calidad para consumo humano es buena a 114 m, pero a mayor profundidad se superan los límites de potabilidad establecidos en la legislación vigente en el contenido en DQO, cloruros, sodio, calcio y conductividad, siendo su contenido en sulfatos bajo.

En el sondeo S-6, el caudal estimado durante la perforación es de unos 30-35 L/s, y se estima que el mayor aporte de agua procede de los tramos 67-68 m y 76-84 m.

La conductividad del agua medida en los metros 80 y 86 es de 900 $\mu\text{S/cm}$ y su temperatura de 20,9 $^{\circ}\text{C}$. Se toma una muestra de agua al final de la perforación (94 m) para determinar el contenido en metales del acuífero. El análisis efectuado (APÉNDICE II del ANEXO V) detecta Fe y Al en concentraciones que superan el límite de potabilidad establecido en el R.D. 1138/90 y en la Dir 98/83/CE. En el resto de parámetros analizados, en los que la legislación contempla un valor límite, las concentraciones son admisibles.

7.3. - EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LAS AGUAS

Para determinar la evolución temporal del agua en el acuífero, se han utilizado fundamentalmente los datos de la Red de Control de Calidad así como algunos sondeos de abastecimiento urbano que contienen datos periódicos, cuya situación ha quedado reflejada en el mapa de la Figura 15.

La siguiente tabla resume el periodo y nº de análisis de cada punto.

TABLA V.- RESUMEN DE DATOS UTILIZADOS PARA LA EVOLUCIÓN

Punto	Prof	Uso: Abto.	Red	Nº anal	Período
1239-6-0037	104	Guillena	no	4	95-00
1239-7-0020	80	Alcalá del río y San Ignacio del Viar	si	6	82-00
1239-3-0002	85	Burguillos	si	21	82-00
1239-4-0019	83	Villaverde del Río	si	17	93-00
1239-8-0065	174	Brenes	no	8	92-00
1339-2-0046	76	Villanueva del R. y M.	si	25	81-00

Así la evolución de las aguas subterráneas de Oeste a Este presenta las siguientes características:

PUNTO 1239-6-0037. Situado al N de Guillena.

Se mantiene el carácter bicarbonatado cálcico de las aguas con un ligero descenso de la mineralización, que pasa de 546 mS/cm a 270 mS/cm en Diciembre del 2000.

PUNTO 1239-7-0020. (Figura 25). Situado entre Guillena y Burguillos.

Se produce un descenso de Na y Mg y un ascenso de bicarbonato y Ca, mientras que el contenido en cloruros se mantiene constante y aumenta ligeramente la conductividad, pasando de 465 a 586 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se detecta un aumento en nitratos. Las facies pasan de bicarbonatadas Ca-Mg a bicarbonatadas Ca, pero en general puede decirse que se mantienen constantes las características químicas.

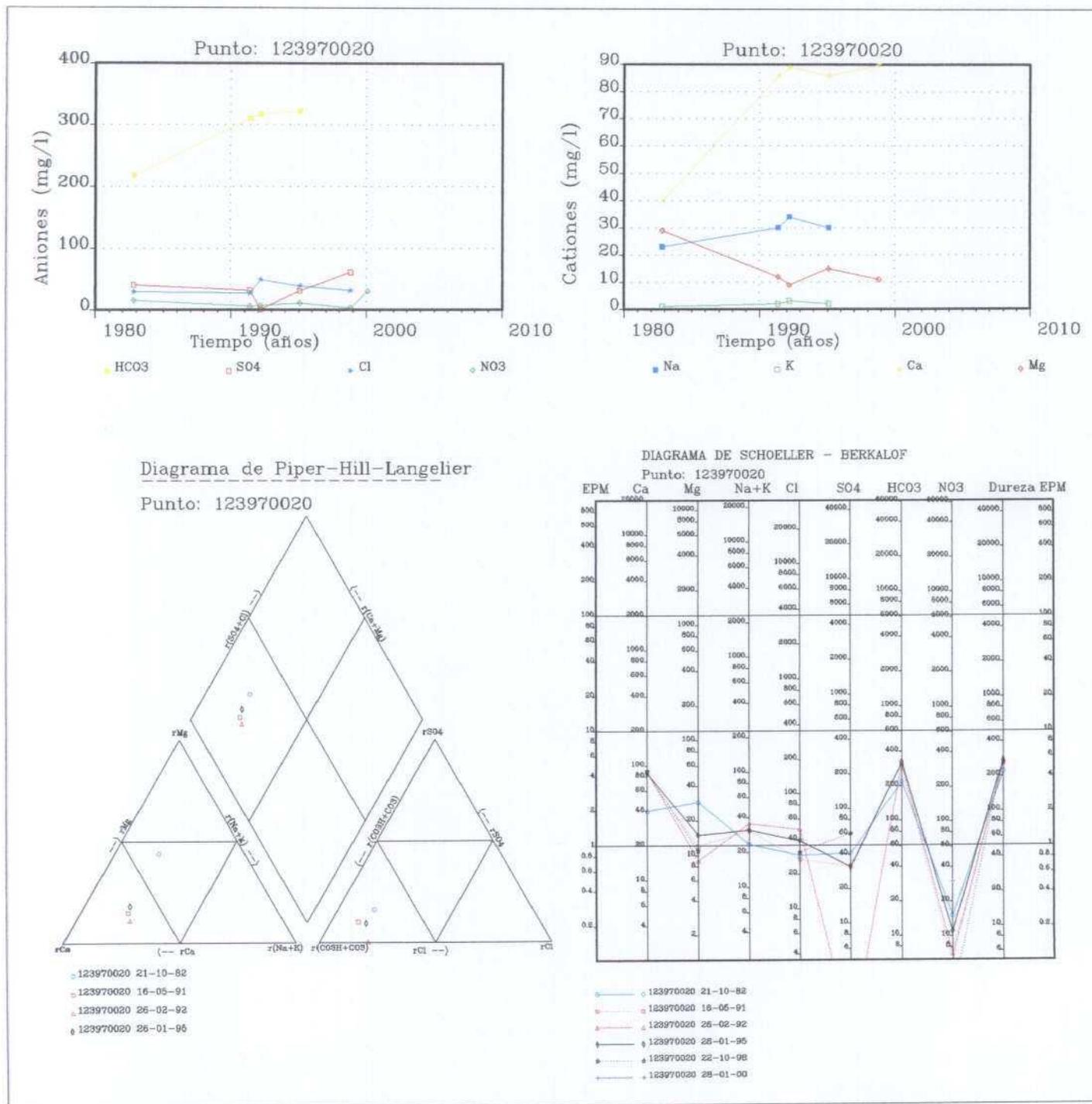


Figura 25.- Evolución de las características químicas del acuífero entre Guillena y Burguillos.

PUNTO 1239-3-0002. (Figura 26). Situado al E de Burgillos.

Escasa variación de las características químicas, las aguas conservan la facies bicarbonatada cálcica aunque ocasionalmente pueden ser bicarbonatadas sulfatadas. En general descende el contenido en cloruros y bicarbonatos y se produce un aumento de sulfatos en los años 98 y 99. El contenido en nitratos es estable y un poco elevado, con valores medios por encima de 30 mg/L. La conductividad media es de 550 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

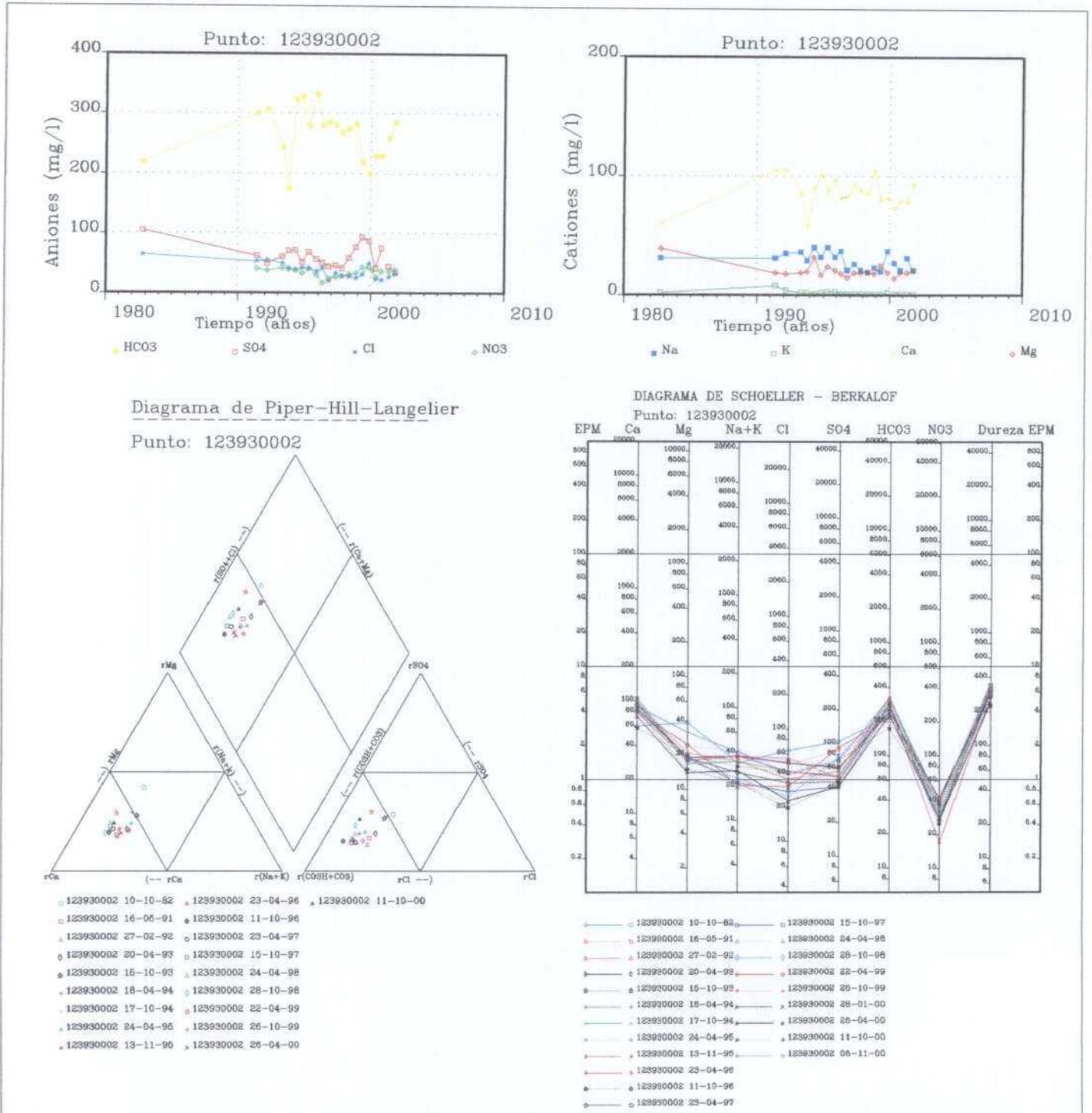


Figura 26.- Evolución de las características químicas del acuífero al E de Burgillos.

PUNTO 1239-4-0019. (Figura 27). Situado al N de Villaverde del Río.

Se observa en los gráficos una tendencia hacia facies cloruradas. Las aguas pasan de ser bicarbonatadas cálcicas a bicarbonatadas-cloruradas calcosódicas, con débil mineralización (conductividades medias de 600 a 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Se produce por tanto un aumento de los iones Cl y Na frente al descenso de bicarbonatos y Ca, que se refleja bien en la evolución inversa que presenta el Cl frente al HCO_3 y el Ca frente al Na.

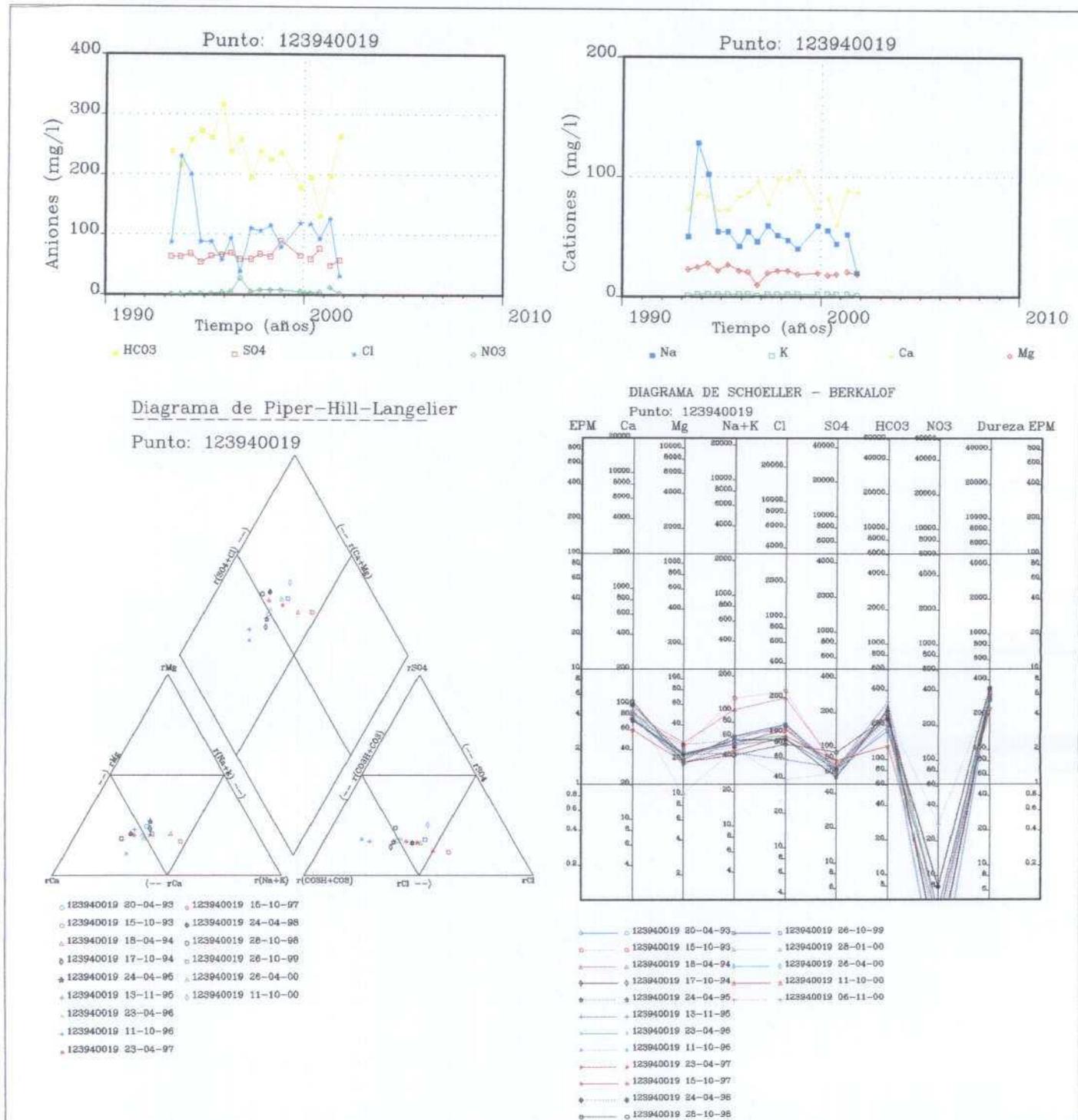


Figura 27.- Evolución de las características químicas del acuífero al N de Villaverde del Río.

PUNTO 1239-8-0065. (Figura 28). Situado al Sur de Villaverde del Río.

Se mantiene la facies clorurada sódica-cálcica con mineralización media, del orden de 900 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

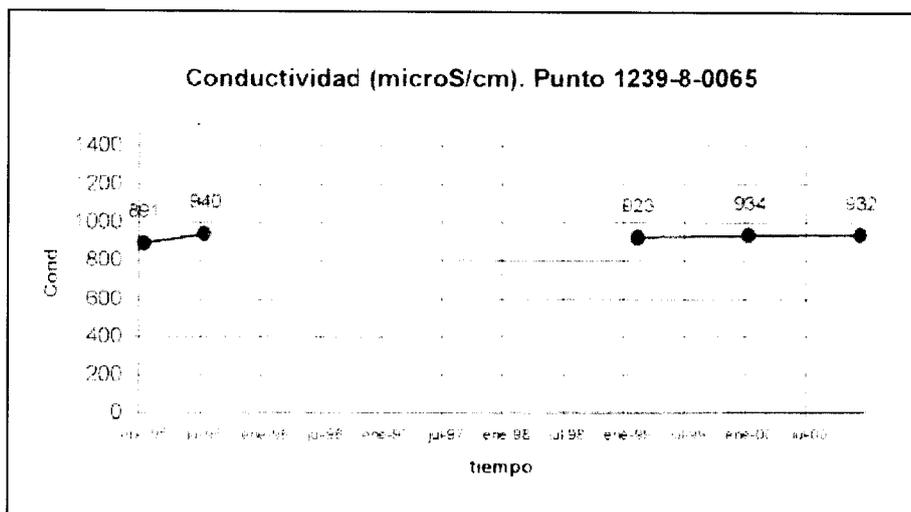


Figura 28.- Evolución de la conductividad al Sur de Villaverde del Río.

Alrededores de Cantillana.

No se dispone de datos para ver la evolución temporal de la calidad del agua. Únicamente se dispone de un análisis reciente (punto 1339-1-0057 a 1 km al SW de Cantillana) en el año 95 con contenido de cloruros de 445 mg/L y conductividad de 1530 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

PUNTO 1339-2-0046. (Figura 29). Situado al O de Villanueva del Río y Minas.

Los diagramas de Piper y Schoeller muestran una clara evolución de las facies bicarbonatadas cálcicas iniciales a cloruradas sódicas a partir del año 1997-98. Se produce un aumento de conductividad desde valores del orden de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta los 1622 de Abril del 2000, pasando la mineralización de débil a media; y el contenido en cloruros de valores de 20 - 40 mg/l a unos 400 mg/L como se ve en los gráficos de evolución de aniones y cationes.

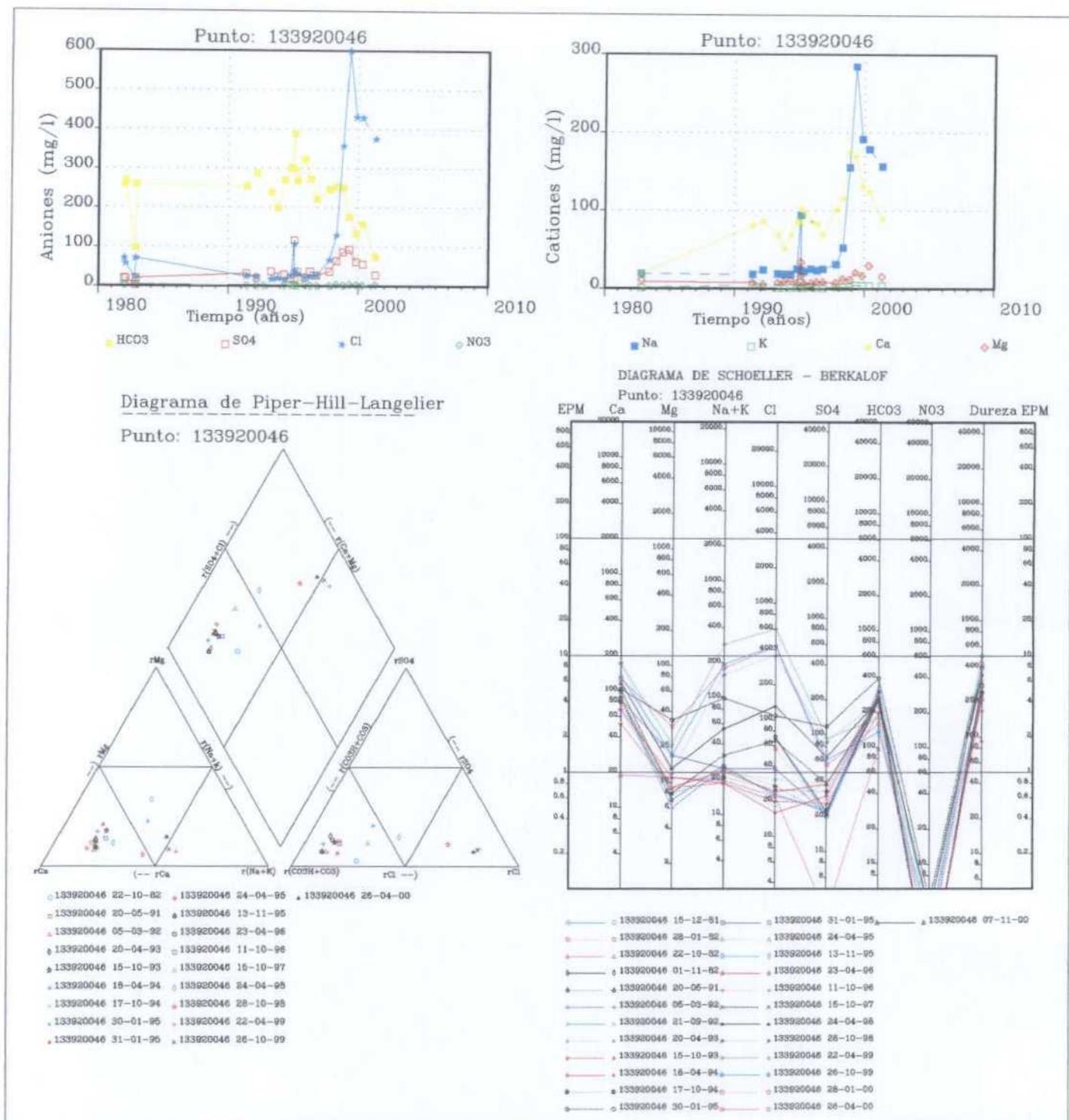


Figura 29.- Evolución de las características químicas del acuífero al O de Villanueva del Río y Minas.

Como síntesis a la evolución expuesta, puede decirse que las aguas del acuífero mantienen sus características más o menos constantes en el sector Guillena - Burguillos, observándose a partir de Villaverde del Río una evolución hacia facies cloruradas con mineralización media, más evidente en Villanueva del Río y Minas. Se establece como primera hipótesis de esta evolución hacia facies más salinas, el avance del supuesto frente salino debido a un aumento de la explotación de las aguas subterráneas y/o a una disminución de la recarga del acuífero en épocas menos lluviosas, que provocaría que el equilibrio del frente se vea alterado. La comprobación de esta hipótesis requiere un estudio más detallado.

7.4.- CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El estudio de las características químicas de las aguas subterráneas presentado permite ahora definir su calidad, es decir, permite establecer las posibilidades de su utilización. Teniendo presente que el objetivo de esta investigación es la ubicación de nuevas captaciones para abastecimiento urbano, se tratará únicamente la aptitud de tales aguas para satisfacer este fin.

La importancia para la salud pública de las aguas destinadas a este consumo hace necesaria la fijación de unas normas de calidad, en la actualidad recogidas en la siguiente legislación:

- R.D. 1138/1990, de 14 de septiembre, por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público.
- Dir. 98/83/CE del Consejo, de 3 de noviembre de 1998, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.

La siguiente tabla presenta, señalados en rojo, los parámetros que superan los límites de potabilidad establecidos en la citada legislación para todos los análisis existentes.

Destaca la mala calidad de las aguas en los puntos que presentaban un contenido anómalo en cloruros (puntos 1239-8-0019, 1339-1-0051, 1339-20043, 1339-2-0044, 1339-2-0045, 1339-20083) en los que generalmente se superan ampliamente los límites de potabilidad en casi todos los parámetros analizados, por lo que no resultan aptas para su consumo.

Excluyendo éstos puntos anómalos, las aguas del acuífero presentan una buena calidad química y son aptas para abastecimiento urbano, aunque se detectan problemas puntuales en determinados parámetros, siendo los más destacados:

- Contenido elevado en NO₃ (posiblemente de origen agrícola) al E de Burguillos, aunque no se superan los 50 mg/L del valor umbral determinado en la legislación.
- Presencia de nitritos y amonio en numerosos análisis, principalmente en Villaverde del Río, aunque se detectan ocasionalmente en todo el sector de estudio.
- Se superan, en los últimos años, el límite de potabilidad respecto al contenido en Cl, Na, conductividad, nitritos y amonio, en el punto 1339-2-0046 de abastecimiento a Villanueva del Río y Minas.

Respecto al contenido en metales, los análisis son muy escasos. Se han detectado valores por encima del límite en el contenido en Pb (puntos 1239-8-0018, 1239-8-0025, 1339-1-0023) y en Fe (punto 1239-4-0019) en el sector de Villaverde - Cantillana; y un valor muy elevado en Fe en el punto 1339-2-0046 de Villanueva del Río y Minas. En este último sector, destaca una concentración en Li más elevada (puntos 1339-2-0044 y 1339-2-0045) que en el resto de los análisis si bien no existe un límite de potabilidad legalmente establecido.

En resumen, la calidad de las aguas de los sondeos S-1, S-2 y S-6, es apta para consumo humano, con baja mineralización (600 a 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y facies bicarbonatada sódico-cálcica, que reflejan la influencia del substrato granítico. Únicamente es objetable el contenido elevado detectado en Al, Fe y, en menor grado, Mn.

Mientras que la calidad de las aguas de los sondeo S-4 y S-5, es muy deficiente no siendo aptas para abastecimiento urbano debido su elevada mineralización que aumenta con la profundidad y llega a alcanzar valores del orden de 53.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ al final del S-4. El rápido aumento de la conductividad en los últimos metros del S-5 hace suponer una evolución similar a la del S-4.

Con relación al origen de la salinización de las aguas, la datación isotópica realizada en el S-4 obtiene una edad aproximada de 6.500 años, indicando que se trata de aguas de origen meteórico que han estado aisladas de aguas subterráneas recientes, con una dinámica de renovación de miles de años, pero que no se trata de agua congénita retenida en el terreno durante períodos geológicos ni tienen relación aparente con el agua marina. La hipótesis alternativa sobre el origen de la elevada salinidad es la disolución de materiales solubles incorporados a los materiales del Mioceno o del Pérmico.

7.5.- CONCLUSIONES-

La analítica presentada, pone de manifiesto la existencia de la distribución espacial de las facies químicas en el acuífero. Al norte de la unidad, entre Guillena y el oeste de Cantillana, donde el acuífero es libre o está confinado por las margas a escasa distancia del afloramiento, predomina la facies bicarbonatada cálcica y/o magnésica con baja mineralización (500-600 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Hacia el SE, pasan progresivamente a facies intermedias bicarbonatadas - cloruradas, hasta llegar a ser claramente cloruradas sódicas, de elevada mineralización. En la región de Villanueva del Río y Minas dominan las aguas cloruradas-bicarbonatadas o cloruradas sódicas al E de la Ribera del Huesna, apareciendo también términos sulfatados.

La conductividad y el contenido en cloruros observado aumentan en dos direcciones, hacia el NE y el SE de la unidad, presentando valores extremos en el sector de Cantillana-A° Trujillo y concentraciones elevadas en el entorno de Villanueva del Río y Minas.

Esta configuración determina un frente salino en la dirección Brenes-Tocina con una fuerte anomalía química entre el A° Trujillo y el E de Cantillana. En general, la salinidad se detecta en los sondeos que se sitúan sobre la margen izquierda del río Guadalquivir.

Los análisis periódicos existentes indican que las aguas del acuífero mantienen sus características más o menos estables, únicamente se detecta un ligero incremento de conductividad en el sondeo de abastecimiento a Villanueva del Río y Minas, posiblemente relacionado con un aumento de las extracciones en una zona donde se han detectado concentraciones elevadas.

En general, las aguas del acuífero presentan una buena calidad química, con una mineralización baja a media y son aptas para abastecimiento urbano, salvo en el sector de Cantillana y en el citado "frente salino".

El muestreo y análisis químicos realizados durante la ejecución de los sondeos mecánicos de investigación confirman la buena calidad química de las aguas, con facies bicarbonatada cálcica de baja mineralización en el sector de Villaverde; y la existencia de aguas cloruradas sódicas muy salinas en el entorno de Cantillana-A° Trujillo, de calidad absolutamente deficiente para abastecimiento urbano. Este hecho también se registra en la campaña de geofísica, ya que la elevada salinidad del sector provoca un hundimiento "virtual" del zócalo paleozoico, comprobado con la posición real del substrato obtenida de las columnas litológicas de sondeos. De este modo, la interpretación de los SEVs, que da lugar al mapa de isolíneas del muro de las margas (Anexo IV), se corresponde con una "cartografía" de la anomalía salina comentada, que se presenta sin continuidad lateral aparente hacia el W de Cantillana.

Respecto al origen de las elevadas salinidades, estudios isotópicos realizados en Gerena (yacimiento "Las Cruces"), al W de la zona de estudio, establecen una primera relación entre conductividad del agua y su edad, mostrando que las aguas de baja conductividad son recientes. Encuentran que el agua subterránea en el acuífero es una mezcla de agua antigua y reciente, mientras que al sur y sureste del yacimiento (zona de la Rivera de Huelva), la salinidad es mayor y la edad del agua es de más de 40 años. En este sentido la datación efectuada con Carbono-14 en el **Sondeo-4**, en el ámbito del presente proyecto, apunta a esta relación pues arroja una edad del orden de 6.500 años; el resto de determinaciones isotópicas realizadas en este punto indican un origen claramente meteórico de éstas aguas, no habiendo elementos que confirmen el origen marino de las aguas saladas, sino más bien al contrario, los datos obtenidos se inclinan por defender la hipótesis de que la salinidad no tiene un origen marino, no son aguas congénitas atrapadas en el terreno durante tiempos geológicos, sino que la salinidad procedería de la mayor disolución de sales del terreno.

Respecto al contenido en metales de las aguas, los análisis son muy escasos, en el pasado se han detectado contenidos por encima del standard de potabilidad en Fe y Pb en el área de Villaverde y Cantillana, los análisis actuales en los sondeos mecánicos realizados de nuevo detectan Fe, Al y Mn en concentraciones superiores al límite; si bien la escasez de datos no es determinante para confirmar la persistencia de dichas concentraciones en las aguas del sector.

Por todo lo expuesto, aunque pueda parecer que la salinidad es la norma en el acuífero por la extensión que se ha dado a su estudio, se concluye que la mayor parte de las aguas del acuífero resultan aptas para abastecimiento urbano, siendo el área con características químicas más adecuadas, la comprendida entre Guillena y el oeste de Cantillana.

8.- BALANCE HÍDRICO. RECURSOS DISPONIBLES.-

8.1.- DETERMINACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL BALANCE

El balance de aguas de una unidad hidrogeológica o parte de ella, es el sumatorio con su signo de las diferentes entradas y salidas de agua del sistema, y en el acuífero Mioceno de Base, en el tramo limitado por las divisorias hidráulicas locales de La Ribera de Huelva y la Ribera de Huesna, se compone de los siguientes términos:

- **ENTRADAS -RECARGA DEL SISTEMA**

Infiltración directa del agua de lluvia sobre la superficie acuífera aflorante.

Infiltración del agua de escorrentía que procedente de los materiales paleozoicos, atraviesa el afloramiento del Mioceno.

Retornos de riego.

- **SALIDAS - DESCARGA DEL SISTEMA**

Extracciones para regadíos.

Extracciones para abastecimiento urbano.

Manantiales.

8.1.1.- ENTRADAS

Como primera aproximación de la recarga del sistema se parte del estudio "Normas de Explotación" elaborado por la CHG en 1994, donde se estima un coeficiente de infiltración medio para cada uno de los 5 subsistemas establecidos en la UH, que aplicado a la lluvia calculada para un año medio, proporciona el valor medio del volumen de agua que se infiltra a partir del agua de lluvia directamente o mediante la percolación de la escorrentía superficial procedente del Paleozoico.

La recarga obtenida, aplicando la proporción superficie/infiltración de los subsistemas a la zona de estudio, resulta de:

	<u>GERENA - CANTILLANA</u>	<u>CANTILLANA - LORA DEL RÍO</u>
Superficie acuífera total:	54 Km ²	52 Km ²
Infiltración (lluvia + escorrentía)	6 -7.5 hm ³ /año	8 hm ³ /año
Superficie área de estudio	28.3 Km ²	28.4 Km ²
Infiltración (ll + es) área estudio	3.14 - 3.93 hm ³ /año	4.37 hm ³ /año

TOTAL INFILTRACIÓN (LLUV.+ESC.) ÁREA ESTUDIO: 7.51 hm³/año - 8.3 hm³/año

Aplicando el mismo principio de proporcionalidad a los resultados del balance efectuado en el "Estudio hidrogeológico actualizado del Mioceno de Base (1983)", que considera la recarga por lluvia como el 80-100% de la lluvia útil, y la recarga por escorrentía el 40 % de la lluvia útil, se obtienen los siguientes resultados:

	<u>GERENA - CANTILLANA</u>	<u>CANTILLANA- LORA DEL RÍO</u>
Superficie acuífera total:	54 Km ²	52 Km ²
Infiltración (lluvia + escorrentía)	5.5 - 6.5 hm ³ /año	5 - 5.8 hm ³ /año
Superficie área de estudio	28.3 Km ²	28.4 Km ²
Infiltración (ll + es) área estudio	2.88 - 3.4 hm ³ /año	2.7 - 3.17 hm ³ /año

TOTAL INFILTRACIÓN (LLUV.+ESC.) ÁREA ESTUDIO: 5.58 - 6.57 hm³/año.

Mediante la fórmula de Coutang se obtiene que la lluvia útil representa el 20% de la precipitación total, lo que significa que la infiltración por lluvia es del 16% al 20% de la precipitación y la recarga por escorrentía es el 8%.

En el presente trabajo la recarga del sistema se estima considerando por separado la infiltración directa de la infiltración del agua de escorrentía procedente de las cuencas superficiales. Para ello se utilizan los datos de precipitación representativos de la zona y los coeficientes de infiltración y escorrentía existentes en la bibliografía, comparados con datos reales de aforos (Anexo VII).

8.1.1.1.- RECARGA DIRECTA

Para la evaluación de la recarga directa al acuífero en la zona de estudio, se ha considerado representativa, como media de toda la zona, la Serie restituida de la zona de Cantillana para el período 55/56 – 97/98, que arroja los siguientes valores medios de precipitación:

RECIPITACIÓN (mm)	Oc	No	Di	En	Feb	Mz	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Se	total
medio Húmedo	66	146	150	126	72	61	59	62	35	2	6	22	808
Medio	77	66	85	73	89	53	50	25	18	1	9	21	567
medio Seco	54	50	39	43	45	46	45	22	18	1	5	15	383

La tasa de infiltración estimada para el acuífero Mioceno en el "Estudio Hidrológico y Plan de Gestión del Agua" elaborado en Diciembre del 2000 para Cobre Las Cruces, S.A., oscila entre el 10 al 25 % de la precipitación media anual. Considerando como valor realista de infiltración el 25% de la precipitación y aplicando éste porcentaje a la Serie restituida de la zona de Cantillana, se obtienen los siguientes valores de infiltración:

INFILTRACIÓN (mm)	Oc	No	Di	En	Feb	Mz	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Se	total
Año medio Húmedo	17	37	37	32	18	15	15	16	9	1	1	6	202
Año Medio	19	16	21	18	22	13	13	6	5	0	2	5	142
Año medio Seco	13	12	10	11	11	11	11	6	4	0	1	4	96

Siendo la superficie de acuífero aflorante en la zona de 56.7 Km², la recarga del acuífero por infiltración directa del agua de lluvia es:

$$\text{Recarga directa lluvia}(\text{hm}^3) = \text{Infiltración (mm)} * \text{Superficie (km}^2) / 1000$$

de donde se obtienen los siguientes valores de recarga:

INFILTRACIÓN (mm)	Oc	No	Di	En	Feb	Mz	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Se	total
Año medio Húmedo	0,9	2,1	2,1	1,8	1,0	0,9	0,8	0,9	0,5	0,0	0,1	0,3	11,5
Año Medio	1,1	0,9	1,2	1,0	1,3	0,8	0,7	0,3	0,3	0,0	0,1	0,3	8,0
Año medio Seco	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,3	0,3	0,0	0,1	0,2	5,4

8.1.1.2.- RECARGA DESDE LOS CAUCES

El procedimiento seguido para estimar los caudales de infiltración procedentes de la escorrentía superficial de los principales cauces que desembocan en el acuífero Mioceno ha sido el siguiente:

Obtención de la precipitación media para el año Medio Húmedo, Medio y Medio Seco en cada cuenca a partir de las estaciones meteorológicas consideradas representativas (Anexo VII).

Cálculo de la lluvia caída en cada cuenca teniendo en cuenta la superficie de las mismas.

Cálculo de la aportación de los cauces a la entrada del acuífero Mioceno aplicando, a la lluvia caída en cada cuenca, el coeficiente de escorrentía medio determinado en el Plan Hidrológico del Guadalquivir para la Rivera de Huesna, el Viar y la Rivera de Huelva (c: 0.221).

Estimación del caudal infiltrado en función de los resultados obtenidos en el aforo diferencial del A° Los Molinos realizado en Mayo de 1998 para Cobre Las Cruces, S.A. y que se cifró entre el 40 y el 60% del caudal, por lo que se ensaya el 40% de infiltración como valor más conservador.

Previo al cálculo, conviene señalar la superficie de cuenca vertiente que interviene en el balance puesto que existe una infraestructura previa de regulación en algunos de los cauces principales, lo cual reduce o elimina la aportación natural de las cuencas vertientes.

Río Rivera de Huesna: La cuenca del río presenta una superficie total de 682 Km², siendo en la estación de aforos nº 127 de la CHG, situada en el contacto mioceno-cuaternario, de 678 Km². Aguas arriba del afloramiento mioceno, en los materiales paleozoicos, el río está regulado por el pantano del Huesna, que comienza a embalsar en 1992 fundamentalmente para abastecimiento, por lo que los caudales desembalsados prácticamente no intervienen en el balance. La superficie de cuenca vertiente entre el embalse y el afloramiento mioceno, considerando sólo la margen derecha (el río es la divisoria hidráulica local que limita el sistema al E) es de unos 15 km².

Arroyo Parroso: La superficie de cuenca vertiente en la estación de aforos nº 129 de la CHG, situada en el contacto del acuífero con las margas, es de 128 Km² de los cuales 6 km² corresponden a materiales del acuífero Mioceno, por lo que la superficie a considerar es de 122 km².

Arroyo Trujillo: Superficie total y considerada 16 km².

Río Viar: Está regulado por el embalse de cabecera de El Pintado, del que deriva, aguas abajo, el Canal del Viar que se destina a uso agrícola. El canal tiene un funcionamiento estacional, de abril a septiembre, y presenta un caudal medio de 2 a 8 m³/s. La superficie de cuenca considerada para el cálculo es de 180 km², a partir de la derivación de dicho canal. La aportación al acuífero Mioceno sería la lluvia caída sobre ésta superficie puesto que se supone que todo el caudal del embalse se deriva al canal durante su período de funcionamiento, y en invierno los caudales sobrantes se destinan a abastecimiento. Cabe destacar que está aprobado el proyecto de construcción de un nuevo embalse en Los Melonares (situado aguas abajo de la toma del canal) con lo que en un futuro la superficie y por tanto la aportación será menor.

El río Viar discurre fundamentalmente sobre materiales impermeables del Paleozoico. Al final de su recorrido atraviesa 1 km de materiales cuaternarios donde se desconoce la conexión exacta con el acuífero mioceno (se supone cuaternario sobre margas azules, o en todo caso, escasa proporción de cuaternario sobre formación acuífera). Por ello se establece, a priori, que su recarga al acuífero debe ser mínima; la infiltración se realiza al acuífero cuaternario.

Arroyo Siete Arroyos: Superficie total y considerada 37.2 km².

Varios A° entre Villaverde y Guillena: Superficie total y considerada 34 km².

Río Rivera de Huelva: Está regulado por varios embalses, el último de los cuales -El Gergal- se localiza próximo a Guillena. Presenta una superficie de cuenca vertiente de 1755 km² y se destina exclusivamente para abastecimiento. Los caudales desembalsados como aliviadero y desagüe de fondo de la presa discurren por una escasa longitud de afloramiento mioceno. Este hecho unido a que el río constituye el límite O del estudio (divisoria hidráulica local), y por tanto sólo interviene la margen izquierda a efectos de cálculo teórico, hace considerar una recarga mínima al acuífero.

El resumen de la estimación de las aportaciones a la entrada del acuífero mioceno y de la infiltración que se produciría al acuífero mioceno, atendiendo al procedimiento descrito, se recoge en la siguiente tabla.

TABLA N°VII.- ESTIMACIÓN DE LA RECARGA PROCEDENTE DE LA ESCORRENTIA SUPERFICIAL. (Infiltración = 40% Aportación Cuenca)

	Superficie considerada (Km ²)	Estaciones Meteorológicas consideradas	Prec media (mm/año)	Lluvia caída (hm ³ /año)	Aportación Cuenca (hm ³ /año)	Infiltración al Mioceno (hm ³ /año)			
Río Rivera	15	año húmedo	806	12,08	2,67	1,07			
		año medio	549	8,23	1,82	0,73			
		año seco	351	5,27	1,16	0,47			
de Huezna									
A° Parroso	123	Cazalla VRM							
		año húmedo	1135	806	970	119,35	26,38	10,55	
		año medio	760	549	655	80,52	17,79	7,12	
		año seco	487	351	419	51,55	11,39	4,56	
A° Trujillo	16	Cazalla VRM							
		año húmedo	1135	806	970	15,53	3,43	1,37	
		año medio	760	549	655	10,47	2,31	0,93	
		año seco	487	351	419	6,71	1,48	0,59	
Río Viar	180	Cazalla Castilbl. Cantilana					considerada mínima		
		año húmedo	1135	1125	808	1023	184,08	40,68	
		año medio	760	731	567	686	123,49	27,29	
		año seco	487	508	383	459	82,69	18,27	
A° Siete	37,2	Castilbl.							
		año húmedo	1125			1125	41,86	9,25	3,70
Arroyos		año medio	731			731	27,20	6,01	2,40
		año seco	508			508	18,90	4,18	1,67
A ^{os} entre Villaverde y Guillena	34	Castilbl. Alcalá							
		año húmedo	1125	743		934	31,76	7,02	2,81
		año medio	731	543		637	21,66	4,79	1,91
		año seco	508	344		426	14,49	3,20	1,28
Río Rivera de Huelva							considerada mínima		
					TOTAL	año húmedo	89,43	19,50	
						año medio	60,82	13,09	
						año seco	39,69	8,67	

8.1.1.3.- RETORNOS DE RIEGO

La evaluación de la recarga del acuífero por retornos de riego se basa en dos supuestos:

Eficiencia de riego media del 85%, lo que representa el 15% de la dotación.

Se contempla la dotación completa de riego, que incluye tanto las aguas subterráneas como las superficiales (Canal del Viar), para las zonas regadas en el afloramiento del Mioceno de Base y que incluye la zona al norte del canal del Viar (675 ha) y parte de la zona regada entre éste y el río Guadalquivir (353 ha).

No se contempla la zona regable del Bajo Guadalquivir pues se considera que no recarga al acuífero mioceno; debido al espesor de margas, los excedentes de riego recargarían el aluvial del cuaternario.

De este modo el retorno de riego resultante es:

N. del Canal del Viar:	$675 \text{ ha} * 5000 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{a} * 0.15 = 506.250 \text{ m}^3/\text{a}$
S. del Canal del Viar:	$353 \text{ ha} * 1000 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{a} * 0.15 = 52.950 \text{ m}^3/\text{a}$

TOTAL: 0.56 hm³/año

8.1.2. SALIDAS

8.1.2.1.- REGADÍOS

La distribución de regadíos en la zona está fuertemente condicionada por la infraestructura de riego existente:

- Canal del Viar. Deriva del embalse de El Pintado que regula el río Viar. Discurre de norte a sur paralelo al río hasta el entorno de Cantillana donde cambia de dirección (NE-SO), siendo su traza más o menos paralela al contacto Mioceno - margas azules hasta la localidad de Guillena.
- Canal del Bajo Guadalquivir. Se localiza en la margen derecha del río Guadalquivir más allá del trazado de la línea de ferrocarril, y su recorrido en la zona es paralelo a la dirección del río.

La canalización de aguas superficiales determina la siguiente zonación de áreas regables:

ZONAS REGADAS CON AGUAS SUBTERRÁNEAS PRINCIPALMENTE. Se sitúan al Norte del Canal del Viar y se diferencian tres sectores:

TRAMO GUILLENA-BURGUILLOS

Fincas El Cañuelo, Las Cardonas, Agriquem y otras = 250 ha regadío.

TRAMO BURGUILLOS-VILLAVERDE DEL RÍO

Fincas Dehesa de Mudapelo (100 ha), Piedras Gordas (125 ha) y Mesa Redonda (150 ha) = 375 ha de regadío.

TRAMO VILLAVERDE DEL RÍO- CANTILLANA

Área de Cantillana = 50 ha de regadío.

TRAMO CANTILLANA-VILLANUEVA DEL RÍO Y MINAS

Afloramientos al norte de Cantillana = 50 ha de regadío

Del total de superficie regada al norte del Canal del Viar (675 ha), la mayoría lo son con agua procedente de los granitos situados bajo el Mioceno de Base. Como estimación para las extracciones del acuífero Mioceno puede suponerse una superficie total regada con agua del Mioceno de 250 ha y un caudal medio de 5000 m³/año, lo que supondría una **extracción media anual de 1,2 hm³/año.**

ZONAS REGADAS CON AGUAS SUBTERRÁNEAS AUXILIARMENTE. Se localizan entre el Canal del Viar y el Canal del Bajo Guadalquivir, siendo la superficie cultivada la siguiente:

MUNICIPIO	HECTAREAS
Alcalá del río	4785
Villaverde del Río	2215
Brenes	341
Guillena	1167
Burguillos	966
Cantillana	879
TOTAL	10353

De las 10.353 ha regadas en la zona de estudio debe suponerse que no todas disponen de aguas subterráneas y que no todas siembran anualmente, con lo que se considera que el total de hectáreas que se riegan un año medio con aguas subterráneas del Mioceno de Base en la zona de estudio es de 8000 ha, por lo que una estimación coherente del agua extraída como media, considerando tanto los años secos como los húmedos es de 1.000 m³/ha/año, lo que hace un **total de extracciones medias anuales de 8 hm³/año** para años medios y secos y de sólo **1 hm³/año** para años húmedos.

Respecto a la parte de la zona regable del Bajo Guadalquivir en la que se utiliza de forma auxiliar las aguas subterráneas, situada entre la vía del tren y el río Guadalquivir, tiene serios problemas de calidad y la utilización media de las aguas subterráneas es nula; sólo se utilizan en períodos de sequía, en los que pueden llegar a utilizarse 500 l/s. Este caudal durante los 6 meses de riego, supone una extracción **para años de extraordinaria sequía de 4,5 hm³/año** para una superficie de 5.558 ha, que comprende desde San José de la Rinconada hasta Los Rosales.

AÑO TIPO	N. Canal del Viar	C. Viar-R Guadalquivir	Sur R. Guadalquivir	TOTAL
HÚMEDO	1,2 hm ³ /año	1 hm ³ /año	0 hm ³ /año	2,2 hm ³ /año
MEDIO	1,2 hm ³ /año	8 hm ³ /año	0 hm ³ /año	9,2 hm ³ /año
SECO	1,2 hm ³ /año	8 hm ³ /año	4,5 hm ³ /año	13,7hm ³ /año

8.1.2.2.- ABASTECIMIENTO URBANO

La extracción de aguas subterráneas para abastecimiento urbano, considerando una dotación diaria de 300 L/hab, supone un volumen medio anual:

BURGUILLOS	3485 hab x 0.3 m ³ /hab/día x 365 días/año = 0.38 hm ³ /año
VILLAVERDE DEL RÍO	6633 hab x 0.3 m ³ /hab/día x 365 días/año = 0.72 hm ³ /año
SAN IGNACIO DEL VIAR	200 hab x 0.3 m ³ /hab/día x 365 días/año = 0.02 hm ³ /año
BRENES	10509 hab x 0.3 m ³ /hab/día x 365 días/año = 1.15 hm ³ /año
Total extracciones abastecimiento anual medio 2.27 hm³/año	

En años de sequía extrema pueden llegar a sumarse las poblaciones de Cantillana (8929 hab), Villanueva del Río y Minas (5549 hab), Alcolea del Río (3385 hab) y Alcalá del Río (9274 hab), que representan un total de 27.137 hab, que en momentos de necesidad pueden llegar a captar:

SUMA POBLACIONES	27.137 hab x 0.3 m³/hab/día x 365 días/año = 3 hm³/año
-------------------------	---

Por tanto, el volumen total anual para abastecimiento en periodos de extrema sequía puede llegar a 5.27 hm³/año.

8.1.2.3.- MANANTIALES

La descarga natural del acuífero a través de los manantiales se ha estimado en 0.5 hm³/año para los años húmedos. En los años medios y secos, la mayoría de los manantiales permanecen secos por lo que su volumen resulta irrelevante para el cálculo del balance.

8.2.- ENSAYO DE BALANCE HÍDRICO

ENTRADAS (hm³)				
	LLUVIA	CAUCES	RET. RIEGO	TOTAL
Año Húmedo	9,19	19,50	2,06	30,75
Año Medio	6,43	13,09	2,06	21,58
Año Seco	4,35	8,57	2,06	14,98
SALIDAS (hm³)				
	RIEGO	ABAST.	MANAN.	TOTAL
Año Húmedo	9,00	2,27	0,50	11,77
Año Medio	9,00	2,27		11,27
Año Seco	13,50	5,27		18,77
		DIFERENCIA		
Año Húmedo		18,98		
Año Medio		10,31		
Año Seco		-3,79		

8.3.- VALIDEZ DE LOS CÁLCULOS TEÓRICOS

La estimación de la recarga directa se considera aceptable, la infiltración como el 20% de la precipitación total coincide con los cálculos efectuados mediante la fórmula de Coutang en el estudio de 1983, con el realizado por "Cobre Las Cruces" y con los valores teóricos generalmente utilizados para este tipo de materiales.

Es posible precisar más la aportación de las cuencas estableciendo un coeficiente de escorrentía para cada tipo de año, puesto que es lógico que los años húmedos presenten mayor escorrentía que los secos. Así, comparando los datos anuales de precipitación en la Ribera del Huesna y en el arroyo Parroso con los datos de aforos existentes en las estaciones n^{os} 127 y 128 de la CHG (Anexo VII), se observa que éste coeficiente es muy

variable en función no sólo de la cantidad de lluvia caída sino también de las condiciones previas de humedad (el coeficiente para un año medio es distinto dependiendo si los años anteriores han sido húmedos o secos). En función de los coeficientes de escorrentía calculados con datos reales pueden asignarse los siguientes valores:

	<u>coef. de escorrentía</u>
Año Húmedo:	0.4
Año Medio:	0.2
Año Seco:	0.1

Parece que tomar una infiltración procedente de la escorrentía como el 40% de la aportación anual es un dato muy elevado. Dado que el aforo diferencial fue realizado en Mayo, y considerando cómo se produce la infiltración en pequeñas cuencas que presentan una distribución de la precipitación irregular, éste valor puede ser muy variable según la zona (niveles piezométricos) y época del año. Puede ser un valor aceptable para ese mes pero no resulta válido aplicado como valor medio del año.

En el Anexo VII se realiza una aproximación teórica del orden de magnitud de la infiltración procedente de la escorrentía basada en datos reales de precipitación y aportación en el A° Parroso, cuyos resultados pueden extrapolarse al resto de las cuencas. El planteamiento es el siguiente:

si conocemos el caudal a la salida del Mioceno mediante los datos de la estación de aforos, conocemos la precipitación de la cuenca y ajustamos el coeficiente de escorrentía para la superficie total (128 km²),

podemos calcular el caudal teórico a la entrada del Mioceno aplicando la misma precipitación y coeficiente de escorrentía a la superficie de cuenca correspondiente (122 km²)

la diferencia de aportes a la entrada y a la salida puede ser considerada como una medida de lo que se infiltra en el acuífero.

Los resultados obtenidos aplicando este planteamiento, para los años que se dispone de datos suficientes, indican que la infiltración oscila entre 0,6 y 2.11 hm³/año según sea el tipo de año, y representa el 5 % de la aportación total a la cuenca.

Así, con estas consideraciones, la recarga desde los cauces resultante es la siguiente:

TABLA N° VIII.- ESTIMACIÓN DE LA RECARGA PROCEDENTE DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL.
(Infiltración = 5% Aportación de la cuenca)

	Superficie considerada (Km ²)	Prec media Cuenca (mm/año)	Lluvia caída Cuenca (hm ³ /año)	Aportación Cuenca (hm ³ /año)	Infiltración al Mioceno (hm ³ /año)	
Río Ribera de Huezna	15	año húmedo	806	12,08	4,83	0,24
		año medio	549	8,23	1,65	0,08
		año seco	351	5,27	0,53	0,03
A° Parroso	123	año húmedo	970	119,35	47,74	2,39
		año medio	655	80,52	16,10	0,81
		año seco	419	51,55	5,15	0,26
A° Trujillo	16	año húmedo	970	15,53	6,21	0,31
		año medio	655	10,47	2,09	0,10
		año seco	419	6,71	0,67	0,03
Río Viar	180	año húmedo	1023	184,08	73,63	considerada mínima
		año medio	686	123,49	24,70	
		año seco	459	82,69	8,27	
A° Siete Arroyos	37,2	año húmedo	1125	41,86	16,74	0,84
		año medio	731	27,20	5,44	0,27
		año seco	508	18,90	1,89	0,09
A° entre Villaverde y Guillena	34	año húmedo	934	31,75	12,70	0,64
		año medio	637	21,67	4,33	0,22
		año seco	426	14,48	1,45	0,07
Río Ribera de Huelva					considerada mínima	

año húmedo	161,86	4,41
año medio	54,32	1,48
año seco	17,96	0,48

quedando el **BALANCE HÍDRICO** de la siguiente manera:

ENTRADAS (hm ³)				
	LLUVIA	CAUCES	RET. RIEGO	TOTAL
Año Húmedo	11,5	4,41	0	15,91
Año Medio	8	1,48	0,56	10,04
Año Seco	5,4	0,48	0,56	6,44
SALIDAS (hm ³)				
	RIEGO	ABAST.	MANAN.	TOTAL
Año Húmedo	2,20	2,27	0,50	4,97
Año Medio	9,20	2,27		11,47
Año Seco	13,70	5,27		18,97
DIFERENCIA				
Año Húmedo	10,94			
Año Medio	-1,43			
Año Seco	-12,53			

Los valores negativos parecen indicar una variación en el almacenamiento del acuífero, que sería coherente con el descenso de niveles piezométricos que se han venido observando. Si bien, la recuperación de los niveles de forma rápida con la llegada de las lluvias, así como, la presunción de la existencia de un número mayor de extracciones del contabilizado, obligan a contemplar la posibilidad de un aporte extra de agua subterránea al sistema procedente, probablemente, de los materiales paleozoicos subyacentes. No obstante, antes de asegurar el déficit anual del sistema debe procederse al ajuste y cierre del balance que está condicionado por la mejora en el conocimiento de los siguientes términos:

- Extracciones para riego
- Recarga procedente de la escorrentía superficial.

En el Anexo VII se presentan los datos de los aforos llevados a cabo durante la realización del proyecto.

8.4.- RESERVAS Y RECURSOS DISPONIBLES

Las reservas del tramo de acuífero que estamos estudiando las estimamos a partir de los siguientes componentes:

En la zona de afloramiento, donde el acuífero actúa como libre, se considera como reserva el agua contenida en el tramo de acuífero por debajo del nivel máximo alcanzado, que sea extraíble.

En la zona confinada, se considera como reserva, la parte extraíble del agua comprendida en los poros del sistema como resultado de la compresión tanto del agua como de la estructura del acuífero.

La zona de afloramiento del acuífero en el área de estudio ocupa una superficie de 56,7 km², en la que la potencia media de la formación se sitúa en torno a 35 m, la profundidad media del nivel se sitúa en 15 m, con descensos máximos de hasta 10 m por término medio. En este caso, la zona saturada de forma permanente, se estima en unos 10 m en promedio y para un coeficiente de almacenamiento, estimado en estudios anteriores en 0.01 para la zona libre y 0.0001 para la confinada, se tiene el siguiente volumen de

reservas, del mismo modo habría que considerar una franja de 0.3 km (9,6 km²) del acuífero bajo las margas que funciona también como libre:

$$V = S \times E \times e = 66.3 \text{ Mm}^2 \times 10 \text{ m} \times 0.01 = 6,63 \text{ hm}^3$$

$$S = \text{Superficie} = 56,7 \text{ km}^2 + 9,60 \text{ km}^2 = 66,30 \times 1.000.000 \text{ m}^2$$

$$E = \text{Espesor saturado} = 10 \text{ m}$$

$$e = \text{coeficiente de almacenamiento} = 0.01$$

La superficie de la banda que ocupa desde el borde sur del afloramiento del Mioceno de Base hasta la línea del río Guadalquivir, en toda la zona de estudio se estima en 160 km². En esta superficie la potencia media de la formación es de 25 m, la situación media del nivel mínimo se sitúa a 20 m de profundidad, y la profundidad media del techo de la formación se sitúa en 65 m de profundidad. En esta área, el volumen estimado de reserva se considerará aquel debido al descenso de nivel en la zona confinada entre el nivel mínimo conocido y el techo del acuífero (de forma que nunca quede como libre), y que para un coeficiente de almacenamiento de 0.0001 es el siguiente:

$$V = S \times \Delta H \times s$$

$$V = 160 \text{ M m}^2 \times (65-25) \text{ m} \times 0.0001 = 0,64 \text{ hm}^3.$$

$$S = \text{Superficie del acuífero. } 160 \text{ km}^2 = 160 \text{ M m}^2.$$

$$\Delta H = \text{Descenso nivel piezométrico} = 65 \text{ m} - 25 \text{ m} = 40 \text{ m}$$

$$s = \text{Coeficiente de almacenamiento del acuífero confinado} = 10^{-4}$$

Por tanto, las reservas disponibles en el tramo de acuífero Mioceno estudiado es de 7,27 hm³.

No obstante lo anterior, debe aclararse que en realidad la cantidad de agua almacenada en la zona confinada es muy superior, y puede alcanzar los 200 hm³, si bien no es posible incluirla en el concepto de reserva disponible ya que el hecho de utilizarla implicaría causar daños irreparables al acuífero por compresión del mismo.

9.- VIABILIDAD DE LA RECARGA ARTIFICIAL.-

9.1- JUSTIFICACIÓN DE UNA OPERACIÓN DE RECARGA ARTIFICIAL

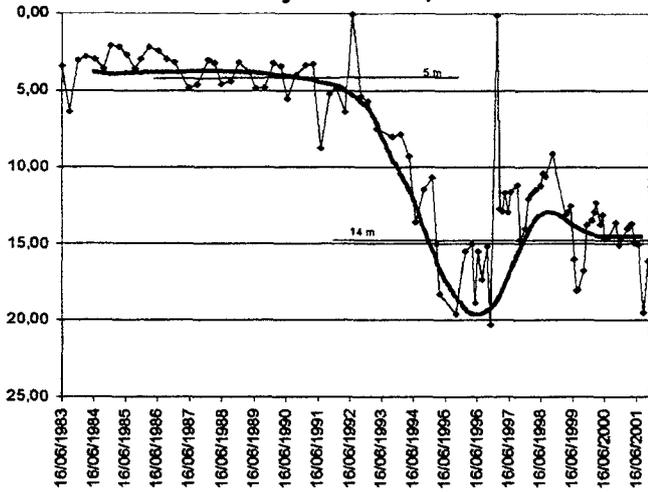
Para el planteamiento de una instalación de recarga artificial es necesario; disponer de caudales excedentes en determinada época del año, capacidad de almacenamiento de dichos caudales en el acuífero en esa misma época y una demanda que atender. Además de estos parámetros principales, deben tenerse en cuenta también por su elevada importancia, la calidad de las aguas a infiltrar, tanto por su potabilidad como por los elementos en suspensión que arrastre y puedan dificultar la operación de infiltración, y las características del terreno desde la perspectiva de la capacidad de infiltración y facilidad de colmatación del mismo, así como los tiempos de retención del agua recargada.

Para la comprobación de la capacidad de recarga o de almacenamiento en este tramo de acuífero se han analizado las series piezométricas de los puntos de la red de control del IGME en la zona (Figura 30), cuya situación se puede observar en la Figura 9, llegándose a las siguientes conclusiones:

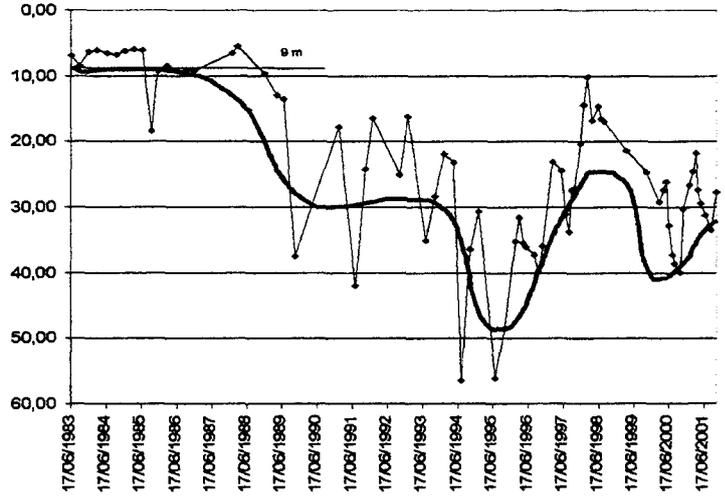
Los niveles piezométricos de la mayoría de los puntos controlados se mantuvieron próximos a la superficie (entre 2 m y 10 m) y con oscilaciones anuales pequeñas (entre 2 m y 4 m) durante la década de los ochenta, y a partir de principio de los noventa y hasta mediados de la década, se produce una grave afección a la piezometría debido al fuerte incremento de las extracciones para riego como consecuencia de la sequía, que tiene su máxima incidencia en el verano-otoño de 1.995 con descensos de entre 15 m y 40 m. A continuación, tras las lluvias de 1.996 y 1.997, y prácticamente hasta la actualidad los niveles han sufrido una recuperación, pero sin alcanzar el régimen “quasiestacionario” de la década de los ochenta, cuantificándose el descenso medio en la zona de estudio en unos 10 m aproximadamente. Finalmente, debe considerarse también que las oscilaciones interanuales han aumentado como consecuencia del uso estacional de parte de la infraestructura de extracciones para riego que se creó durante la sequía y del creciente aumento de la superficie de frutales que requiere un periodo de riego diferente al que actualmente ofrece el canal del Viar, para su zona regable.

Por tanto, se estima que existe una diferencia de cota piezométrica de 10 m respecto al funcionamiento natural del acuífero que puede ser objeto de una recarga artificial, incluso en periodo de invierno en el que los niveles alcanzan sus máximos.

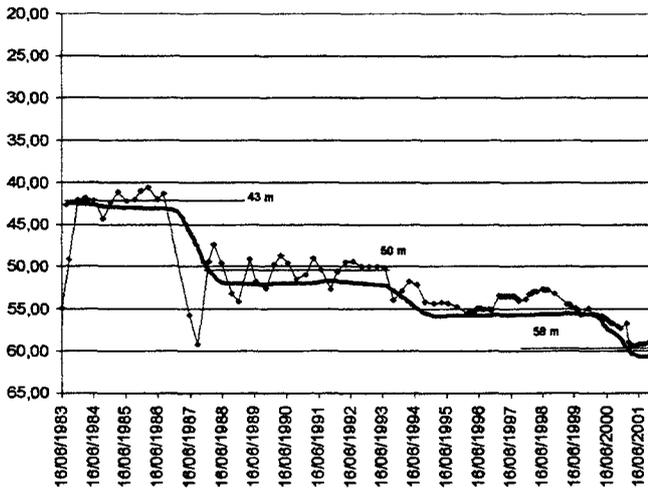
1239-3-0018 Burguillos. Próximo al Arroyo del Pilar,



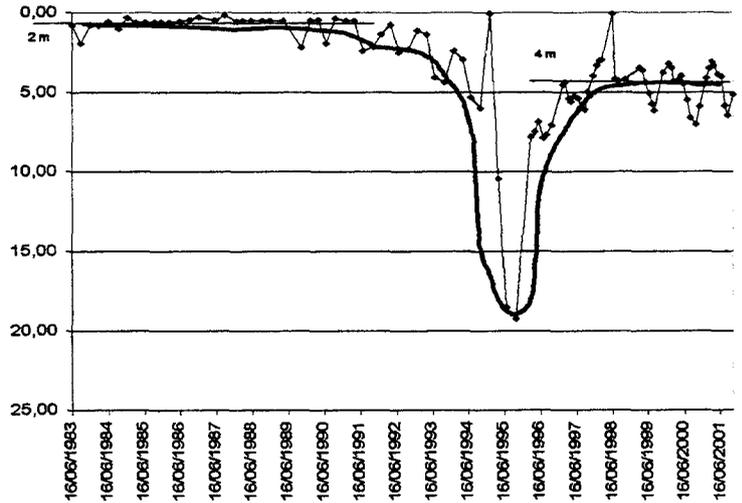
1538-1-0007 Posada



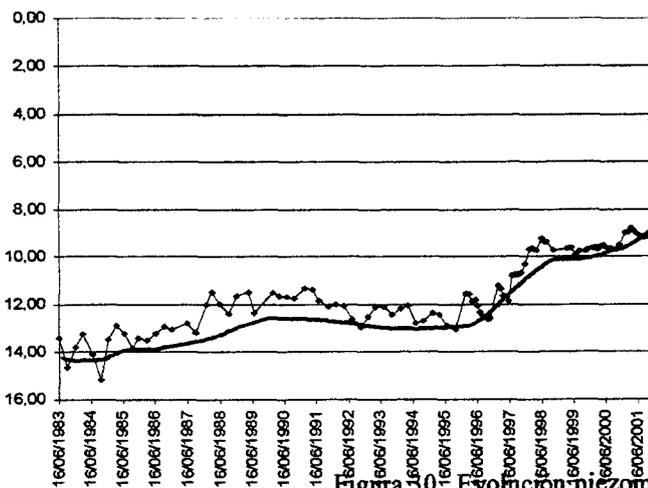
1239-7-0019 Ctra. Guillena-Burguillos (próximo a Burguillos)



1339-1-0021 Ctra. Villaverde-Cantillana



1339-2-0044 Villanueva del Río y Minas



1239-5-0026 Sur de Gerena

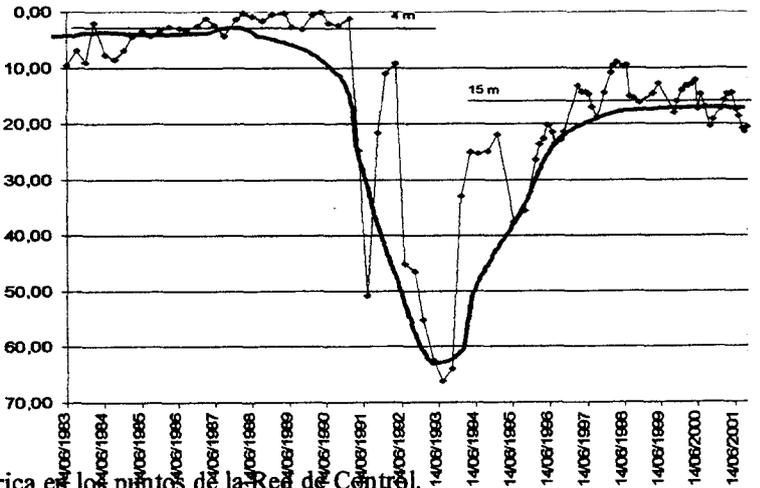
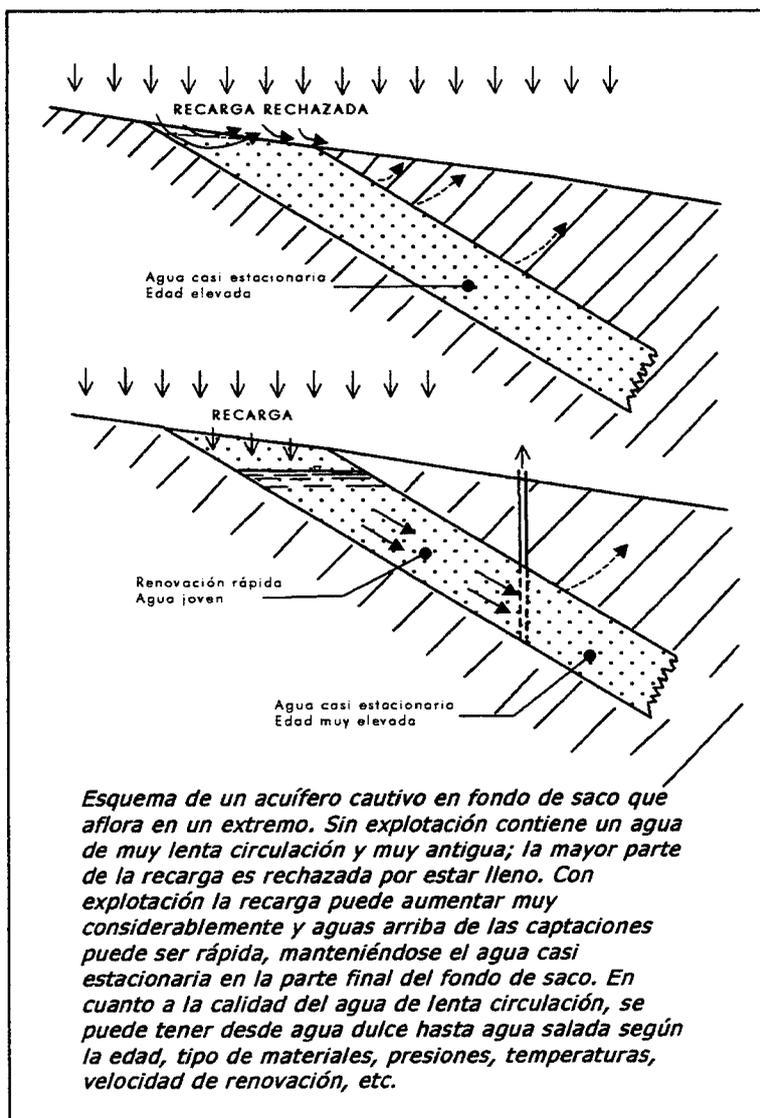


Figura 30. Evolución piezométrica en los puntos de la Red Central.

Además de las razones expuestas en el párrafo anterior, se debe tener en consideración que la zona objeto de este estudio viene sufriendo un uso creciente que localmente está provocando la sobreexplotación del acuífero, que entraña graves riesgos para el acuífero cuando se da en zona confinadas y también provoca la aparición de altos contenidos en sales procedentes de las aguas fósiles del fondo del acuífero.



Este principio es el que rige el funcionamiento de nuestra zona de estudio y por el que se plantea la posibilidad de realizar una operación de recarga artificial. Además, tal como se describe en la explicación del gráfico, las aguas fósiles pueden tener contenidos elevados en sales y la fuerte explotación de zonas locales puede provocar la llamada de las mismas hasta las captaciones.

En los siguientes apartados se justificará la existencia de caudales excedentes en los cursos que atraviesan la zona de estudio, así como la idoneidad de dichas aguas para la recarga artificial y los condicionantes que debe cumplir el terreno.

Figura 31. Esquema de acuífero cautivo en fondo de saco.
Hidrología subterránea. Custodio, E.Llamas, M

A estos efectos, se describe mejor el funcionamiento de este tipo de acuíferos llamados de *fondo de saco*, con la figura nº 31. En esta se aprecia como en régimen natural la recarga y descarga de la unidad se realiza por la zona de afloramiento, permaneciendo las aguas interiores del acuífero estacionarias y de edad muy avanzada.

La aparición de explotaciones renueva las aguas existentes entre estas y la zona de afloramiento del acuífero e incrementa la recarga del mismo al haber más capacidad disponible en el acuífero.

9.2.- EVALUACIÓN DE APORTACIONES Y DETERMINACIÓN DE EXCEDENTES HÍDRICOS

9.2.1.- ORIGEN DEL AGUA DE RECARGA. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS APORTACIONES: VOLUMEN ANUAL POTENCIALMENTE RECARGABLE.

La parte de acuífero objeto de este proyecto es atravesada por los siguientes cauces superficiales principales, de oeste a este: Rivera de Huelva, Arroyo Herrero, Arroyo de Burguillos, Arroyo del Pilar, Arroyo Mudapelos, Río Siete Arroyos, Río Viar, Arroyo Trujillo, Arroyo El Parroso y Rivera del Huezna.

Las aportaciones de estos cauces a la entrada del Mioceno para años medios húmedos, medios y secos se muestran en la siguiente tabla:

En la lectura de esta tabla debe tenerse en cuenta que los coeficientes de escorrentía considerados han sido de 0.2 (Coeficiente del Plan Hidrológico de Cuenca) para años medios, 0.4 para años húmedos y 0.1 para años secos, y que han sido contrastados con los datos de la estación de aforos situada en el puente de la carretera Villanueva-Cantillana, que arrojó para los años 95-96 y 96-97, considerados como húmedos, las cifras de 45 hm³/año y 48 hm³/año, mientras que para el año 90-91, considerado como medio, se aforó un caudal de 18 hm³/año.

Por tanto, se dispone de caudales excedentarios (157'35 hm³/año, 52'88 hm³/año, 17'55 hm³/año), al menos en volumen, para realizar operaciones de recarga artificial del acuífero que, como se ha demostrado en el apartado anterior, dispone de capacidad para ello.

Ahora bien, los estudios pertinentes para aplicar esta técnica no pueden ser de carácter general y necesitan restringirse a cada zona de aplicación posible en concreto y ver las posibilidades de dicha zona.

CAUCE	Lluvia caída Cuenca (hm³/año)	Aportación Cuenca (hm³/año)	Infiltración Cauce (hm³/año)	Recursos no Regulados (hm³/año)
Ribera del Huezna	12,08	4,83	0,24	4,59
	8,23	1,65	0,08	1,57
	5,27	0,53	0,03	0,5
A° Parroso	119,3	47,72	2,38	45,34
	80,56	16,11	0,81	15,3
	51,54	5,1	0,26	4,84
A° Trujillo	15,53	6,21	0,31	5,9
	10,47	2,1	0,11	2
	6,71	0,7	0,04	0,66
Río Viar	184,1	73,6		73,6
	123,5	24,7		24,7
	82,7	8,3		8,3
A° Siete Arroyos	41,86	16,7	0,84	15,86
	27,2	5,5	0,3	5,2
	18,9	1,9	0,1	1,8
A ^{os} Villaverde-Guillena	31,7	12,7	0,64	12,06
	21,6	4,3	0,22	4,08
	14,5	1,5	0,08	1,42
TOTAL	404,57	161,76	4,41	157,35
	282	54,36	1,48	52,88
	179,6	18,03	0,48	17,55

Así, en el estudio detallado de la situación del nivel piezométrico del acuífero, se pone de manifiesto que el tramo comprendido entre Cantillana y Villanueva del Río y Minas, si bien no dispone de mucha información, presenta los valores más elevados de la piezometría y por tanto los que están más próximos a su situación natural y disponen de menos capacidad de recarga.

Por esto, del cuadro anterior, debe descartarse, en principio, los caudales provenientes de la Rivera del Huezna, del Arroyo el Parroso y del Arroyo Trujillo.

9.2.2.- DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LAS APORTACIONES: CAUDALES POTENCIALMENTE APROVECHABLES.

Los caudales excedentarios disponibles en los diversos cauces del área de estudio, no son aprovechables completamente para realizar operaciones de recarga artificial, sino que el porcentaje de uso dependerá de diversos factores, entre los que destaca la distribución y forma de las avenidas, que en última instancia va a determinar las posibilidades técnicas de captación de dichos caudales.

Si bien no se dispone de datos diarios de aforos de todos los cauces, se han analizado los de la Rivera de Huezna y el Parroso y extrapolado al resto de cauces, teniendo en cuenta que en el caso del Viar, además de las aportaciones de la cuenca se consideran también los desembalses del pantano de El Pintado que lo regula.

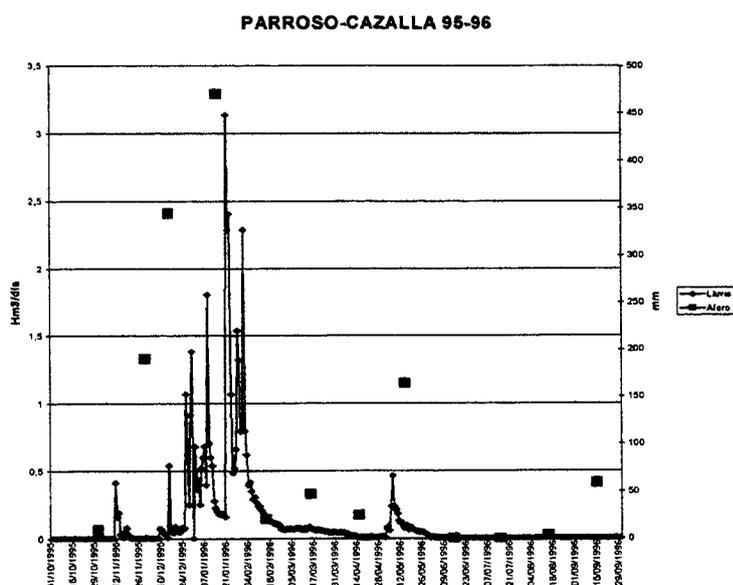


Figura 32. Aforo de A° El Parroso en Villanueva, y precipitaciones en Cazalla. Año lluvioso

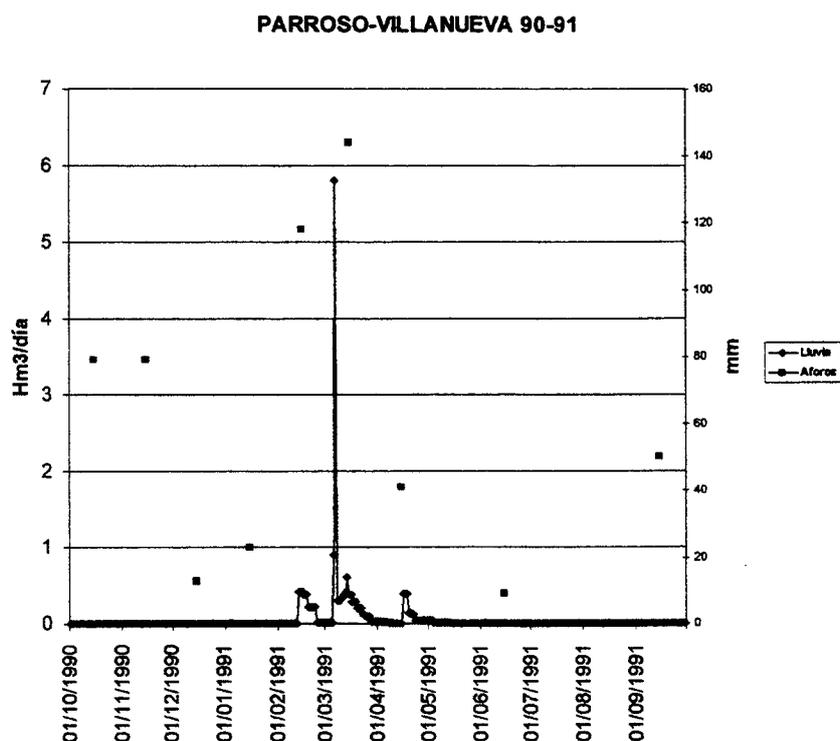
Del examen de la serie pluviométricas de las estaciones de la zona (5729 El Pintado, 5733 Almadén de la Plata, 5697E Villanueva del Río, 5704 Cazalla de la Sierra, 5774 Castilblanco de los Arroyos, 5711 Cantillana, 5743 Alcalá del Río), se deduce que los meses más lluviosos en orden decreciente son Diciembre, Noviembre, Enero, Febrero, Octubre y Abril.

De igual modo si analizamos la distribución temporal de las avenidas, vemos que la mayoría de estas coinciden con la época que va desde finales de noviembre a finales de abril

En la gráfica (Figura 32) se observa que la curva de descarga de la avenida sigue una función exponencial y tarda entre 15 días y 20 días en alcanzar el nivel base, si bien en los dos o tres primeros días se ha evacuado hasta el 80% de la avenida.

En términos de caudales hay que decir que en el caso del año analizado (95-96) del total de aportaciones de la cuenca del arroyo Parroso, 44 hm³, más del 50% se evacuaron en enero, el 20% en febrero, el 15% en diciembre y el resto entre marzo y mayo. Se deduce también, que desde el comienzo desde las primeras avenidas, en un año húmedo como este se cuenta con 45 día con un caudal superior a 0,25 hm³/día y casi 100 días con más de 50.000 m³ disponibles. Estas cantidades hacen un total de 14 hm³ de aportación en años lluviosos en régimen más o menos laminar, y en un plazo total de hasta 100 días.

Si analizamos en esta misma cuenca un año catalogado como medio, como el 90-91, se llega a los siguientes resultados (Figura 33):



En este caso, a parte de la avenida extraordinaria de principios de marzo, se aprecia como las lluvias han sido más primaverales que de costumbre, si bien su suma corresponde a la de un año medio, y se aprecia también como se dispone de un periodo de 30 días con caudales superiores a los $0,2 \text{ hm}^3/\text{día}$, quedando luego otros 30 días con un caudal próximo a los $40.000 \text{ m}^3/\text{día}$.

En este caso el total de aportaciones de este arroyo, en año medio, y descontadas las avenidas, es decir aprovechando un régimen casi laminar sería de 10 hm^3 al año. Se muestra en esta gráfica la precipitación media mensual y se le adjudica el valor al día 15 de cada mes, y de su análisis se deduce que en los primeros meses del año meteorológico, las precipitaciones se invierten en cubrir el déficit de humedad del suelo y reponer los niveles piezométricos en las zonas permeables, por lo que en esta época, no basta con lluvias de valores medios para provocar la escorrentía.

En los meses de invierno, una vez que los déficits de agua del suelo han sido total o parcialmente cubiertos, la llegada de una precipitación media o alta provoca la inmediata creación de una escorrentía que por lo general tiene una distribución torrencial y respuesta puntual que decrece rápidamente (hasta un 80% en 48 horas).

Análogos resultados se obtienen en la estación de aforo del Huezna, si bien en este caso ha de tenerse en cuenta los diversos desembalses que se han venido realizando desde el embalse del Huezna.

En la gráfica (Figura 34) se aprecian dichos desembalses, principalmente en verano, y en el resto del año se comprueba la similitud con la cuenca del Parroso, en este caso se disponen de 15 días con caudales muy superiores a $0,2 \text{ hm}^3/\text{día}$ y luego otros 20 días más con caudales superiores a $15.000 \text{ m}^3/\text{día}$. Se aprecia un menor caudal total debido a que la cuenca vertiente aguas abajo del pantano, o sea, no regulada, es mucho menor que la del Parroso.

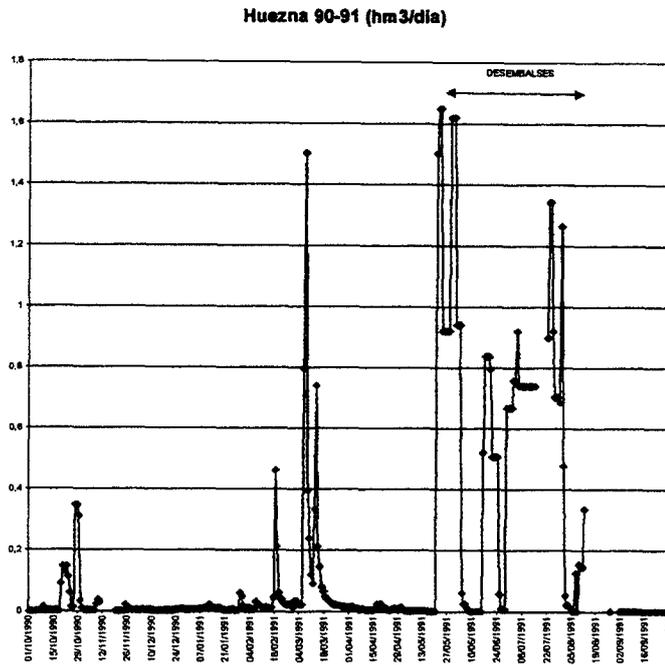


Figura 34. Aforo en la Rivera del Huezna.

Para extrapolar estos análisis al resto de cauces de la zona de estudio se debe partir de una serie de abstracciones como:

- ✓ Considerar que la precipitación caída en la cuenca del Parroso es proporcional a las medidas en las estaciones de Pantano del Pintado 5729 y Villanueva del Río 5697E
- ✓ Partir de una distribución análoga de las precipitaciones en ambas cuencas,
- ✓ Considerar la proporcionalidad entre las avenidas de la cuenca del Parroso con sus precipitaciones y su superficie y aplicar esta proporcionalidad a las demás cuencas,
- ✓ Descartar el efecto que tiene sobre las avenidas otros factores tales como la pendiente del terreno, la infiltración, evapotranspiración, etc.

Siguiendo los criterios anteriores y partiendo que los caudales disponibles en el arroyo Parroso para un año húmedo y medio son respectivamente de 14 hm³ y 10 hm³ cuando las aportaciones totales para estos años han sido de 47,72 hm³ y 16,11 hm³. Se ha señalado también el valor de años húmedos para mostrar que una mayor precipitación no tiene por que ser proporcional a una mayor escorrentía aprovechable, cuando esa diferencia se ha producido principalmente en valores altos que provocan grandes avenidas.

En términos de años y valores medios se estima que el caudal de escorrentía aprovechable es del orden del 60% de la aportación de la cuenca, si bien debe considerarse que del caudal que se detraiga para uso en recarga artificial del acuífero el

5% ya no formará parte de la infiltración en el cauce, al no pasar por la zona de afloramiento del acuífero.

Por tanto para el resto de cauces los caudales aprovechables estimados serán los siguientes:

CAUCE	Lluvia caída Cuenca (hm³/año)	Aportación Cuenca (hm³/año)	Recurso aprovechable (hm³/año)
A° Parroso	80,56	16,11	9,60
Río Viar	123,5	24,7	14,8
A° Siete Arroyos	27,2	5,5	3,3
A ^{os} Villaverde-Guillena	21,6	4,3	2,60
TOTAL	252,86	50,61	30,3

Debe considerarse además, que la cuenca del río Viar utilizada para estos cálculos va desde el azud de desvío para el canal de riego, hasta Cantillana, por lo que no se ha tenido en cuenta el futuro embalse de Melonares, que no obstante se sitúa próximo al mencionado azud.

Por tanto, de una forma estimada, se dispone de caudales excedentes y técnicamente aprovechables para realizar operaciones de recarga artificial. Análogamente a la proporcionalidad de los aportes totales, puede suponerse una proporcionalidad en las aportaciones diarias de la avenida con lo que tendríamos los siguientes datos:

CAUCE	Recurso aprovech. (hm³/año)	Q. máximo avenida (hm³/día)	Duración (días)	Aportación (hm³/año)	Q medio avenida (hm³/día)	Duración (días)	Aportación (hm³/año)
A. Parroso	9,6	>0,2	30	>6	0,04	30	1,2
R. Viar	14,8	>0,3	30	>9	0,06	60	3,6
A. Siete Arroyos	3,3	>0,08	30	>2,5	0,02	30	0,6
A. Villaverde- Guillena	2,6	>0,06	30	>1,8	0,015	30	0,45
TOTAL	30,3			>19,3			5,85

Por tanto, el caudal disponible para unas instalaciones de recarga artificial, siempre que cumpla los requerimientos técnicos necesarios es algo superior a 25,15 hm³/año.

No obstante estos datos, debe tenerse conciencia de lo realmente aprovechable a la hora de diseñar una instalación de recarga artificial.

9.2.3.- CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD Y VARIABILIDAD TEMPORAL DEL AGUA DE RECARGA.

PUNTO	FECHA	DQO	CL	SO4	HCO3	CO3	NOS	NA	MG	CA	K	PH	COND	RS	NO2	NH4	TEM	B	F
VALORES LÍMITE DIR. 98/83/CE			250	250			50	200	50			9,5	2500		0,5	0,5		1	1,5
VALORES LÍMITE R.D. 1138/90		5	200	250			50	150	50	200	12	9,5	2500	1500	0,1	0,5	25	1	0,7 - 1,5
MUESTRA	FECHA	DQO	CL	SO4	HCO3	CO3	NOS	NA	MG	CA	K	PH	COND	RS	NO2	NH4	P2O5	SIO2	SS
Rivera del Huezna	18/09/2001	1,9	13	11	166	0	3	12	9	40	2	7,1	244		0,00	0,00	0,00	7,5	6,7
Arroyo Parroso	18/09/2001	0,8	16	13	310	0	1	17	12	87	1	7,5	434		0,00	0,00	0,00	26,4	9,1
Siete Arroyos	18/09/2001	1,4	45	15	284	0	2	24	33	53	0	7,7	497		0,00	0,00	0,00	39,1	2,5

Tabla IX Calidad aguas de recarga.

En la tabla IX, se muestran las características físico-químicas de las aguas de tres de los cauces de la zona de estudio y se observa como las aguas se pueden catalogar como aptas para el consumo, estando todos los parámetros analizados dentro de los valores límites de potabilidad y por tanto son aptas para la recarga, además, el parámetro de sólidos en suspensión, que es un valor crítico a la hora de infiltrar el agua en el terreno, por los problemas de colmatación que suponen, tiene unos valores excepcionalmente bajos e ideales para una instalación de recarga artificial.

Si bien los estudios previos para la realización de una instalación de recarga artificial, deben contemplar el seguimiento de la analítica de las aguas de partida en sus diferentes circunstancias (tanto régimen de avenida como los diversos caudales del régimen laminar), tanto los valores obtenidos en este análisis en régimen laminar como el conocimiento de los materiales sobre los que se ubican las cuencas de dichos cauces, hace suponer que excepto en las puntas de avenida, los valores de los parámetros no deben variar mucho de los reflejados.

No obstante lo anterior, cabe suponer que las aguas del río Viar, que atraviesan en su último tramo del curso el afloramiento de conglomerados, areniscas y lutitas del

Pérmico, tengan características fisico-químicas ligeramente diferentes y principalmente una mayor concentración de sólidos en suspensión que habría que estudiar con detalle.

Respecto a los parámetros bacteriológicos, si bien no se dispone de información, se puede deducir de forma aproximada que los bajos valores de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) hacen pensar que es difícil la contaminación bacteriana. En cualquier caso, es una analítica previa imprescindible en la planificación de cualquier proyecto de recarga artificial.

9.3.- ESTUDIO DEL MEDIO ACUÍFERO: SELECCIÓN DE LAS ZONAS MÁS FAVORABLES.

Una vez comprobada la existencia de capacidad excedente en el acuífero, de agua excedente en los cauces próximos y que dicha agua cumple los requerimientos fisico-químicos y bacteriológicos de calidad, se plantea caracterizar los materiales del acuífero y seleccionar las zonas más adecuadas para la realización de una experiencia de recarga artificial.

En esta fase del estudio se conjugan diferentes objetivos parciales con un único interés final, conseguir incrementar los recursos de una parte determinada del acuífero para captación de las aguas subterráneas para abastecimiento.

Los diversos objetivos parciales o criterios de selección son los siguientes:

✓ Criterios de selección hidrogeológicos:

- Zona de recarga del acuífero, con mayor espesor de zona no saturada.- Del análisis de las columnas de los sondeos mecánicos se pone de manifiesto en primer lugar la heterogeneidad de la distribución de los espesores del acuífero, en segundo lugar la existencia de determinadas zonas de mayor espesor, como las zonas de afloramiento, la zona entre Esquivel y Villaverde del Río y la zona al este del arroyo Trujillo. De entre estas zonas con mayor espesor, el análisis de la piezometría concluye que la zona con mayor espesor no saturado está al oeste de Cantillana, por lo que la zona seleccionada siguiendo este criterio será la que se encuentra entre Esquivel y Villaverde del Río. Debe mencionarse, no obstante que el tramo entre Villaverde del Río y Cantillana, tiene muy poca información, si bien es de esperar que al menos en la zona de afloramiento y sus proximidades los espesores sean aceptables. Los valores de la porosidad del

acuífero se han estimado de forma global para toda la unidad a partir de unos ensayos puntuales, pero se desconoce una distribución de este valor para afinar en el cálculo del almacén disponible en cada zona concreta, por lo que para un mismo valor de la porosidad, habrá más almacén donde halla más espesor de zona no saturada del acuífero.

- Zonas de infiltración favorable.- Dentro de las zonas seleccionadas deben seguirse unos criterios geomorfológicos como las pendientes suaves, desarrollo de vegetación, suelos no compactados ni cementados, zonas fracturadas, para facilitar la infiltración, pero esta elección estará directamente vinculada con el método de recarga seleccionado.
 - Controles laterales de la recarga.- Este criterio pretende determinar los parámetros del flujo del agua en el acuífero para conocer la dirección y la velocidad que tomará el agua recargada, al objeto descartar determinados emplazamientos por el riesgo de que el agua recargada vuelva a los cauces o a zonas de demanda elevada de riego, por ejemplo. Este criterio debe analizarse conjuntamente con la posible ubicación de las obras de captación de los caudales recargados.
- ✓ Criterios de selección técnico-económicos:
- Disponibilidad de terrenos públicos.- Se requiere realizar un inventario de los terrenos públicos de la zona de estudio como zonas preferentes. Este criterio también está relacionado directamente con el método de recarga que se seleccione.
 - Aprovechamiento de la infraestructura existente (Canal del Viar, conducción EMASESA).- Entre las infraestructuras existentes en la zona destacan el canal del Viar para riegos y la conducción de abastecimiento de EMASESA desde Alcalá del Río hasta El Viar del Caudillo de diámetro 100 mm, así como la conducción del Consorcio del Huesna desde Villanueva del Río hasta Villaverde del Río y como conducción futura de próxima construcción, debe mencionarse la unión entre el Gergal y el futuro pantano de Melonares, para abastecimiento, con una tubería de diámetro 2.000 mm. Todas las canalizaciones mencionadas, atraviesan la zona de estudio próximas a la carretera Alcalá-Cantillana- Villanueva del Río.

- Dificultades técnicas para la toma de agua de los cauces debido a la topografía desfavorable de los mismos.- Es fundamental conocer las posibilidades de captación de los caudales excedentes de los cauces superficiales para lo que debe analizarse, para cada cauce, cuáles son los métodos de captación más factibles sin un gran desembolso económico y adaptados a las características de topografía y distribución de avenidas de la zona en que vaya a construirse la toma. En esta fase del proyecto no se pretende alcanzar el grado de definición que requiere esta instalación ni plantear los estudios previos para llevar a cabo la misma, aunque a modo de orientación, la instalación de toma y transporte podría consistir en un azud de derivación y una conducción por gravedad hasta la instalación de recarga. Dependerá de cada cauce la ubicación necesaria de la instalación de toma, para alcanzar la cota de toma suficiente, que facilite el transporte por gravedad del agua desviada hasta la instalación de recarga.

9.4.- MÉTODO DE RECARGA

Para la elección del método de recarga artificial, es necesario conocer tanto la capacidad de infiltración del terreno para los métodos de superficie como la permeabilidad horizontal o en su caso el coeficiente de almacenamiento para los métodos de inyección profunda.

Básicamente, las ventajas e inconvenientes de cada sistema dependen de la disponibilidad de terrenos y un menor coste de inversión por m³ para las balsas o una menor necesidad de espacio pero un mayor coste de inversión por m³ para la inyección. No obstante lo anterior, las propuestas que se hacen son de un modo general, ya que para la determinación exacta del método se necesitaría conocer además, el sentido del flujo y el tiempo de residencia del agua a recargar, que permitiera elegir o compartir una recarga superficial en la zona de afloramiento o/y una recarga mediante inyección en la zona de acuífero confinado, pero retirado de las salidas naturales del mismo.

En la bibliografía se recogen algunos datos orientativos a cerca de la capacidad de infiltración de los materiales similares a los del Mioceno de Base en su zona de afloramiento, en general arenas y arenas limosas, y oscilan entre 0,6 m/día y 1 m/día, por lo que la superficie necesaria para recargar 100.000 m³/día, sería de 10 ha, en las

cuales se pueden recargar, hasta 100.000 m³/día durante 30 días (periodo máximo estimado de grandes aportaciones), que suman un total de 3 hm³/año, y de hasta 0,015 hm³/año durante otros 30 días (periodo máximo de aportaciones aprovechables), que suma un total de 0,45 hm³/año.

Existe, otro método de recarga que podría emplearse en este acuífero, y que de hecho se está ensayando para ser utilizado en la explotación minera de Las Cruces, en Gerena, para recargar mediante un anillo de inyección el agua previamente drenada por otro anillo interno de drenaje en las proximidades de la mina.

Los valores que se están ensayando en la actualidad permiten la inyección de caudales de hasta 11 l/s con una presión superior a 7 bares, según información de Cobre Las Cruces, S.A..

Evidentemente, las posibilidades de una instalación de recarga por inyección en nuestra zona de estudio, habría que determinarlas con mayor detalle, puesto que ni el espesor del acuífero, ni la carga, ni el coeficiente de almacenamiento serán coincidentes con los de la zona de la mina. No obstante, de forma aproximada, con los parámetros obtenidos en los pozos de inyección de la mina, se puede estimar que el caudal diario a recargar por pozo sería de 1.000 m³/día, siendo necesaria la construcción de más de 100 sondeos para aprovechar los caudales disponibles durante un mes.

La presencia de caudales disponibles en tan solo 60 días al año hace que el recurso económico sea condicionante en la elección del método.

Aún así, habría que considerar también dos opciones adicionales que incrementarían la disponibilidad de caudales y al tiempo, el uso de las instalaciones. Estas opciones serían las siguientes:

- Uso de los excedentes del canal de riego del Viar así como utilización de este canal para toma de agua en inviernos excedentarios cuando no está en funcionamiento, tanto para la recarga en superficie como para la recarga en profundidad.
- Uso de los excedentes del Parroso y la Rivera del Huézna para recargar mediante inyección en el entorno de las zonas de extracción que se seleccionen.

En todo caso, sería necesario plantear la instalación de una planta piloto a título de experiencia, con el fin de definir con más exactitud los parámetros y datos a considerar en una planta de explotación industrial.

10.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1.- CONCLUSIONES

El presente proyecto nace con la pretensión de poner de manifiesto la existencia de caudales de agua subterránea aprovechables para el sistema de emergencia del abastecimiento de la ciudad de Sevilla y su área metropolitana, en el tramo del acuífero Mioceno de Base (Niebla-Posadas) situado al norte de la ciudad.

Del área inicialmente seleccionada por proximidad, entre Guillena y Villanueva del Río y Minas (Riviera de Huelva y Riviera del Huesna), el estudio se ha centrado más en el tramo entre Burguillos y Villanueva del Río y Minas ya que en el sector Guillena-Burguillos se concentran un gran número de explotaciones que provocan que la demanda en el mismo cree problemas locales de sobreexplotación, según se deduce de los datos obtenidos en el uso del agua y la evolución de la piezometría en la zona.

El trabajo ha partido de una actualización de la geología y la estructura de la zona de estudio incluyendo el apoyo de imágenes de satélite analizadas específicamente para la definición de líneas estructurales principales y secundarias, de cara a delimitar las zonas objeto de la posterior campaña geofísica de sondeos eléctricos verticales, así como encontrar zonas preferentes de alimentación que puedan indicar áreas favorables para la ubicación de obras de captación.

Este análisis permite definir la localización de las principales discontinuidades del área de estudio, y que, en líneas generales coinciden con la dirección característica de la orogenia hercínica N110E, así como con la dirección N60E, también de origen hercínico y que origina la Depresión del Guadalquivir.

La correlación de la disposición de los lineamientos principales con los datos de litologías aflorantes en el paleozoico y con los datos de las columnas litológicas de los sondeos inventariados, detecta unas zonas de interés preferente hacia las que se encaminan las investigaciones posteriores de geofísica y sondeos mecánicos. Estas zonas son:

- Triángulo Alcalá del Río-Burguillos-Villaverde del Río: Este sector se caracteriza estructuralmente por presentar varios lineamientos principales (al menos dos) coincidentes generalmente con cauces actuales, en dirección N120E con continuidad nítida en el zócalo aguas arribas y varios lineamientos secundarios de similares características, y geológicamente por disponer de un zócalo bajo el Mioceno que es continuación del afloramiento

granítico situado al NW de esta zona, de gran extensión y capacidad de recarga por alteración y fracturación.

- Tramo Villaverde del Río-Cantillana: Estructuralmente no presenta indicios de conexión por lineamientos con el Paleozóico situado al norte y geológicamente cuenta con un substrato bajo el Mioceno compuesto por materiales metamórficos y diabasas cuyos afloramientos al norte presentan pocas posibilidades de recarga debido a su baja permeabilidad.
- Tramo Cantillana-Villanueva del Río y Minas: Este sector se caracteriza estructuralmente por estar comprendido entre las dos fallas que delimitan la cuenca del río Viar y por sufrir un hundimiento diferencial hacia el sur formando la cubeta de Villanueva del Río. Este hecho condiciona grandemente el funcionamiento del acuífero Mioceno pudiendo suponer una desconexión lateral del mismo. Geológicamente se caracteriza el sector por disponer de la mayor superficie de afloramiento de la formación Mioceno de Base en el área de estudio, así como la menor superficie de afloramiento de las margas. Los materiales del substrato proceden de la cuenca del Viar, de origen Pérmico y baja permeabilidad.

Con esta información se diseñó una campaña de investigación geofísica mediante 35 sondeos eléctricos verticales que permitió definir más en profundidad los sectores anteriormente descritos por los estudios geológicos y cuyas conclusiones son las siguientes:

- Se diferencian dos áreas por su respuesta al método geofísico empleado, y la línea divisoria de las dos áreas es la falla oeste de la cuenca del Viar, junto al cauce actual del río en Cantillana.
- Zona al oeste de Cantillana: Se caracteriza por un comportamiento homogéneo en el que se aprecia un hundimiento progresivo del zócalo de norte a sur y transversalmente se distinguen zonas de hundimiento del zócalo que confirman los fenómenos estructurales de superficie, principalmente el tramo entre el arroyo Mudapelos y Villaverde del Río, que se seleccionará por esto para la realización de parte de la campaña de sondeos mecánicos.
- Zona al este de Cantillana: se caracteriza por una respuesta heterogénea que es necesario disponer de más información para descifrar. En este tramo se aprecia un hundimiento mucho más pronunciado que el del tramo oeste de Cantillana, que se asemeja al general de la cuenca. Esto hace pensar la

formación de una cubeta, si bien las dimensiones reales de la misma se ven distorsionada en la información geofísica y se reducen con los datos de sondeos mecánicos debido al efecto del agua salada en la respuesta eléctrica de los materiales. En esta zona se han seleccionado dos emplazamientos para realizar sondeos mecánicos procurando captar la zona de hundimiento próxima a Cantillana y la continuación del lineamiento del arroyo Trujillo.

Paralelamente a estas actividades se ha realizado un balance de la unidad con estimación de las extracciones por zonas y un estudio de caracterización de la calidad de las aguas por zonas.

De los datos de este estudio se deduce la presencia de aguas saladas en la parte confinada del acuífero al sur del Guadalquivir aumentando también en dirección al este. De forma general los sondeos con aguas saladas estaban al sur del canal del Bajo Guadalquivir, si bien entre Cantillana y Villanueva del Río hay constancia de aguas con alta salinidad junto al arroyo Trujillo en la carretera Cantillana-Vva desde 1982. En la actualidad han quedado abandonados muchos sondeos entre el canal y la vía del AVE por salinización creciente, fenómeno que puede comprobarse con la evolución de las facies químicas de las aguas subterráneas hacia cloruradas sódicas, en los puntos situados más al sur del área de estudio.

Se justifica la ubicación de los sondeos mecánicos de investigación a realizar próximo a Cantillana para comprobar la calidad de las aguas en ese sector así como los parámetros hidráulicos del acuífero en esos puntos.

La campaña de sondeos mecánicos consistió en la realización de 5 sondeos de investigación a rotoperusión y diámetro de 220 mm, de los cuales dos han quedado entubados en PVC de 125 mm.

Se situaron dos sondeos en el entorno del lineamiento coincidente con el arroyo Mudapelo y otro al noreste de El Viar, dentro de la zona de hundimiento del zócalo determinada por la geofísica y los dos últimos se ubicaron al este de Cantillana y en la continuación del lineamiento del arroyo Trujillo en la margen izquierda del Guadalquivir.

Los sondeos mecánicos de la zona de EL Viar (S-1, S-2 y S-6) han cortado entre 30 m y 50 m de acuífero mioceno productivo y han puesto de manifiesto en el caso del S-2 la presencia de un substrato de granito y en el caso de S-1 y S-6 la presencia de materiales detríticos paleozoicos de relleno de cauces, aluviales o zonas de discontinuidad. Es decir se ha cortado una zona de probable falla que justifica los lineamientos perseguidos a lo

largo del proyecto y que a tenor de los caudales elevados (más de 30 l/s) que suministran los sondeos induce a pensar en una alimentación extra de los mismos y la comunicación del Mioceno de Base con los afloramientos del Paleozoico como fuente de recarga.

Los dos sondeos restantes confirmaron las hipótesis de hundimiento súbito del zócalo en la zona al este de Cantillana, si bien el S-5 no pudo atravesar todo el Mioceno, puso de manifiesto un paquete de margas de 80 m que no se corresponde con el talud general de la cuenca y además constató una salinización creciente en profundidad de 921-3410 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre los metros 110 (comienzo del acuífero Mioceno) y 125 (Fin del sondeo). El sondeo S-4 por su parte confirmó la presencia de la falla del arroyo Trujillo con un salto que implica el levantamiento del zócalo y la disminución del relleno, así como la presencia de aguas con un altísimo contenido en sales.

La datación realizada a esta agua así como los datos de contenido en Tritio tanto del agua de ste sondeo S-4 como los datos aportados por la empresa Cobre Las Cruces sobre un punto situado al sur de Gerena, ponen de manifiesto la relación entre conductividad y antigüedad de las aguas, concluyendo que las aguas saladas son mucho más antiguas que las de baja conductividad, consideradas recientes, y que el agua del sondeo S-4, considerada sin mezcla de aguas nuevas posee una antigüedad del orden de 6.500 años.

Por todo esto se concluye que la zona más favorable para la realización de sondeos de explotación es la situada entre las poblaciones de Alcalá del río, Burguillos y Villaverde y más concretamente en las inmediaciones del poblado de El Viar, siempre en las proximidades de lineamiento principales tales como el Arroyo Mudapelo.

10.2.- RECOMENDACIONES

A la vista de lo expuesto anteriormente, en el área más favorable se recomienda la realización de obras de explotación, siguiendo las prescripciones técnicas que aparecen en el Anexo VIII Proyecto de Ejecución de Sondeos, separadas un mínimo de 500 m y en un número de entre 5 y 8 unidades que aportarían unos caudales estimados de 50 l/s por obra de captación, lo que puede suponer un aporte a la red de emergencia del abastecimiento de la ciudad de Sevilla y su área metropolitana de más de 400 l/s.

Finalmente se ha realizado un estudio de viabilidad de la recarga artificial del acuífero con caudales excedentarios de los cauces superficiales que lo atraviesan en la zona de estudio.

Las estimaciones y cálculos realizados indican la presencia de zona no saturada en el acuífero susceptible de recargarse (debido a la explotación creciente desde la última sequía), citándose como zona más óptima la situada entre Esquivel y Villaverde del Río, así como la existencia de caudales aprovechables que sumarían 25,15 hm³/año para los cauces de El Parroso, R. Viar, Siete Arroyos y los arroyos entre Villaverde y Guillena, y que si descontamos las aportaciones de El Parroso basándonos en la hipótesis de lejanía de la posible zona de recarga quedaría en 17,95 hm³/año y eliminando los caudales de El Viar por el alto contenido en sólidos en suspensión o problemas de calidad quedaría en 5,35 hm³/año. La superficie teórica de una instalación que aproveche estos caudales, teniendo en cuenta las características de los materiales aflorantes, sería del tipo balsa de 15 ha de superficie.

No obstante, para completar este estudio de viabilidad, se debe considerar también la posibilidad de utilizar los excedentes de riego del canal de El Viar.

Para finalizar, y ante el interés que puede tener el aprovechamiento de los caudales excedentarios de las cuencas vertientes al Guadalquivir por su margen derecha en la zona próxima a Sevilla, se recomienda el diseño y realización de una/s experiencias de recarga artificial para mejorar el conocimiento de los parámetros de recarga del terreno y adquirir más y mejor información hidrológica, hidrogeológica, climática, etc.

11.- BIBLIOGRAFÍA

- García - Navarro, E, y Segura, S. (1998): Evolución tectónica del borde oriental de la Cuenca del Viar (Zona Sudportuguesa). *Rev. Soc. Geol. España*, 11 (3-4): 223-232.
- Sierra, S. y Moreno, C. (1998): Arquitectura fluvial de la cuenca pérmica del Viar (Sevilla, SO de España). *Rev. Soc. Geol. España*, 11 (3-4): 197-212).
- IGME (1987). Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España.
- IGME (1983). Plan de Acción Regional. Estudio hidrogeológico actualizado del sistema acuífero 26 "Mioceno de Base". Tramo Niebla - Posadas. Tomos I y II.
- DGOH (1994). Normas de explotación de las Unidades Hidrogeológicas. 05.49 Niebla - Posadas. Cuenca del Guadalquivir.
- IGME. Mapa Geológico de España. E:1:50.000. Hoja 962 Alcalá del Río.
- IGME. Mapa Geológico de España. E:1:50.000. Hoja 963 Lora del Río.
- IGME. Mapa Geológico de España. E:1:50.000. Hoja 941 Ventas Quemadas.
- IGME. Mapa Geológico de España. E:1:50.000. Hoja 940 Castilblanco de los Arroyos.
- IGME (1990). Documentos sobre la geología del subsuelo de España. Tomo I Introducción Guadalquivir-Golfo de Cádiz.
- DGOHCA (2000). Libro Blanco del Agua en España.
- DGPH (1991). Anuario 1990-91. Aforos 5 Cuenca del Guadalquivir.
- Plan Hidrológico del Guadalquivir (1995). BOE 28-08-95. Ministerio de Obras Públicas y Medio Ambiente. Dirección General de Obras Hidráulicas.
- R.D. 1138/90, de 14 de septiembre, por el que se aprueba la Reglamentación Técnica - Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público.
- DIRECTIVA 98/83/CE DEL CONSEJO, de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.
- DGOH (1991). AFOROS 5. Cuenca del Guadalquivir. Anuario 1990-91.
- Cobre Las Cruces, S.A. Diciembre 2000. Proyecto Las Cruces. Estudio Minero de Viabilidad. Estudio Hidrogeológico y Plan de Gestión del Agua. Vol. I y II.
- IGME (1988). Estudio de la viabilidad de la recarga del acuífero Mioceno en el entorno de Niebla (Huelva) con aguas del Río Tinto.
- IGME (1981). Estudio hidrogeológico para abastecimiento a la población de Cantillana (Sevilla). Ref. 125/1981.

- Cobre Las Cruces, S.A. (2000). Estudios de Base Ambiental.