



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

R
62357



JUNTA DE ANDALUCÍA
Consejería de Obras Públicas y Transportes

CONVENIO DE COLABORACIÓN CON LA
CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES
PARA EL DESARROLLO DEL PROGRAMA DE
ASISTENCIA EN
AGUAS SUBTERRÁNEAS
PARA ABASTECIMIENTOS

1996-2000

ACTIVIDAD Nº 15 PLAN DE INTEGRACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO PÚBLICO DE ANDALUCÍA. SECTOR DE ACUÍFEROS EN RELACIÓN CON EL ABASTECIMIENTO DE LOS NÚCLEOS SITUADOS EN LA CUENCA DEL GUADALFEO Y SECTORES COSTEROS ADYACENTES (ALMUÑECAR, ALBUÑOL Y CASTELL DE FERRO) GRANADA.

Documento 15.8.- Actualización del conocimiento hidrogeológico de la Unidad 06.20 Castell de Ferro.



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España



JUNTA DE ANDALUCÍA
Consejería de Obras Públicas y Transportes

ACTIVIDAD Nº 15 PLAN DE INTEGRACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO PÚBLICO DE ANDALUCÍA. SECTOR DE ACUÍFEROS EN RELACIÓN CON EL ABASTECIMIENTO DE LOS NÚCLEOS SITUADOS EN LA CUENCA DEL GUADALFEO Y SECTORES COSTEROS ADYACENTES (ALMUÑECAR, ALBUÑOL Y CASTELL DE FERRO) GRANADA.

Documento 15.8.- Actualización del conocimiento hidrogeológico de la Unidad 06.20 Castell de Ferro.



INFORME	Identificación: H.2 Plan de Integración (Convenio ITGE- Junta de Andalucía).
	Fecha: julio de 2000
TÍTULO Plan de integración de los recursos hídricos subterráneos en el abastecimiento urbano (actividades de convenio nº 3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,22,24 y 25) repartidas en 118 documentos de los Proyectos de Gracia y otros; Almadén y otros; y Guadalfeo y otros.	
PROYECTO CONVENIO JUNTA DE ANDALUCIA 1996-2000. Nº SICOAN (96.039).	
RESUMEN Constituyen trabajos de actualización del conocimiento de diferentes acuíferos situados en la Cuenca Alta del Guadalquivir y en la Cuenca Sur (sector occidental) que se corresponden con la mejora del conocimiento de su balance (entradas-salidas) y su funcionamiento hidráulico, inventario, propuesta y realización de obras de investigación, y explotación, mejora del conocimiento sobre la potencia, litología y geometría de acuíferos, actualización de la cartografía hidrogeológica, control en un periodo de funcionamiento hidrodinámico suficiente y continuo en el tiempo para los diferentes acuíferos; definición de posibilidades de regulación; actualización de información, hidroquímica, establecimiento de medidas de protección de calidad y cantidad del recurso subterráneo por sectores; definición de posibilidades de recarga artificial; apoyo al posible uso conjunto de agua superficial-subterránea, etc... * continuar al dorso en caso necesario	
Revisión Nombre: Juan Antonio López Geta Unidad: Aguas Subterráneas y Geotecnia Fecha:	Autores: ITGE (Juan Carlos Rubio, Antonio González, Tomás Peinado, Juan Antonio Luque, Rafael Ortega y diversas empresas. Responsable: Juan Antonio López Geta

ÍNDICE

	<u>Página</u>
1.- INTRODUCCIÓN	2
2.- ANTECEDENTES Y FUENTES DOCUMENTALES	4
3.- GEOLOGÍA	7
4.- HIDROLOGÍA	11
5.- HIDROGEOLOGÍA	16
- 5.1.- INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA	17
- 5.2.- CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	20
- 5.3.- PARÁMETROS HIDRÁULICOS	23
- 5.4.- BALANCE HIDRÁULICO	26
- 5.5.- EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA	32
- 5.6.- CALIDAD DEL AGUA	52
6.- ANÁLISIS PREVIO DEL FRENADO DE LA INTRUSIÓN MARINA ..	62
7.- BIBLIOGRAFÍA	73
ANEJOS	78
- 1.- Fichas de inventario de puntos de agua	
- 2.- Encuestas de cuantificación de bombeos	

1.- INTRODUCCIÓN

1.- INTRODUCCIÓN

El presente informe forma parte de los trabajos previstos en el Convenio de colaboración suscrito entre el ITGE y la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía y se enmarca dentro del Proyecto "MEJORA DEL CONOCIMIENTO HIDROGEOLOGICO DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA DEL GUADALFEO Y SECTORES ADYACENTES PARA LA INTEGRACIÓN DE SUS RECURSOS EN LOS ABASTECIMIENTOS PÚBLICOS. El proyecto se ha realizado bajo la supervisión de D. Juan Carlos Rubio Campos y D. Antonio González Ramón, por parte del ITGE. Por la empresa consultora Ingemisa ha intervenido D. Juan Miguel Hidalgo García, bajo la supervisión de D. Juan Hidalgo Ruiz.

2.- ANTECEDENTES Y FUENTES DOCUMENTALES

2.- ANTECEDENTES Y FUENTES DOCUMENTALES

El acuífero costero de Castell de Ferro es estudiado por primera vez en la tesis doctoral de J. Benavente (1982), junto con todos los acuíferos costeros de la provincia de Granada. Posteriormente, E. Terrón (1983), en su tesis de licenciatura, se centra solamente en este acuífero y realiza un estudio más detallado.

Los primeros datos sobre las características fisicoquímicas de las aguas subterráneas de Castell de Ferro fueron tomados en los años 1980, 1981 y 1982, y se recogen en los trabajos de Benavente et al. (1981), Benavente (1982) y Terrón (1983).

J. Benavente también tiene otros trabajos posteriores en esta zona, en 1985, 1987 y en 1988, este último junto a R. Fernandez-Rubio y C. Almecija Ruiz.

Otro autor que también ha estudiado el acuífero de Castell de Ferro ha sido M. L. Calvache. En 1991, en su tesis doctoral, realiza un ensayo de bombeo y ajusta un modelo matemático para el acuífero. Posteriormente, en 1993, junto a Pulido-Bosch, estudia las relaciones del acuífero con los afloramientos carbonatados.

De la tesis de licenciatura de P. Pulido (2000), se ha extraído también numerosa información actualizada sobre el acuífero.

Otra gran fuente de documentación son los trabajos que el ITGE ha realizado en la zona IGME (1985, 1987a, 1987b, 1987c, 1987d, 1987f, 1988a, 1988b, 1988c) e ITGE (1988, 1989a, 1989b, 1989c, 1989d, 1990, 1991a, 1991b, 1991c, 1992, 1996). Ha llevado a cabo controles de piezometría, de las explotaciones de las aguas subterráneas, de la calidad del agua, de la intrusión y de otros aspectos, en diferentes notas técnicas, desde 1985 hasta la actualidad.

3.- GEOLOGÍA

3.- GEOLOGÍA

El acuífero de Castell de Ferro está formado en su mayor parte por materiales aluviales, fundamentalmente arenas y gravas, con alternancias de arcillas y margas. Estos depósitos aluviales se extienden de norte a sur y tienen una longitud aproximada de 5 km y una anchura variable entre 200 y 700 m, con una superficie total de aproximadamente 3 km² (ITGE, 1992).

Además de estos materiales se pueden encontrar depósitos de piedemonte que forman conos de deyección, y que están relacionados con los relieves carbonatados del Manto de Murtas que afloran en las proximidades de Castell de Ferro. Existen también niveles de cantos cementados por carbonatos que quedan generalmente colgados sobre el actual cauce y que coinciden con antiguos lechos de rambla.

El substrato de los materiales detríticos del acuífero de Castell de Ferro está constituido fundamentalmente por materiales del Manto de Murtas, que pertenece al complejo Alpujárride. También aparecen algunos materiales del Manto de Adra al noreste de Castell de Ferro.

El Manto de Murtas está constituido en su base por cuarcitas y cuarzoesquistos con biotita (Paleozoico). Estos evolucionan gradualmente a techo en una alternancia de esquistos, cuarcitas y filitas (final del Paleozoico hasta el Triásico medio). Por último aparece un conjunto carbonatado constituido por mármoles calizos y dolomíticos (Triásico medio y superior).

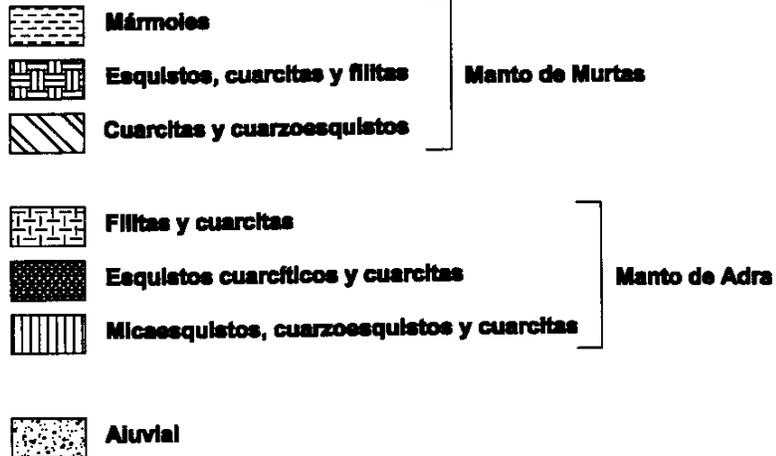
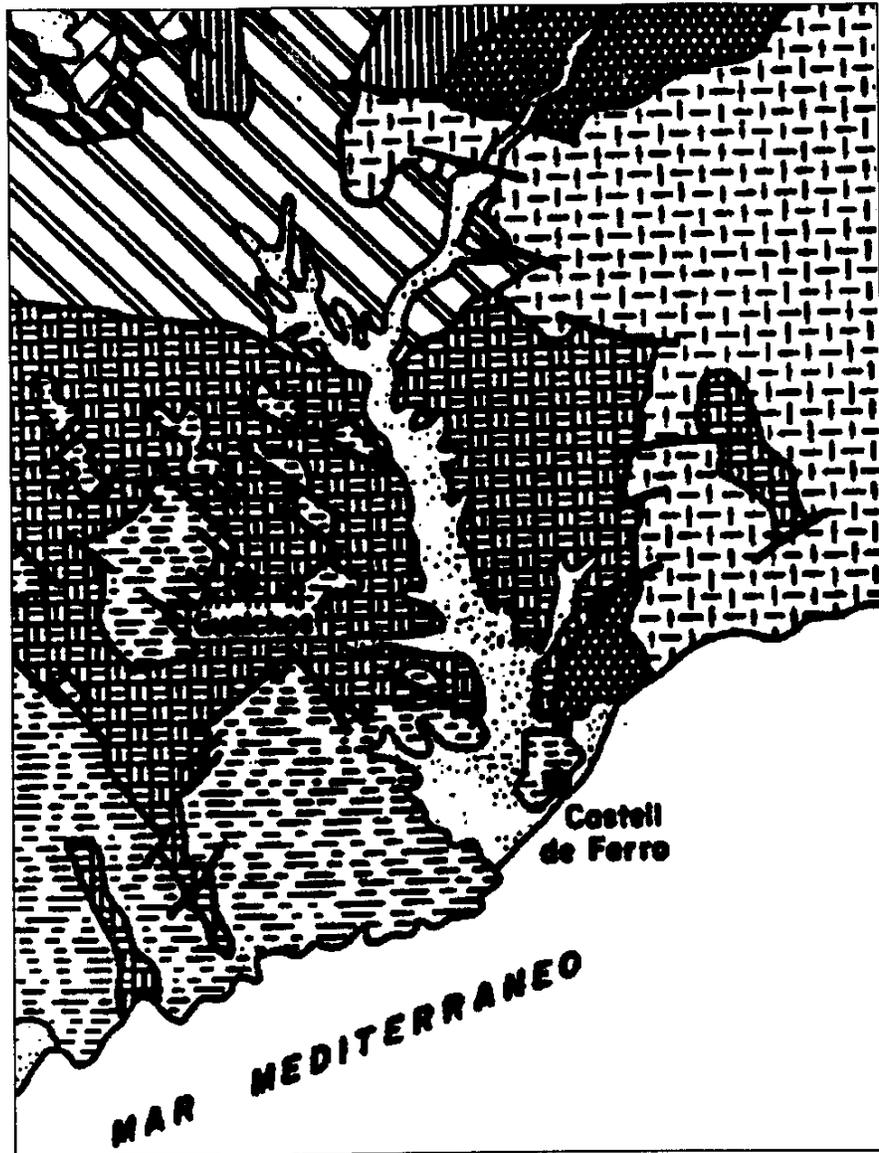
El Manto de Adra está formado de muro a techo, en primer lugar, por una alternancia de micaesquistos grafitosos, cuarzoesquistos y cuarcitas que evoluciona gradualmente a una formación de esquistos cuarcíticos y cuarcitas más o menos micáceas (Paleozoico). Finalmente, y de forma gradual aparece una alternancia de filitas (más abundantes) y cuarcitas más o menos micáceas y niveles de yeso primario (final del Paleozoico y Triásico inferior).

En la Figura 1-a se puede observar el entorno geológico del acuífero de Castell de Ferro.

Geología del sector costero del acuífero

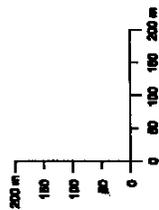
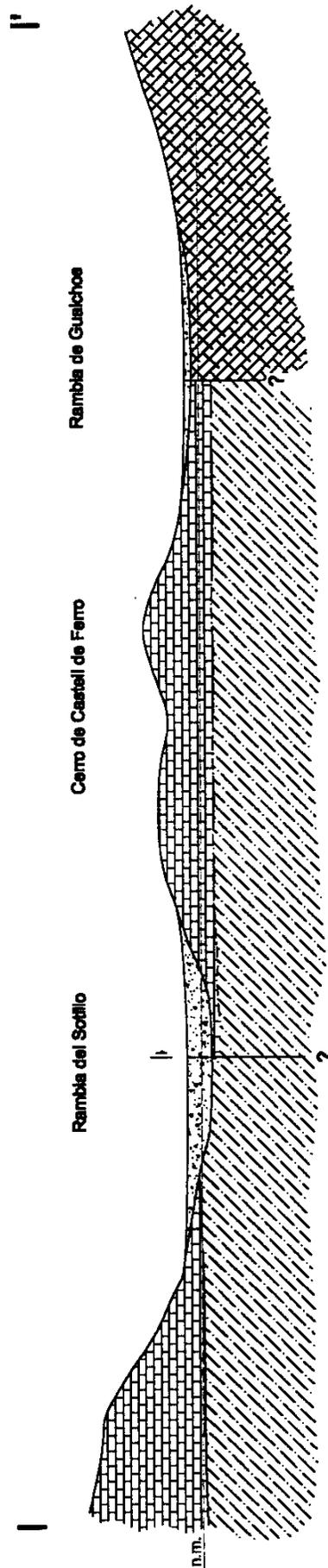
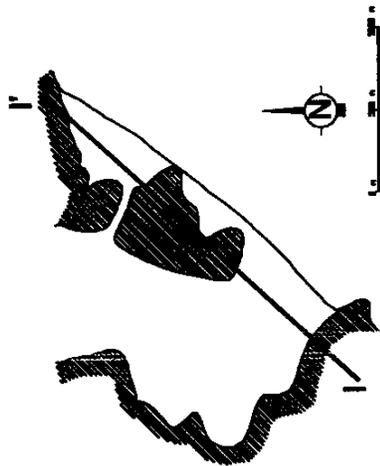
Hasta ahora, los autores que habían estudiado la relación entre los materiales carbonatados al oeste de Castell de Ferro y el aluvial, consideraban un espesor en profundidad de esos carbonatos muy superior al que realmente tienen. Sin embargo, si se tienen en cuenta los datos obtenidos por INGEMISA, en los sondeos realizados en 1995 para la mejora del abastecimiento a Castell de Ferro, se puede observar como el espesor real de los materiales carbonatados es mucho menor. En esos sondeos el contacto de los esquistos con las calizas se encuentra a la cota cero aproximadamente.

Aunque el contacto de los carbonatos con las metapelitas es irregular y está retocado por numerosas fracturas y fallas, en general se encuentra a profundidades iguales o superiores al nivel del mar. En la Figura 1-b hay representado un perfil del sector costero del acuífero de Castell de Ferro, donde se aprecia el pequeño espesor saturado que presentan las rocas carbonatadas. Además se puede observar como los materiales carbonatados a ambos lados de la rambla del Sotillo no están conectados en profundidad, si no que debe existir una falla que los separe para poder explicar la diferencia de espesor a un lado y otro de dicha rambla.



Esquema geológico
(Modificado de M. L. Calvache, 1991)

Figura 1-a



-  Formación carbonatada del manto de Murtas
-  Formación metapelítica del manto de Murtas
-  Formación metapelítica del manto de Adra
-  Materiales aluviales

Perfil del sector costero del acuífero de Castell de Ferro

Figura 1.h

4.- HIDROLOGÍA

4.- HIDROLOGÍA

A continuación se expone un resumen de la hidrología del acuífero y de su cuenca vertiente extraído a partir de los trabajos de E. Terrón (1983), del IGME y de P. Puiido (2000).

La escorrentía superficial, en la rambla de Gualchos, está estrechamente relacionada con la ocurrencia de precipitaciones intensas en los relieves montañosos situados al norte de la rambla. En verano, la escorrentía se realiza de manera subterránea a través de sus aluviones, lo que constituye un hecho extensible a las demás épocas, salvo en períodos precedidos de grandes lluvias que favorecen una escorrentía superficial.

Dos factores importantes que influyen en la torrencialidad de la cuenca y, por tanto, en la posibilidad de que esa agua recargue el acuífero, son las características de forma y el tipo de relieve que presenta la cuenca.

Morfología

La cuenca vertiente a las ramblas del Sotillo y de Gualchos, tiene forma alargada, en dirección N-S, con longitud máxima de 13 km y anchura que oscila entre 4 y 8,5 km. No obstante, en el conjunto de la cuenca, cabe hacer una diferenciación en dos subcuencas: área de cabecera (desde la línea de crestas de la Sierra de Lújar hasta Los Carlos) y tramo final (desde Los Carlos hasta la línea de costa), ambas de

forma más o menos circular, y cuya unión se efectúa en los Carlos. El valor del coeficiente de compacidad de Gravelius obtenido para la subcuenca inferior (ramblas de Gualchos y del Sotillo) es de 1.1.

La morfología de una cuenca está relacionada con la distribución temporal de la respuesta hidrológica. A igualdad de otros factores (litología, vegetación, tamaño, pendiente, usos del suelo y pluviometría), las cuencas redondeadas conducen las crecidas más rápidamente que aquellas alargadas y estrechas. Así, la evacuación de la precipitación se produce en un intervalo de tiempo menor, de forma que los caudales máximos son más elevados.

P. Pulido (2000), utiliza cuatro parámetros para caracterizar la forma de la cuenca. El primero de ellos es el índice de compacidad de Gravelius (1914), que se define como la relación entre el perímetro de la cuenca y el de un círculo que tuviera igual superficie. Es igual a 1 en las cuencas circulares y aumenta al aumentar el alargamiento de la cuenca. El radio de elongación (Schumm, 1956) es la relación entre el diámetro de un círculo que tenga la misma superficie que la cuenca y la longitud máxima de la cuenca. Toma el valor 1 en el círculo y disminuye al aumentar el alargamiento. El factor de forma (Horton 1932) es el cociente entre la superficie de la cuenca y el cuadrado de su longitud máxima. La razón de circularidad toma el mismo valor que el perímetro de la cuenca. Su valor es 1 para una cuenca circular y 0,785 para una cuenca alargada.

PARÁMETRO		VALOR
Área (km ²)	A	79,16
Perímetro (km)	P	39,60
Longitud (km)	L _b	13,72
Anchura (km)	B=A/ L _b	5,77
I. de compacidad	K _c =0.282(P/A ^{0.5})	0,73
Circularidad	R _c =4π(A/P ²)	0,63
Factor de forma	R _f =A/ L _b ²	0,42

Todos estos valores indican que la cuenca vertiente objeto de este estudio es bastante redondeada y que los fenómenos torrenciales pueden alcanzar una gran importancia.

Relieve

El otro factor que influye en la torrencialidad de la cuenca es el tipo de relieve que presenta la cuenca. Para caracterizar el relieve, P. Pulido (2000) realiza la curva hipsométrica, que relaciona la elevación y la superficie de la cuenca. La forma de la curva hipsométrica porcentual y los valores de la integral hipsométrica y la integral erosiva son propios de una cuenca en estado de envejecimiento, con un coeficiente hipsométrico (S_1/S_2) superior a 1.

Integral hipsométrica (%)	31,49
Integral erosiva (%)	68,51
Coefficiente hipsométrico	2,17

Esto está en clara contradicción con los datos de neotectónica, que evidencian un estado juvenil en toda la cordillera. Esta divergencia se debe a que el ciclo erosivo no se inició inmediatamente después del ciclo deposicional, por lo que existe un relieve original controlado por la estructura de los materiales, de forma que la integral erosiva está sobredimensionada.

La cuenca vertiente a la rambla de Gualchos acusa en su cabecera, sector de la Sierra de Lújar, relieves con altitudes cercanas a 1900 m. La cuenca presenta una distribución unimodal de cotas, con un máximo en el intervalo 300-400 m s.n.m., que no parece responder a ninguna superficie estructural ni a una superficie de aplanamiento, ya que los materiales de relleno del aluvial no superan la cota 200 y los otros materiales no están dispuestos horizontalmente. En torno al intervalo 1100-1200 m s.n.m. se detecta un pequeño escarpe que corresponde al contacto de las calizas del manto de Lújar con las metapelitas del manto de Escalate. La altitud media es de 550 m.

En un perfil longitudinal del cauce se observan dos tramos muy bien diferenciados, el sector de cabecera, que tiene una pendiente muy pronunciada, y el sector más cercano a la desembocadura, cuya pendiente se reduce progresivamente. Entre los dos se aprecia la existencia de un pequeño tramo ligeramente convexo, que corresponde al contacto entre las metapelitas que afloran en el tramo de menor pendiente y los carbonatos del manto de Lújar que ocupan el tramo de cabecera. La elevada competencia de estos últimos materiales explica la pendiente tan pronunciada (P. Pulido, 2000).

Pendiente media (%)	9,20
Pendiente sector de cabecera (%)	33,30
Pendiente sector aguas abajo (%)	5,80

Red de drenaje

La red de drenaje de la zona sur de la cuenca de las ramblas del Sotillo y de Gualchos es de tipo dendrítico. Se observan ciertos puntos de red dendrítica angular, así como un trazado más o menos paralelo de los cauces principales (más patente en el sector occidental de la cuenca), lo cual indica cierto control estructural de las directrices principales.

La red que aparece ligada a los materiales calizo-dolomíticos tiene densidad notablemente menor que en los materiales esquistosos y filíticos, tiende a ser de tipo dendrítico paralelo, subparalelo y angular, con espacio amplio entre ramas principales, y fino en las barrancadas tributarias de tercer orden, que confluyen bajo ángulo agudo, controladas fundamentalmente por los grandes accidentes tectónicos.

La combinación de estos dos tipos de modelado, angular y dendrítico, está ligada a la diferente competencia entre los afloramientos de rocas carbonatadas y los materiales metapelíticos impermeables fácilmente alterables y erosionables, y al control que ejerce la tectónica sobre éstos.

En el Plan Hidrológico Nacional se calcularon las aportaciones naturales de la cuenca. La metodología para el cálculo consistió en establecer en las cuencas con datos de aforo pares de valores de precipitación-aportación específica, al conjunto de los cuales se ajusta una función de trasposición, que a su vez permite la estimación de aportaciones en las cuencas sin datos, como es el caso de la cuenca que se está estudiando. Este sistema, sin embargo, no recoge las distorsiones causadas por la presencia de aguas subterráneas.

Las aportaciones medias obtenidas para la cuenca de la rambla de Gualchos y del Sotillo por este método, es de 4,7 hm³/año (57 mm/año). Para el coeficiente de escorrentía se calculó un valor del 11% para el período medio de 1946-63.

5.- HIDROGEOLOGÍA

5.1.- INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

El primer inventario de puntos de agua en el acuífero lo llevó a cabo el IGME entre los años 1974 y 1977, con 37 puntos. Posteriormente en 1984 se actualizó, incorporándose 7 nuevas captaciones, sumando un total de 44 puntos inventariados. La Comisaria de Aguas del Sur de España (CASE), ese mismo año, realizó nueve sondeos piezométricos.

En Agosto de 1998 P. Pulido realiza un nuevo inventario de puntos que completa posteriormente con el inventario del ITGE. Incluye varios pozos y sondeos que en la actualidad han dejado de explotarse, pero que tienen un interés histórico, al reflejar su abandono el avance de la intrusión marina. Localiza en total 67 puntos de agua. Estos se dividen en 36 pozos, 28 sondeos, de los que 13 son piezómetros, y 3 manantiales, dos de los cuales aún funcionan ocasionalmente al estar asociados a niveles acuíferos colgados.

A los 7 nuevos puntos del inventario de P. Pulido (2000) hay que añadir el sondeo realizado para la Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir por INGEMISA en 1995, para la mejora del abastecimiento de Castell de Ferro.

Todos estos puntos, un total de 68, se pueden resumir en los siguientes:

44 puntos del inventario del ITGE
9 piezómetros de la CASE
4 sondeos del G.I. "Recursos Hídricos y geología Ambiental" (1998)
3 manantiales
7 puntos nuevos inventariados por P. Pulido (1998)
1 sondeo realizado por INGEMISA (1995)

En la Figura 2 puede observarse el inventario de puntos de agua actualizado. Los 8 nuevos puntos del inventario son 2044-6-87, 88, 89, 90, 91, 92, 2044-2-23, 24.

Las explotaciones se concentran en la Vega de Castell. La mayoría de los sondeos y pozos existentes captan el aluvial, pero también existen captaciones en los mármoles al Oeste del barrio del Romeral e incluso se explota algún nivel de cuarcitas en las cercanías de Los Carlos. Existen también varios pozos-noria cercanos a la playa del Sotillo, que dejaron de explotarse al empeorar la calidad de las aguas por el avance de la intrusión marina.

En cuanto a la profundidad de las captaciones, varía en función de los caudales a extraer, entre 5 y 45 m para los pozos, y 40 a 72 m para los sondeos, siendo la profundidad media de los pozos de 18 m, 64 m la de los sondeos y 29 la profundidad media conjunta.

La profundidad del nivel piezométrico desde la superficie varía en función de la topografía y de su proximidad a la costa entre 4 y 50 m, siendo la profundidad media de unos 21 m.

En cuanto al uso del agua, 37 se emplean para regadío, 8 para abastecimiento urbano, 1 para ambos fines y los restantes no se explotan en la actualidad.

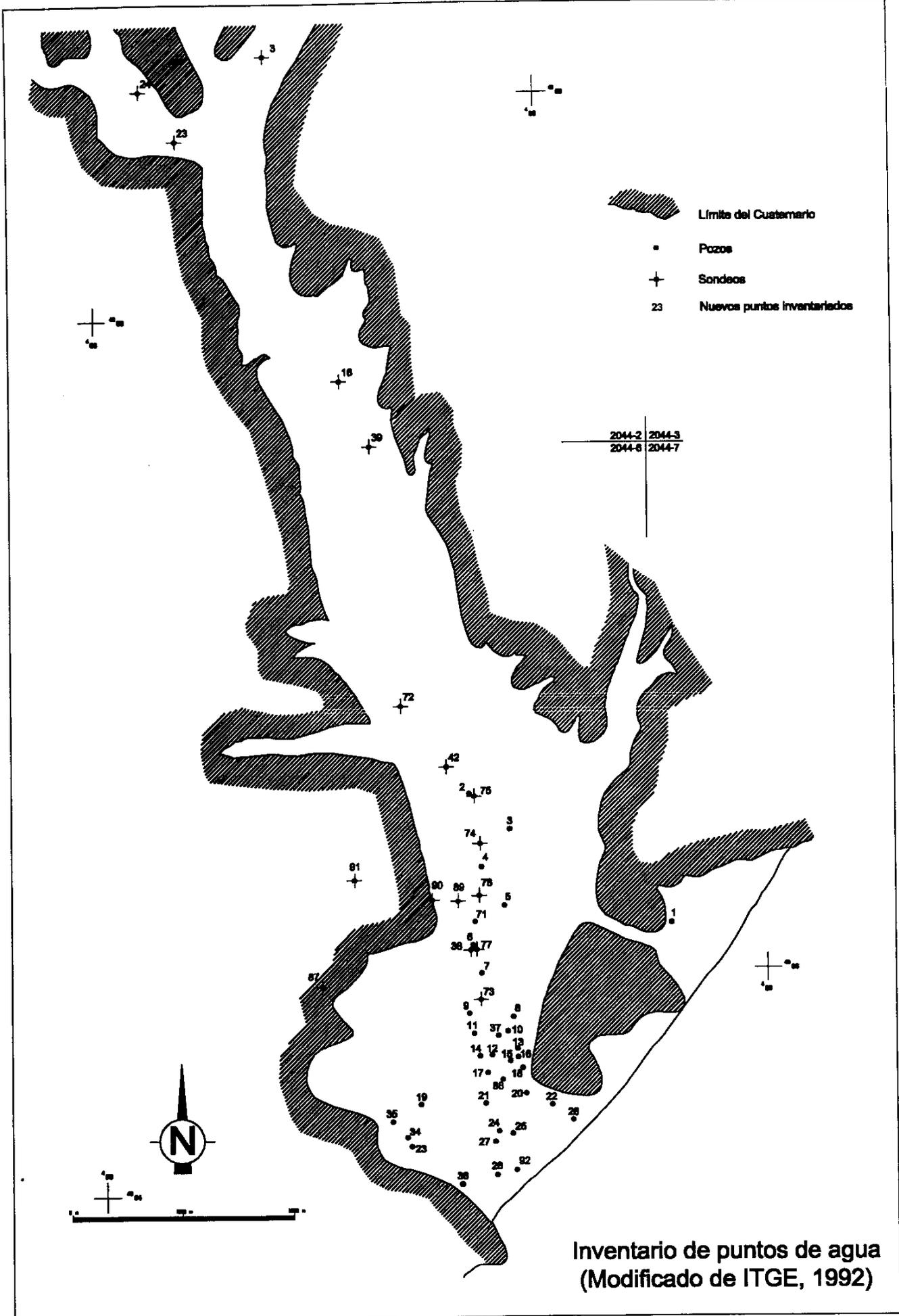


Figura 2

5.2.- CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

El acuífero de Castell de Ferro, constituido por materiales aluviales principalmente, se extiende de norte a sur y tienen una longitud aproximada de 5 Km y una anchura variable entre 200 y 700 m, con una superficie total de aproximadamente 3 km² (ITGE, 1992).

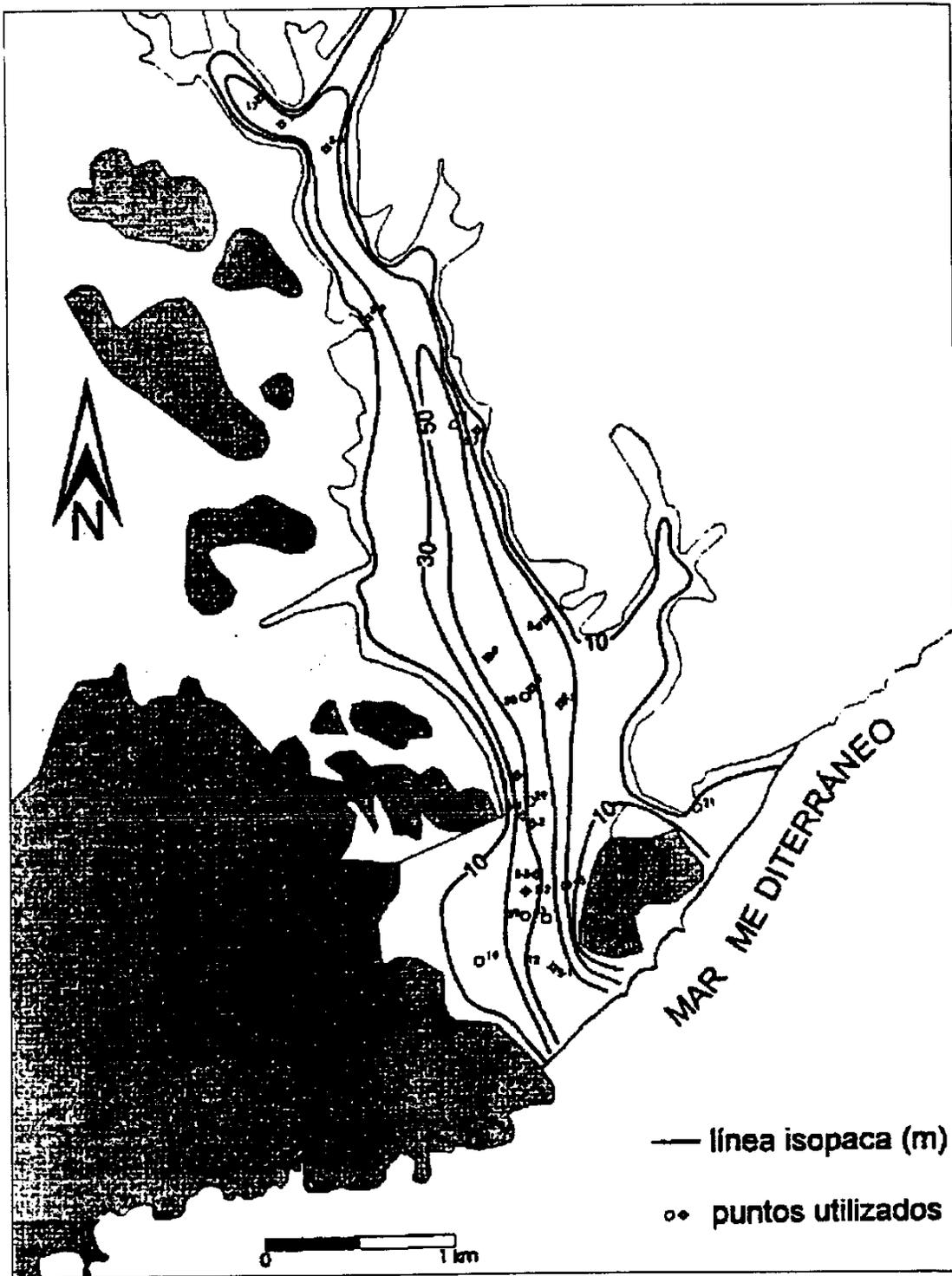
A partir de la confluencia de las ramblas del Hornillo y de Rubite, aguas abajo del núcleo de los Carlos, el cauce pasa a denominarse rambla de los Gualchos, que es donde se puede considerar que empieza el acuífero. En la parte del acuífero más próxima al mar el drenaje superficial se divide en dos ramblas, la de los Gualchos, que se desvía hacia el este al llegar al cerro de Castell, y la rambla Ancha, que nace a unos 2 km del mar y pasa al oeste del cerro.

Los materiales aluviales comienzan a tener cierta entidad a partir de la confluencia de las ramblas del Hornillo y de Rubite. En ese punto el espesor del acuífero supera los 40 m. A algo más de un kilómetro de la costa se encuentra el máximo espesor detectado hasta la fecha, con más de 60 m, en el entorno de la confluencia del cauce de la rambla Ancha y la de los Gualchos (Terrón, 1983). El mayor espesor del acuífero se encuentra en una franja elongada en dirección norte-sur, que sigue un trazado similar al de la rambla de los Gualchos en la zona septentrional, hasta el cerro de Castell, donde se desvía de la rambla para pasar al oeste del cerro por la rambla del Sotillo (P. Pulido 2000). Lateralmente el espesor de los materiales decrece rápidamente hacia los bordes, lo que le confiere una marcada

morfología en “v” al acuífero. En el mapa de isopacas de la Figura 3 se puede apreciar la distribución de espesores en el acuífero.

El acuífero aluvial limita al sur con el mar, mientras que el resto del acuífero está en contacto con materiales metapelíticos, salvo en la zona costera, donde aparece limitado al oeste por materiales carbonatados (mármoles calizos y dolomíticos muy karstificados) y al este con afloramientos del Manto de Adra (Figura 1, situación geológica).

Para poder evaluar los recursos hídricos del área y para conocer otros aspectos del acuífero en estudio, es necesario estudiar también la cuenca vertiente a las ramblas Ancha y de los Gualchos. Esta cuenca tiene forma alargada, en dirección norte-sur, con una longitud máxima de 13 km y anchura que oscila entre 4 y 8,5 km. Se puede dividir a su vez en dos subcuencas, un área de cabecera (desde la línea de crestas de la sierra de Lújar hasta Los Carlos, con unos 54 km²) y un tramo final (desde Los Carlos hasta la línea de costa, con 25 km² aproximadamente), con una forma más o menos circular en los dos casos, y cuya unión se efectúa en Los Carlos.



Mapa de Isopacas
(P. Pulido, 2000)

5.3.- PARÁMETROS HIDRÁULICOS

En el acuífero de Castell de Ferro se han realizado numerosos ensayos de bombeo que han permitido conocer datos sobre sus parámetros hidráulicos.

Los primeros datos que existen provienen de un ensayo de bombeo realizado en 1973 por el Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) en el sondeo de abastecimiento a Castell de Ferro, situado en el sector central de la rambla del Sotillo. Se obtuvieron valores de transmisividad (T) de 4300 m²/día, y caudales específicos de 61 l/s/m para 25 l/s de bombeo y 56 l/s/m para 40 l/s con descensos de 0,41 y 0,71 metros respectivamente (ITGE, 1992).

E. Terrón en 1983 realizó una serie de pruebas de muy corta duración, de aproximadamente una hora, obteniendo valores de transmisividad comprendidos entre 50 y 500 m²/día. Posteriormente, la Comisaria de Aguas del Sur de España (CASE) realizó ensayos de una duración similar dando unos valores de transmisividad comprendidos entre 500 y 2500 m²/día. En ambos casos, los ensayos se realizaron en pozos excavados con poca penetración bajo el nivel piezométrico, por lo que los datos no se pueden considerar muy representativos, al poder estar la transmisividad subestimada.

En 1991 M.L. Calvache realizó un ensayo de bombeo en el sondeo de abastecimiento a Castell de Ferro (propiedad del ayuntamiento). Se llevó a cabo con un caudal de bombeo de 12 l/s, y se tomaron medidas, además de en propio sondeo, en el piezómetro S-4 de la CASE. Se obtuvieron valores de transmisividad de 3800

m²/día y un coeficiente de almacenamiento del 6%. Al ser el espesor saturado de 26,6 m, durante el ensayo, el valor de la permeabilidad (K) obtenida fue de 143 m/día.

Posteriormente, también M.L. Calvache, ajustó un modelo matemático de flujo para el acuífero, resultando valores de transmisividad que oscilan entre 300 y 10000 m²/día para el aluvial. Los valores más elevados se sitúan en el sector central de la rambla del Sotillo, cerca de la costa, y los más bajos en los bordes y en la zona norte del acuífero. El coeficiente de almacenamiento también alcanza sus valores más altos en el sector central del acuífero (10%) y disminuye hacia las zonas de borde próximas a los materiales metapelíticos impermeables (0,1%). La transmisividad de los mármoles del manto de Murtas, tanto en el Cerro del Águila como en el Cerro de Castell de Ferrc, tiene como valores más representativos unos 30000 m²/día.

En 1995, la consultora INGEMISA, a petición del MOPTMA, realiza un ensayo de bombeo en un sondeo situado en la finca "El Zacatin" del Paraje Cala Rijana (Castell de Ferro). El sondeo se sitúa sobre materiales metapelíticos y atraviesa esquistos muy alterados y diversos niveles de cuarcitas intercalados. El ensayo de bombeo tubo una duración de 72 horas, con un caudal de bombeo de 15 l/s, tras un escalón previo de 2 horas de duración realizado a un caudal de 7,2 l/s. Durante el bombeo, y tras 2040 minutos y un nivel de 60 m, el caudal fue rebajado en varias ocasiones hasta un valor mínimo de 3,5 l/s. Los valores de transmisividad obtenidos son del orden de 13 m²/día o probablemente inferiores. Estos valores nos indican que los sondeos en los materiales metapelíticos tienen muy bajos caudales de explotación (del orden de unos pocos l/s) y que existe una zona de acumulación de agua, ligada a la alteración de los esquistos y cuarcitas (flujo subsuperficial), que permite inicialmente extracciones importantes, pero que agotados esos recursos acumulados, la capacidad de suministro de agua se ve reducida a unos pocos l/s.

En la Figura 4 se puede ver un cuadro resumen de los parámetros hidráulicos del acuífero de la rambla de Gualchos.

RESUMEN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL ACUÍFERO DE LA RAMBLA DE GUALCHOS

AUTOR	SITUACIÓN	MATERIALES ATRAVESADOS	CAUDAL DE BOMBEO (l/s)	TIEMPO DE BOMBEO	TRANSMISIVIDAD (m ² /día)	OTROS DATOS
SGOP (1973)	Sector central de la rambla del Sotillo (Punto ITGE 2044-6-038)	Aluvial	25 - 40	10 h - 14 h	4300	
E. Terrón (1983)		Aluvial	2,3 - 12	1 h	50 - 500	
CASE	Sondeos piezométricos de la CASE	Aluvial	-	-	500 - 2500	
M.L. Calvache (1991)	Sondeo de abastecimiento a Castell de Ferro	Aluvial	12	-	3800	K = 143 m/día Coef. de alm. = 6%
M.L. Calvache (1991)	Modelo matemático	Aluvial	-	-	300 - 10000	Coef. de alm. = 0,1 - 10%
		Carbonatos	-	-	30000	
INGEMISA (1995)	Finca "El Zacatín" paraje de Cala Rijana	Metapelitas	3,5 - 15	72 h	13	

Figura 4

5.4.- BALANCE HIDRÁULICO

La realización de un balance del acuífero de Castell de Ferro presenta una cierta dificultad, pues no se dispone de datos fiables. Si se comparan los resultados obtenidos por aquellos autores que lo han estudiado se pueden encontrar diferencias que, en ocasiones, llegan a ser bastante notables. Esta controversia pone de manifiesto la complejidad de este sistema acuífero y la cautela con la que se deben tomar los resultados que se exponen a continuación.

Consideraciones generales

El acuífero aluvial de Castell de Ferro recibe su principal recarga de la infiltración de la eventual escorrentía superficial generada sobre los materiales impermeables de la cuenca vertiente. También se debe considerar la infiltración de la precipitación que se produce sobre los materiales del propio acuífero y la transferencia subterránea de agua procedente de los materiales carbonatados que afloran al oeste del acuífero. Además, debido a la alta fracturación de los materiales metapelíticos, existe un flujo subsuperficial de agua, que es aprovechado por algunas captaciones. Tampoco hay que olvidar la alimentación por retorno de riegos que, a pesar de la alta eficiencia de los sistemas de riego por goteo de los invernaderos situados sobre el acuífero, se ha puesto de manifiesto por los elevados contenidos en nitrato en el agua de los pozos de la Vega de Castell y en el sector costero (P. Pulido, 2000).

En cuanto a las salidas del sistema, se reparten entre las extracciones por bombeo, para el abastecimiento de las poblaciones y el riego sobre el mismo acuífero, y las salidas al mar. En el sector costero es donde la situación parece más compleja, dado que los afloramientos carbonatados parecen constituirse como vías preferenciales de intercambio de agua con el mar (Calvache y Pulido-Bosch, 1993).

En general existe una alternancia de períodos con precipitaciones menores que la media y períodos con precipitaciones mayores que la media. En los períodos secos la cantidad de agua que se bombea es mayor que las entradas al sistema, hasta que se llega a un período húmedo y se invierte la situación, recuperándose el valor medio del espesor saturado de agua dulce, e incluso superándose.

En el balance del acuífero que establece E. Terrón (1983) se estiman unas entradas totales comprendidas entre 6,1 y 6,3 hm³/año. Sin embargo, en el Plan Hidrológico Nacional se obtiene un valor de 4,7 hm³/año de aportaciones anuales en la cuenca. Hay que tener en cuenta que parte de la cabecera de cuenca está constituida por materiales permeables en los que el agua infiltrada se integra en sistemas de flujos subterráneos cuyas salidas están en cuencas adyacentes. Además hay que señalar el hecho de que, excepcionalmente, puede haber escorrentía superficial directamente hacia el mar. Sumando estos hechos, Benavente et al. (1988), considera que un valor de la recarga del orden de 3 hm³/año es suficientemente orientativo, que es muy inferior al valor calculado por E. Terrón.

E. Terrón (1983) considera que las salidas por extracciones del sistema pueden oscilar entre 3 y 3,5 hm³/año. Existe una diferencia de algunos hm³/año respecto a las entradas que este mismo autor había considerado (6,1-6,3 hm³/año), que supone podrían corresponder a las salidas ocultas al mar. Sin embargo, según el ITGE (1992), las salidas por extracciones están comprendidas entre 1,8 y 1,9 hm³/año. Esta diferencia se debe a que, mientras que E. Terrón obtiene sus resultados por métodos indirectos (dotaciones para riego y abastecimiento de la población), el ITGE los obtiene a partir del control de las explotaciones de aguas subterráneas en el acuífero en su red de 43 puntos. En cuanto a las salidas subterráneas al mar, Benavente (1987) las estima, por aplicación de la fórmula de Darcy a la franja costera, entre 0,5 y 1 hm³/año. Este resultado está muy por debajo de la cantidad que E. Terrón suponía podría corresponder a las salidas al mar.

En 1983 E. Terrón calculó de forma aproximada el volumen de agua almacenada en el acuífero basándose en la profundidad del substrato obtenida a partir

de las columnas estratigráficas de algunos sondeos y estableciendo un valor medio del coeficiente de almacenamiento del 10%. El valor obtenido para épocas de aguas altas fue de 3 hm³/año, y de 1 hm³/año para épocas de aguas bajas (finales del estiaje). Este valor corresponde al volumen de reservas del acuífero. Hay que considerar que la explotación prolongada de tales reservas conducirá a un consumo elevado de las mismas y por consiguiente a una reducción alarmante del volumen de acuífero saturado. Además, en función del régimen de explotación y de las características concretas de la recarga en época de aguas bajas, y para años muy secos, se podría producir una inversión del gradiente hidráulico en algunos puntos, con el consiguiente riesgo de invasión marina.

Entradas

De forma resumida, las principales entradas al sistema acuífero son las siguientes:

- Infiltración de la escorrentía superficial generada sobre los materiales impermeables de la cuenca vertiente.
- Infiltración de la precipitación sobre el propio acuífero.
- Aportes de agua subterránea procedente de los materiales carbonatados al oeste del acuífero.
- Transferencia de agua subterránea mediante un flujo subsuperficial procedente de los materiales metapelíticos.
- Retorno de riegos.

A continuación se detalla cada uno de las entradas consideradas anteriormente.

- En cuanto a la infiltración se tendrán en cuenta los datos obtenidos por P. Pulido (2000), que se refieren tanto a la infiltración que se produce sobre los materiales impermeables de la cuenca vertiente, como a la que tiene lugar sobre el propio acuífero. Para la estimación de la lluvia útil considera una capacidad de campo media para los suelos de la cuenca vertiente de 50 mm. Los resultados que obtiene se pueden resumir en el siguiente cuadro:

	P (mm)	LLU (%)	Sobre la cuenca vertiente (*)				Sobre el acuífero		
			LLU (hm ³)	I (%)	I (hm ³)	E (hm ³)	LLU (hm ³)	I (%)	I (hm ³)
Año húmedo (1996-97)	746	60,1	29,4	30	8,8	20,6	1,4	70	1,1
Año seco (1994-95)	148	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	100	0,0
Año medio	384	30,8	7,7	10-15	1,0	6,7	0,4	85	0,35

I = Infiltración respecto a la lluvia útil.

E = Escorrentía superficial

LU = Lluvia útil (cubre tanto la precipitación que se infiltra como la que fluye por los cauces al mar).

(*) = Sólo la cuenca vertiente a la rambla de los Gualchos, excluyendo el área ocupada por los materiales carbonatados del manto de Lújar, dado que el acuífero que constituyen vierte sus aguas a la cuenca del río Guadalfeo.

Según estos datos se puede considerar que la infiltración de la precipitación sobre el acuífero es prácticamente el 100 % de la lluvia útil, ya que la cantidad de escorrentía para el año medio es prácticamente despreciable teniendo en cuenta las cifras que se están manejando (0,05 hm³).

La infiltración que se produce sobre los materiales impermeables de la cuenca vertiente supone, para el año medio, un 10-15 % de la lluvia útil (1 hm³ aproximadamente). El resto discurrirá en forma de escorrentía superficial hacia el aluvial, lo que supone el 85-90 % de la lluvia útil, es decir, unos 7 hm³. Pero esta cantidad no representa el valor de la recarga, pues no todo lo que llega al aluvial se infiltra. Las precipitaciones que tienen lugar en la zona son escasas y se concentran en varios episodios torrenciales a lo largo del año. Esto da lugar a que gran parte del agua vaya a parar al mar en forma de avenidas.

Como valor de la recarga se tomará el calculado por Benavente et al. (1988), que se puede cifrar en torno a los 2,5-3 hm³/año. Es más bajo que el obtenido por otros autores, pero tiene en cuenta factores, como las lluvias torrenciales, que no se habían considerado anteriormente, y que le permiten dar un valor más representativo.

En cualquier caso, se puede ver la gran variabilidad de los recursos, ya que la lluvia útil en los años secos es nula, mientras que en los años húmedos puede llegar a alcanzar los 30 hm³ (año 1996-97).

- Otra de las posibles entradas consideradas es la que se refiere al flujo subsuperficial de agua subterránea desde los materiales metapelíticos, que se produce gracias a la alta densidad de fracturación de estos materiales. Pero este flujo, además de ser muy difícil de cuantificar, no es significativo, pues no existen manantiales de gran caudal que lo drenen, y las explotaciones que lo aprovechan son de escaso caudal y rendimiento. Por estos motivos, no se comete un error importante si se considera esta partida del balance hidráulico incluida en la escorrentía superficial sobre los materiales impermeables, ya que el destino de ambas es la recarga del acuífero.

- Todos los autores que han estudiado hasta ahora el acuífero aluvial de Castell de Ferro habían considerado la existencia de un aporte de agua subterránea procedente de los materiales carbonatados al oeste del sector costero de este acuífero. Por ejemplo, E. Terrón (1983) considera que estos afloramientos carbonatados pueden aportar agua al aluvial en períodos de grandes precipitaciones, cifrando el volumen en unos 0,2 hm³/año.

Pueden existir esos aportes subterráneos al aluvial, pero no con la importancia que se ha señalado hasta ahora por otros autores. Esto es debido a que se ha considerado un espesor en profundidad de los materiales carbonatados muy superior al que realmente tienen. Si se tienen en cuenta los datos obtenidos en los sondeos realizados por INGEMISA en 1995, se observa que el espesor real de los materiales carbonatados es mucho menor. Aunque el contacto de las metapelitas con los carbonatos es irregular y está retocado por numerosas fracturas y fallas, en general se encuentra a profundidades iguales o superiores al nivel del mar. Esto supone un espesor saturado en las rocas carbonatadas pequeño, que unido a los bajos niveles piezométricos en el aluvial, supondría que la transferencia de agua subterránea hacia el aluvial sería poco significativa.

- Como entradas también hay que tener en cuenta el retorno de riegos. Aunque se ha generalizado el uso de invernaderos y el riego por goteo, sigue existiendo un retorno del 15-20 %, lo que supone unos 0,4 hm³/año.

Salidas

Las salidas del sistema se pueden considerar como las debidas a extracciones y a salidas subterráneas al mar.

En cuanto a las extracciones por bombeo, el IGME estableció en 1984 una red de control de las explotaciones de aguas subterráneas en el acuífero, proporcionando unos datos bastante fiables de los volúmenes totales extraídos desde esa fecha hasta la actualidad. Estas extracciones han ido en aumento desde que se empezaron a controlar, pero su aumento no ha sido importante, pasando de 1,68 hm³/año en 1984 a unos 2,4 hm³/año en la actualidad. La agricultura es la responsable de un 90 % de la demanda existente en la zona. La distribución mensual de las explotaciones presenta en general dos máximos a lo largo del año, coincidiendo con los meses de Marzo-Abril y Septiembre-October.

Las salidas subterráneas al mar se pueden considerar entre 0,5 y 1 hm³/año, según Benavente (1987).

Resumen y conclusiones

Cuantitativamente, a la vista de los anteriores datos, el acuífero no está sobreexplotado, si bien cabe destacar que los bombeos no son uniformes a lo largo del año, por lo que se produce al final del estiaje una intrusión salina al someterse al acuífero a una explotación por encima de sus posibilidades. Esto se debe a que en esta época aumentan los riegos en los invernaderos de la Vega de Castell y a que la demanda de agua para consumo humano también se eleva al pasarse de una población estacionaria de 3115 habitantes (según censo de 1999) a unos 9000 habitantes en verano.

Además las extracciones de aguas subterráneas varían de unos años a otros según sean estos secos, incrementándose los bombeos y favoreciéndose la intrusión marina, o húmedos, disminuyendo las extracciones y recuperándose los niveles piezométricos.

ENTRADAS	
Recursos (año seco-año medio)	2,5-3 hm ³ /año
Retorno de riegos	0,4 hm ³ /año
Aportes procedentes de los carbonatos	0 hm ³ /año
TOTAL	2,9-3,4 hm³/año

SALIDAS	
Extracciones	2,4 hm ³ /año
Salidas subterráneas al mar (año seco-año medio)	0,5-1 hm ³ /año
TOTAL	2,9-3,4 hm³/año

Esquema del balance medio del acuífero



5.5.- EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA

Hasta el año 1984 no se tienen datos precisos del nivel piezométrico debido a que se carecía de nivelación topográfica de los pozos. Por este motivo, las observaciones realizadas hasta esa fecha hay que tomarlas con ciertas reservas.

Benavente (1982) detectó en la parte final de la rambla del Sotillo una situación de inversión del gradiente hidráulico, con cotas de la superficie piezométrica del orden de 1,8 m por debajo del nivel del mar (Septiembre 1981), como consecuencia de extracciones excesivas de agua subterránea.

Terrón (1983) puso de manifiesto la existencia de un flujo de agua subterránea hacia el mar, que estaba ligeramente desplazado hacia el oeste con respecto al cauce de la rambla del Sotillo, así como una disminución del gradiente hidráulico hacia el mar y hacia el sector oriental. (Figura 5, 6 y 7).

El IGME, basándose en medidas tomadas en Noviembre de 1982, considera que la superficie piezométrica del acuífero desciende en sentido NO-SE, desde valores próximos a los 8 m s.n.m. en el extremo septentrional a valores próximos al nivel del mar en las inmediaciones de la línea de costa. El gradiente hidráulico medio es del orden del 4 por mil. El sentido de circulación del agua subterránea, según se deduce del trazado de las isopiezas de 1982 (Figura 5), es de NO a SE, aunque en el sector suroccidental podría ser próximo a O-E.

Mapa de Isopiezas
(Modificado de E. Terrón, 1983)

Julio 1982

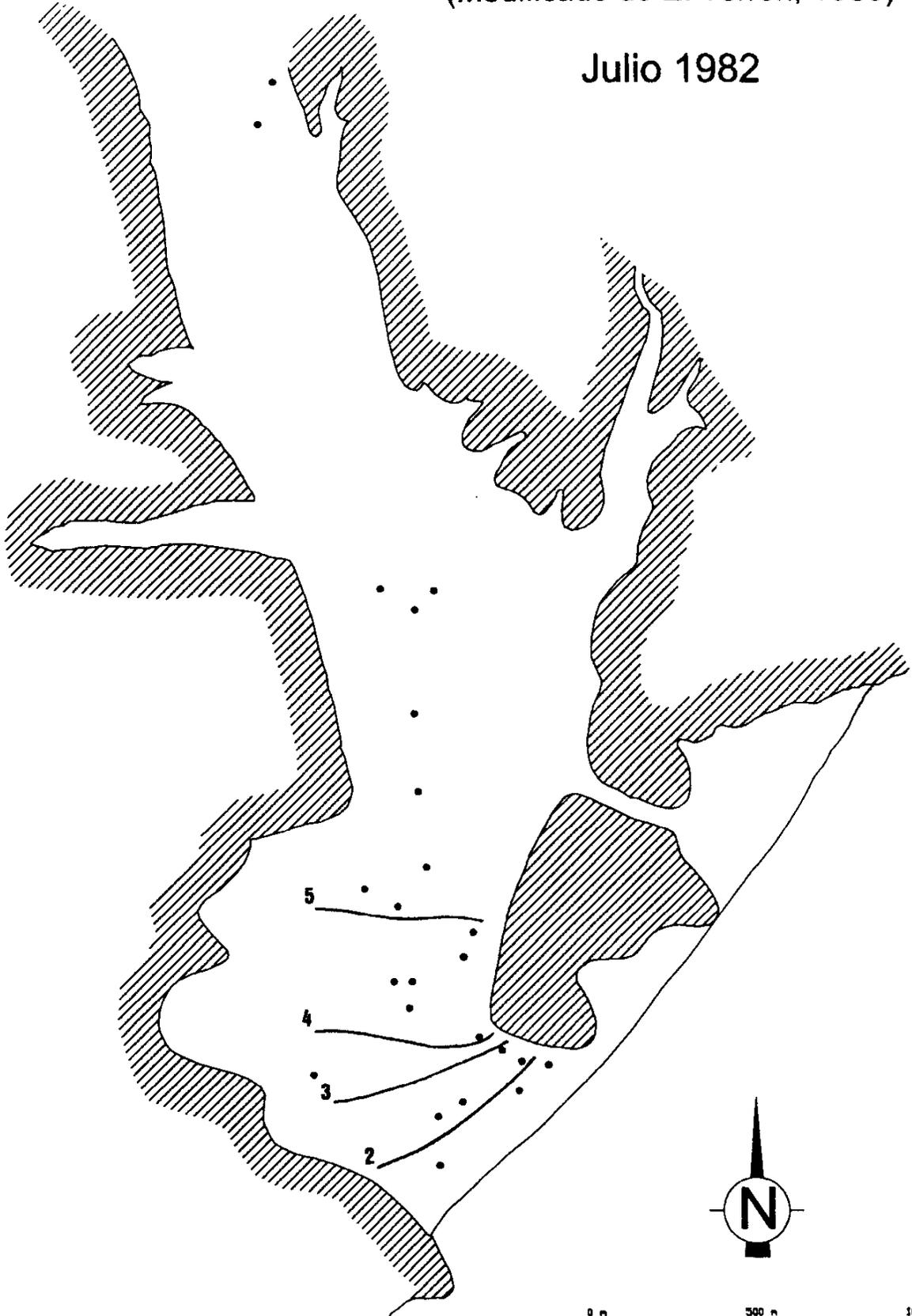


Figura 5

Mapa de Isopiezas
(Modificado de E. Terrón, 1983)

Noviembre 1982

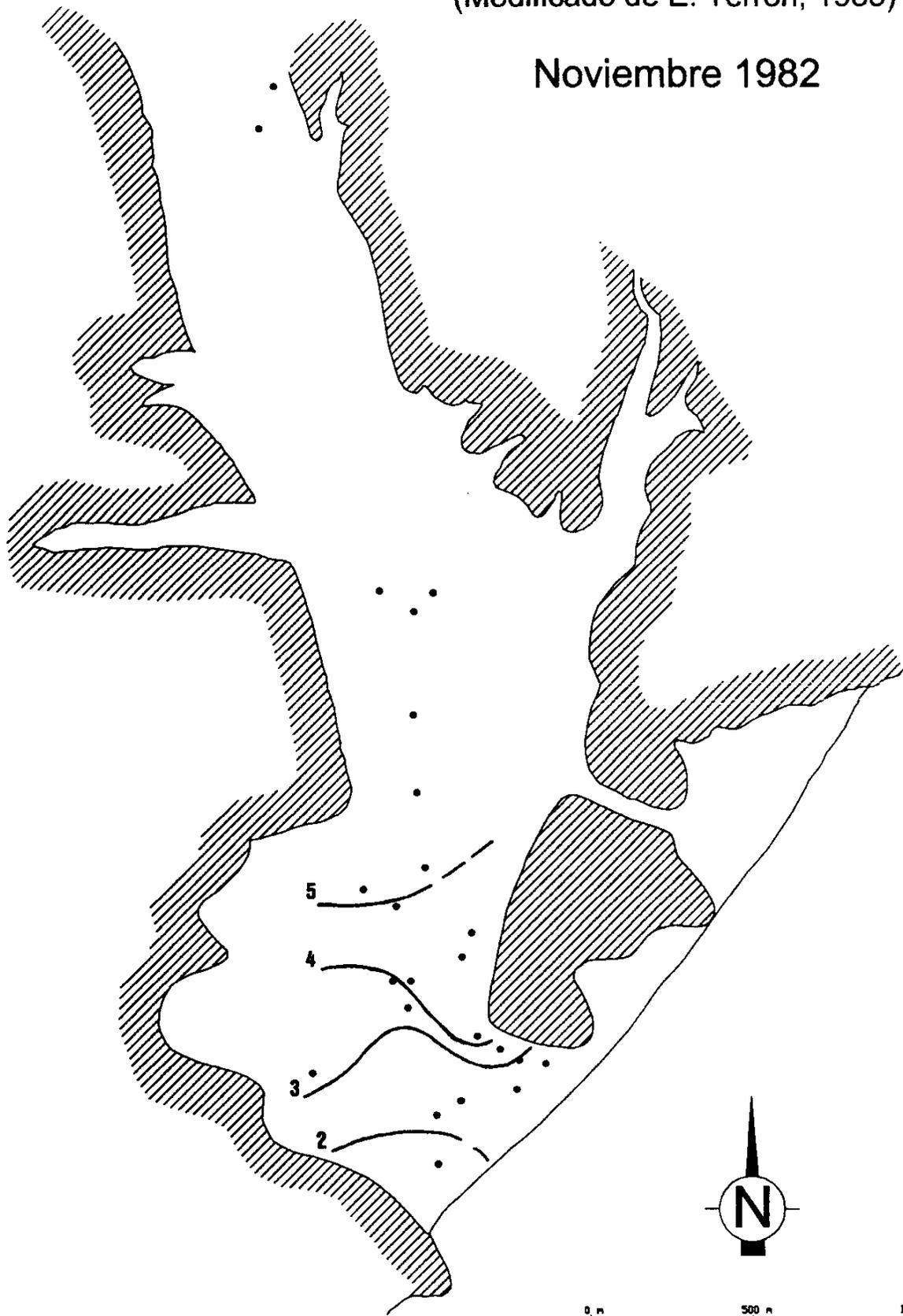


Figura 6

Mapa de Isopiezas
(Modificado de E. Terrón, 1983)

Diciembre 1982



Figura 7

A partir de las observaciones realizadas por el IGME en 1984, apoyadas en cotas precisas, se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

- En la cabecera del acuífero, en la zona de Los Carlos, el nivel piezométrico se sitúa a la cota 56-57 m.s.n.m.
- Los mapas de isopiezas realizados con los datos tomados en el año 1984 (Figuras 8 y 9), apoyados en la nivelación topográfica llevada a cabo, muestran que hay zonas en la parte meridional del acuífero en las que el nivel piezométrico se encuentra por debajo del nivel del mar como consecuencia de los bombeos. Este hecho es más acusado en la campaña de Septiembre, con cotas próximas a los 4 metros bajo el nivel del mar, aunque también en la campaña realizada en Junio aparecen cotas de la superficie piezométrica de $-0,45$ m debido a que durante los meses de invierno también se realizan bombeos en este acuífero. Así pues, la superficie piezométrica está influenciada en ambas campañas por efecto de los bombeos.
- La dirección del flujo subterráneo en las zonas alta y media es con toda probabilidad NO-SE, que es la dirección que tiene el acuífero. Ya en la zona baja, esta dirección se ve afectada puntualmente por las depresiones originadas por los bombeos que producen conos de depresión.
- En la parte alta de la cuenca, el gradiente llega a ser del 4%, suavizándose en la zona media, en donde es del orden del 2%. En la zona baja, en los 1,5 km más próximos a la costa, bajo los efectos de los bombeos el gradiente disminuye considerablemente, obteniéndose valores de 0,6 por mil en la campaña de Junio, y 0,4 por mil en Septiembre.

Estos resultados deben ser consecuencia, fundamentalmente, de la disminución del flujo, como respuesta a la importante explotación que existe al principio de este sector. También puede influir el aumento de transmisividad, teniendo en cuenta que el espesor saturado es unas diez veces mayor que en cabecera, además de la posible existencia de materiales más permeables en la columna litológica (Benavente et al, 1988).

Las campañas de medidas realizadas por el IGME en 1985 mostraron una situación similar a la de 1984, con dos zonas en las que se registraron cotas por debajo del nivel del mar, provocadas por los bombeos.

Mapa de Isopiezas
(Modificado de ITGE, 1992)

Junio 1984

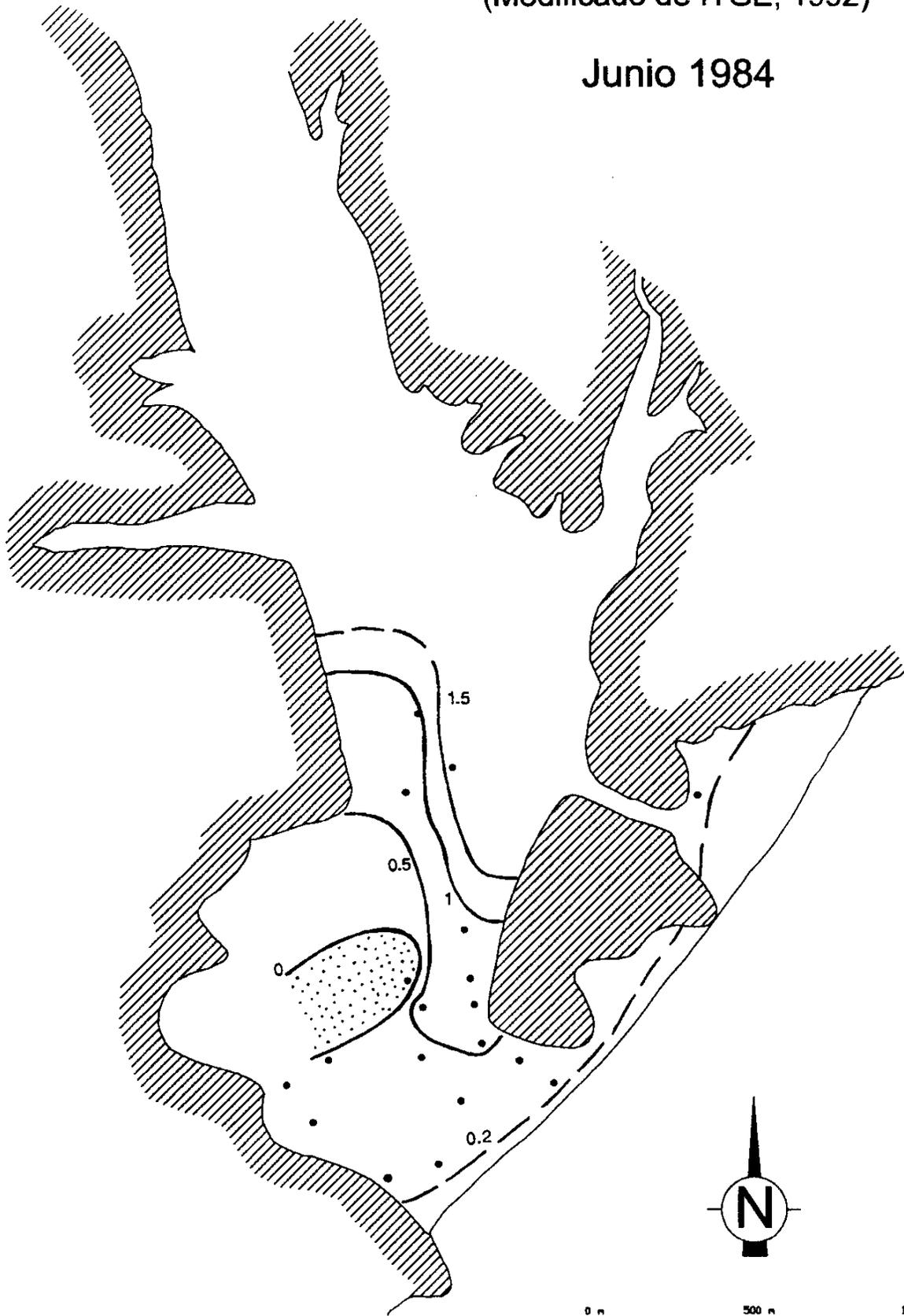


Figura 8

Mapa de Isopiezas
(Modificado de ITGE, 1992)

Septiembre 1984



Figura 9

La situación observada por el IGME en 1986 es apreciablemente mejor a la del año anterior. Aunque siguen existiendo puntos con cotas por debajo del nivel del mar, los niveles piezométricos, en general, se encuentran a cotas superiores. Esto está causado por un incremento en las precipitaciones durante ese año, junto con un descenso en las extracciones.

En 1987, de los datos obtenidos por el IGME (Figura 10), se puede observar que existen dos zonas influenciadas por los bombeos, con un umbral piezométrico entre ambas, con cotas ligeramente inferiores a las del nivel del mar. En la zona más meridional, puede apreciarse cómo existe una ligera inversión de gradientes en la zona de contacto con el acuífero carbonatado.

En cuanto a 1988, el IGME tomó medidas en los meses de Enero, Mayo y Septiembre (Figuras 11, 12 y 13 respectivamente).

En Enero la piezometría muestra un gradiente del orden de 0,07%. Aunque se puede observar una influencia provocada por los sondeos, no existen puntos con cotas por debajo del nivel del mar.

Las isopiezas del mes de Mayo muestran un amplio sector con cotas inferiores al nivel del mar, y se puede deducir un flujo a favor del gradiente inverso procedente de los materiales carbonatados, que son la principal vía de penetración de la intrusión marina, como ya pusieron de manifiesto diversos autores (Del Valle, 1973; E. Terrón, 1982; Benavente y Terrón, 1983).

En el mes de Septiembre, aunque la situación es similar a la del mes de Mayo, los niveles piezométricos se han elevado sensiblemente debido a la disminución en los bombeos que se produjo durante los meses de Junio y Julio (salvo en el punto 2044-6-071, que continuó en funcionamiento durante el estiaje).

En general, las oscilaciones del nivel piezométrico en los sondeos cercanos a la costa son suaves, debido a que tanto los efectos de los bombeos como de las recargas inducidas por las precipitaciones, son amortiguados por la intrusión marina. Incluso se puede apreciar el efecto de las mareas.

Mapa de Isopiezas
(Modificado de ITGE, 1992)

Septiembre 1987



Figura 10

Mapa de Isopiezas
(Modificado de ITGE, 1992)

Enero 1988



Figura 11

Mapa de Isopiezas
(Modificado de ITGE, 1992)

Mayo 1988



Figura 12

Mapa de Isopiezas
(Modificado de ITGE, 1992)

Septiembre 1988

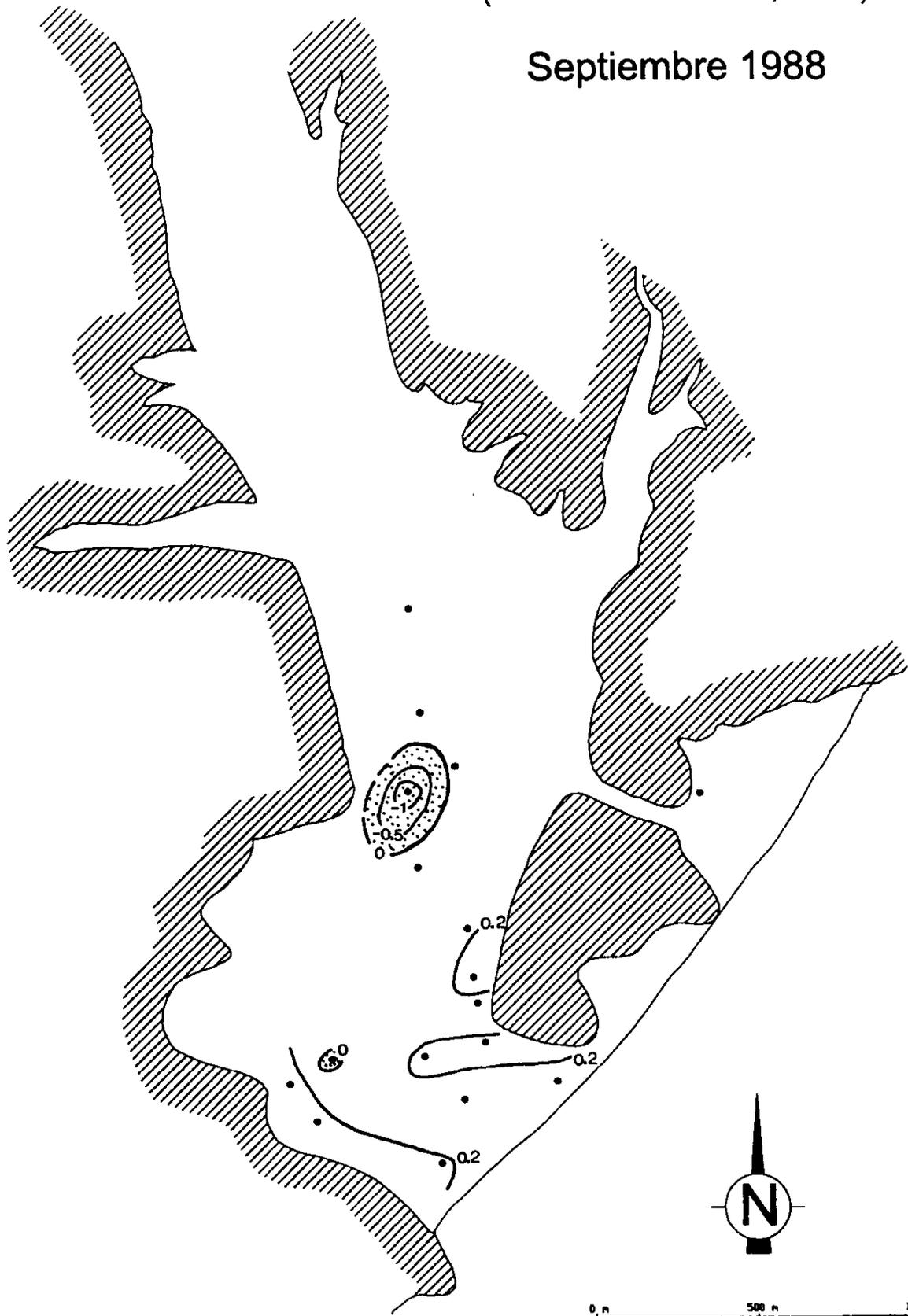


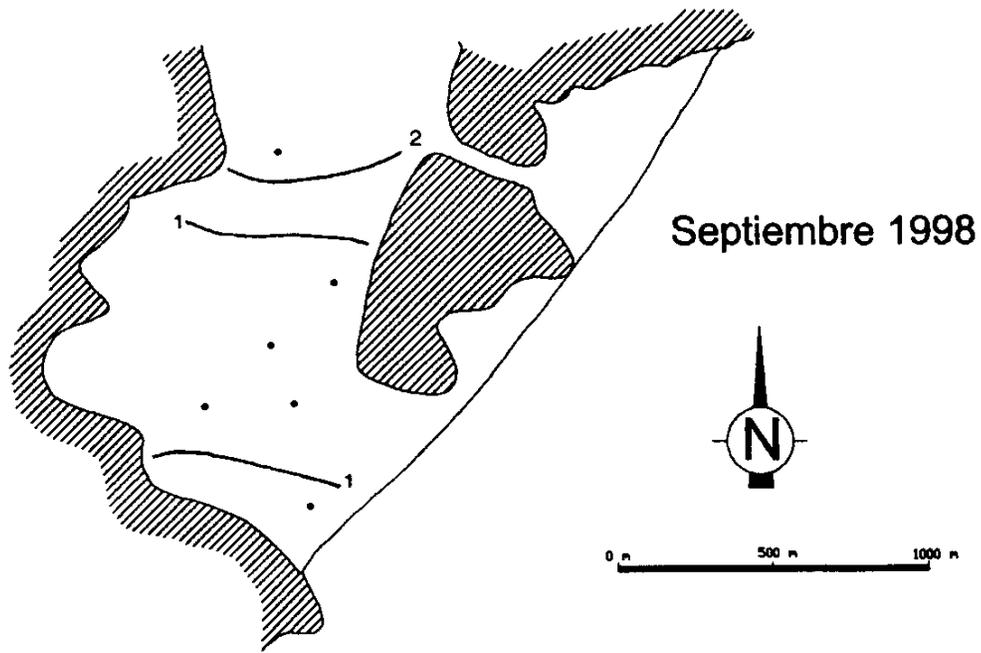
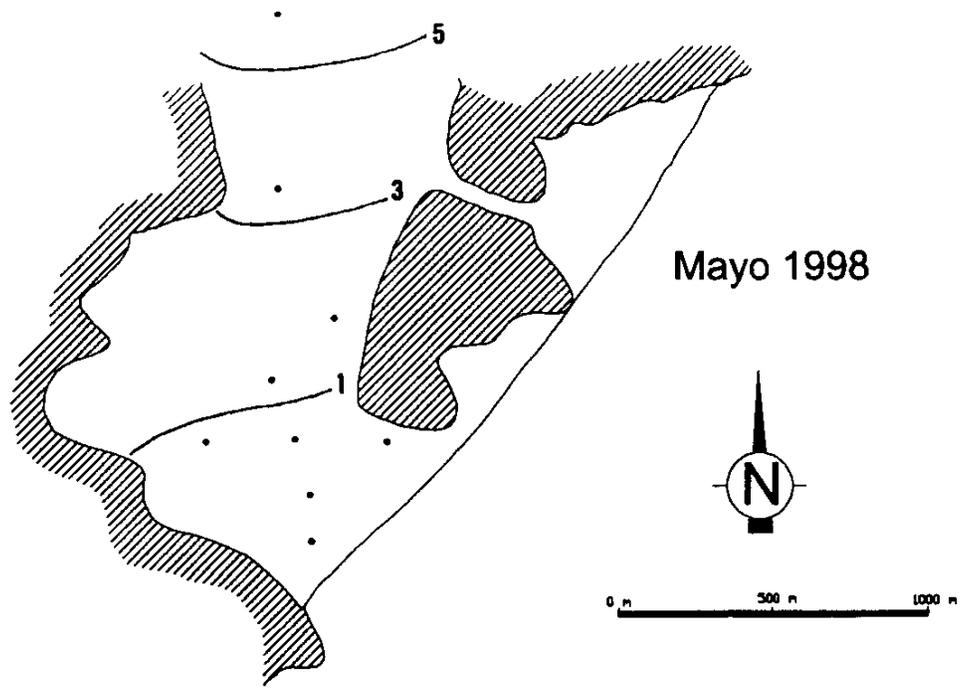
Figura 13

Benavente et al., (1988), entre 1985 y 1987. llevó a cabo medidas en cinco piezómetros de la CASE (P-1, P-2, P-3, P-4 y P-8). Se observaron unas oscilaciones en cabecera que superan los 12 m de amplitud (P-8), con marcados máximos en invierno-primavera y mínimos al final del estiaje, lo que ilustra acerca de una dinámica hidrogeológica relativamente rápida en relación con la infiltración de la eventual esorrentía superficial.

Calvache en 1991 puso de manifiesto las suaves oscilaciones del nivel piezométrico en el sector de la vega de Castell de Ferro, donde en la mayor parte de los puntos aparecen variaciones de unos 50 cm, y sólo en aquellos cercanos a los bombeos más importantes alcanzan oscilaciones superiores al metro. Esto, como se comentó anteriormente, no ocurre en cabecera, donde las oscilaciones piezométricas son mucho mayores.

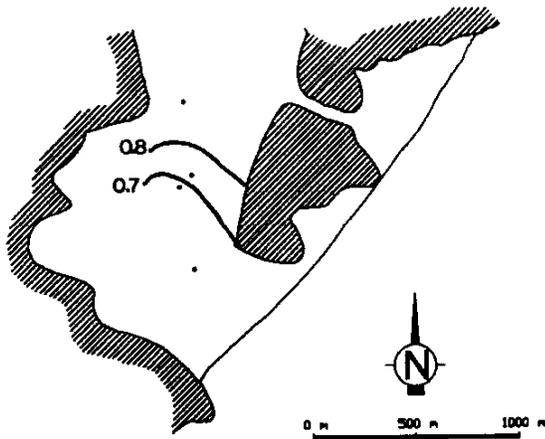
Este autor considera como una de las posibles causas la proximidad de los límites permeables correspondientes a las calizas, las cuales, debido a que se encuentran en contacto con el nivel del mar y a la alta permeabilidad que presentan, podrían amortiguar las oscilaciones producidas en el acuífero detrítico, hecho que no ocurriría si el acuífero estuviese rodeado por materiales impermeables como es el caso del acuífero de Almuñecar, donde las oscilaciones son mucho mayores.

P. Pulido (2000), partir de los datos del ITGE (1999), realiza unos mapas de isopiezas entre Mayo de 1998 y Abril de 1999 (Figuras 14 y 15). En Mayo de 1998 el sistema mantenía un flujo hacia el mar con un gradiente cercano al 3 por mil. La ausencia de conos de descenso se debe al ya mencionado cese de los bombeos durante un período del año 1998 provocado por la puesta en funcionamiento del trasvase del Guadalfeo y tras un invierno muy lluvioso. En Noviembre del mismo año, el gradiente es algo mayor del 1 por mil. Los esquemas correspondientes al mes de Enero de 1999 (día 13 y 26) reflejan la existencia de un cono de descenso en el sector central de la vega de Castell, en uno de los focos de explotación del acuífero. En Septiembre de 1998 y en Abril de 1999 las isopiezas reflejan el flujo hacia el mar con gradientes menores del 1 por mil.

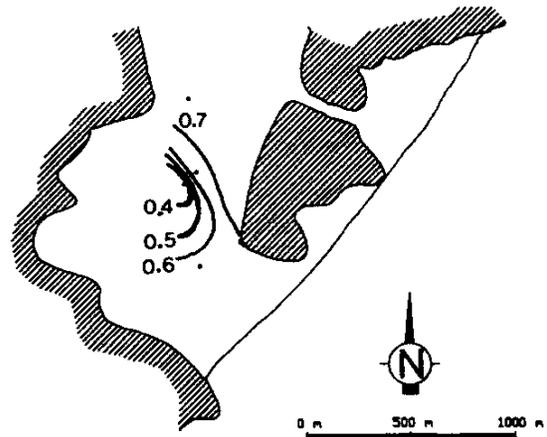


Mapas de Isopiezas
(Modificado de P. Pulido, 2000)

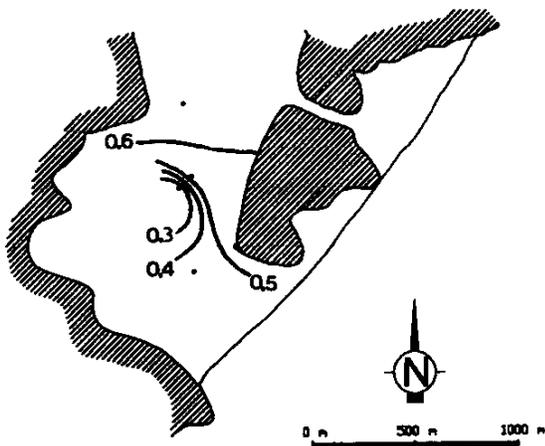
Figura 14



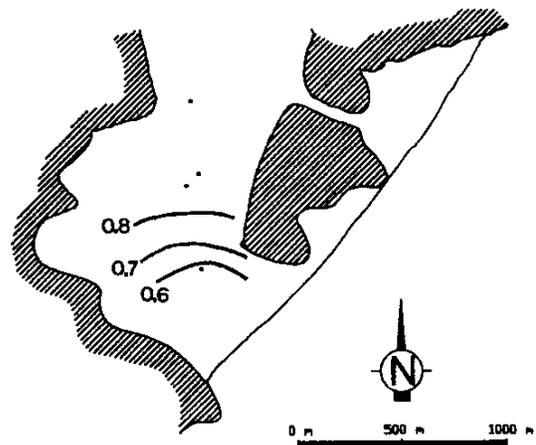
29 Septiembre 1998



13 Enero 1999



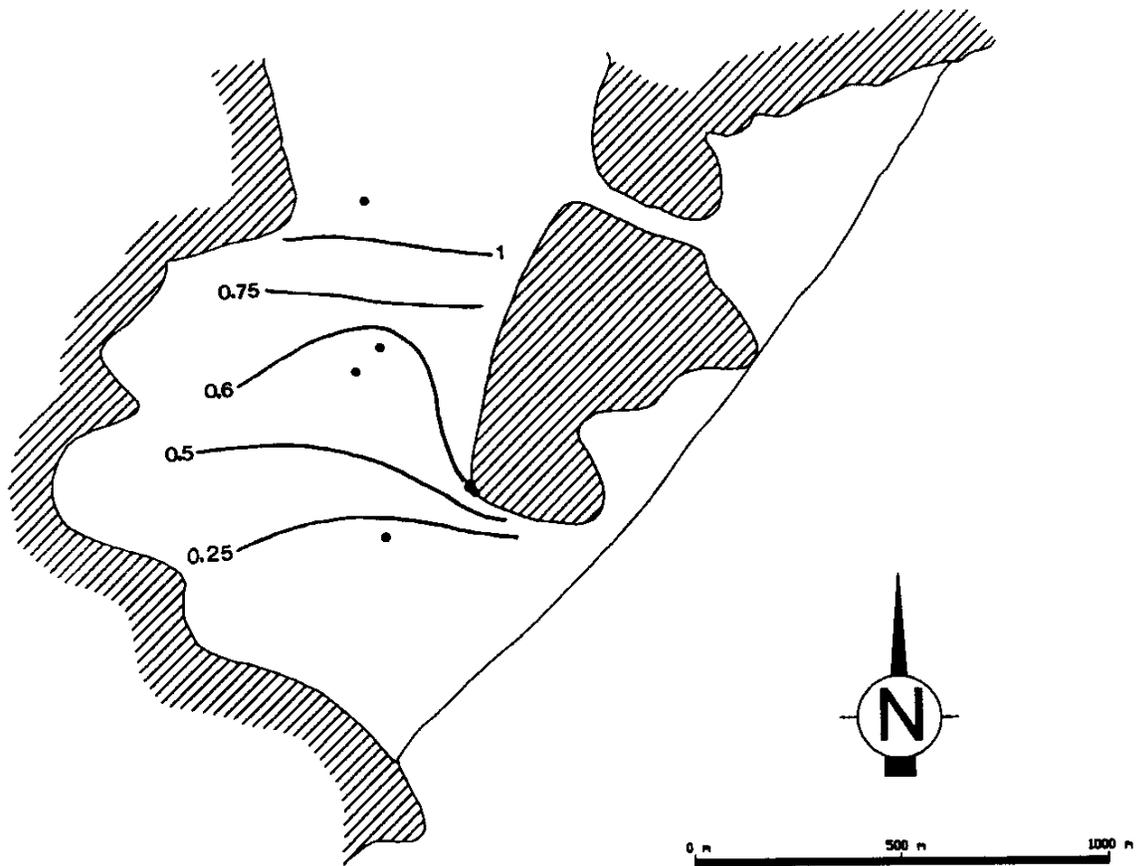
26 Enero 1999



15 Abril 1999

Mapas de Isopiezas
(Modificado de P. Pulido, 2000)

Mayo 1998 - Mayo 1999



Mapa de isovariaciones del nivel piezométrico
(Modificado de P. Pulido, 2000)

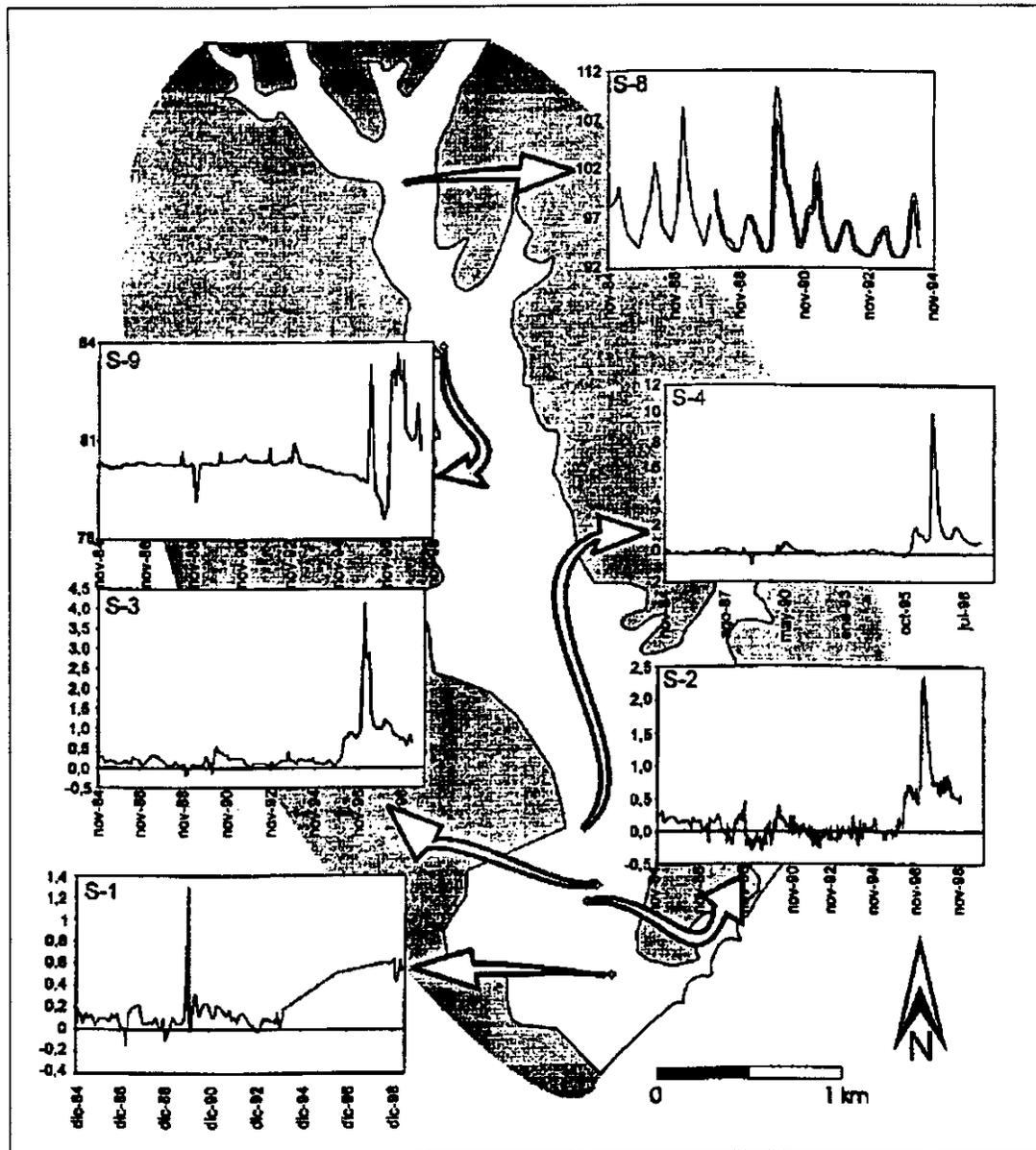
Figura 16

Este mismo autor, a partir de sus propias medidas, realiza un mapa de isovariaciones del nivel piezométrico para el periodo Mayo de 1998 a Mayo de 1999 (Figura 16). La variación aumenta a medida que nos alejamos del mar, ya que se amortigua su influencia como límite de nivel constante. El comportamiento menos inercial del acuífero kárstico se ve reflejado en la inflexión que presenta la isolinea de 0,6 m hacia el mar en el afloramiento carbonatado.

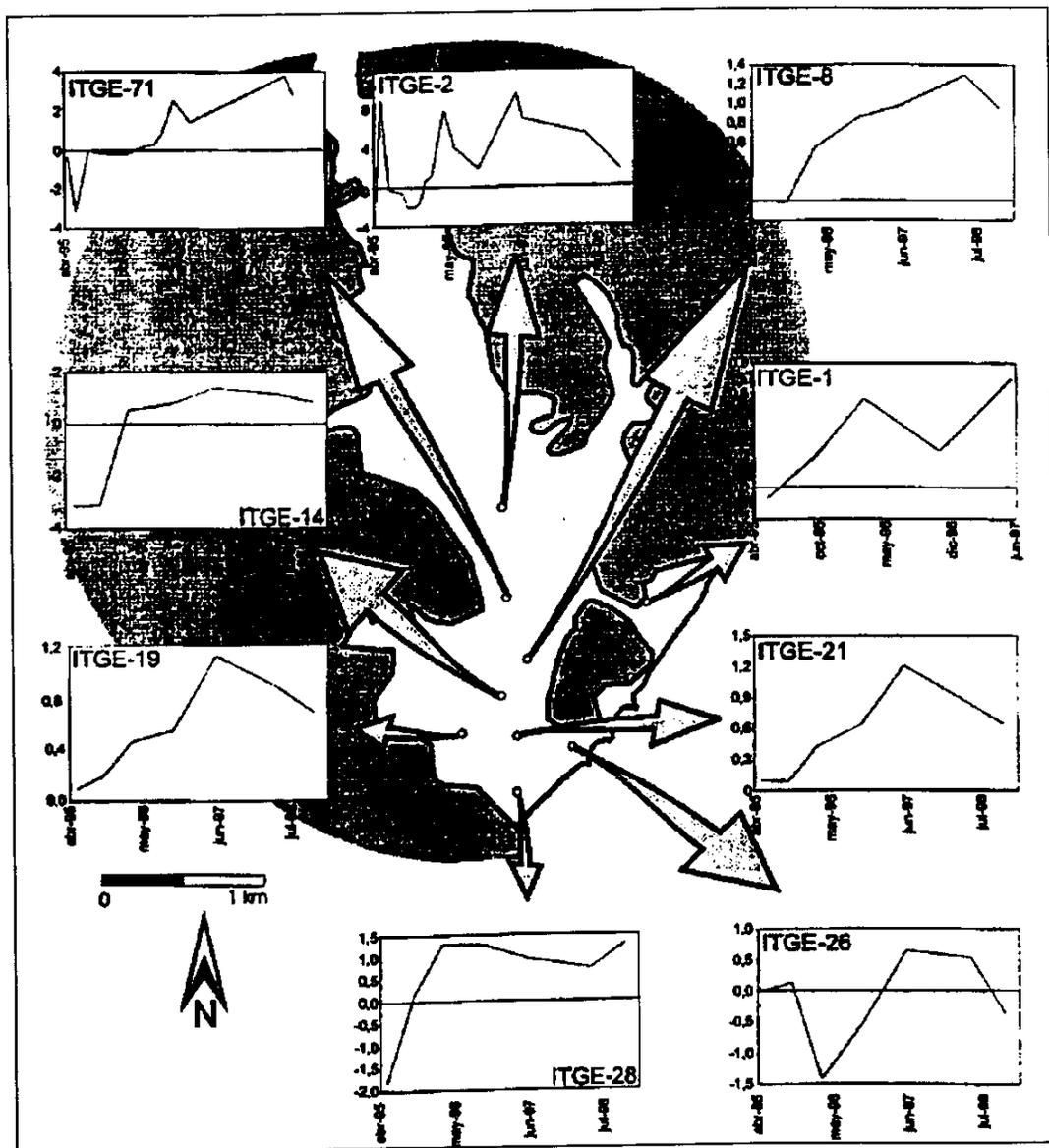
El registro más largo y continuo es el que realiza la C.A.S.E. desde Diciembre de 1984, con 9 piezómetros, aunque actualmente solo son operativos el P-1, P-2, P-3 y P-4. De estas observaciones P. Pulido en el año 2000 distingue dos tipos de comportamientos, según hay o no influencia del mar a través de los mármoles de la peña de Castell de Ferro y del Cerro del Águila.

Los piezómetros P-1, P-2 y P-3 al ser los más cercanos al mar presentan unas variaciones de nivel bastante amortiguadas (Figura 17). Su tendencia es descendente desde su perforación hasta Noviembre de 1995, con unos niveles que se acercan mucho a la cota cero, llegando muchas veces incluso a estar por debajo. Este periodo es el de mayor explotación del acuífero. La situación cambia a finales de 1995, produciéndose una subida de los niveles que se estabilizan por encima del nivel del mar, aunque siguen teniendo las fluctuaciones anuales naturales. Esto se debe a la drástica reducción de los bombeos, por las abundantes precipitaciones acaecidas a partir de esta fecha y al trasvase de agua del Guadalfeo. En Diciembre de 1996 se produce una crecida excepcional provocada por las abundantes lluvias de ese mes, pudiéndose observar en todos los piezómetros una subida muy brusca, que se ve amortiguada muy rápidamente. Los niveles tienen una tendencia estacional, subiendo en primavera y descendiendo durante el verano y el otoño, para alcanzar el mínimo en invierno.

Los otros piezómetros (Figura 17) tienen variaciones estacionales mucho más marcadas al no estar tan influenciados por el mar, con variaciones del nivel, en el mismo año, de hasta 10 m. De ellos tan sólo queda uno operativo, al haber sido clausurados tres de ellos y a que otros dos permanecen secos salvo raras excepciones.



Evoluciones piezométricas de los piezómetros de la CASE
(P. Pulido, 2000)



Evoluciones piezométricas de los piezómetros del ITGE
(P. Pulido, 2000)

Estas observaciones, realizadas por P. Pulido (2000) de Noviembre de 1984 hasta principios de 1999, se pueden resumir en la Figura 17. Como ya ha dicho este autor, si se observan los niveles a lo largo de este período de tiempo, se puede ver como los niveles, pese a las fluctuaciones estacionales o a otras excepcionales, permanecen constantes. Los más cercanos a la costa se encuentran fluctuando muy cerca de la cota cero, por lo que en ocasiones llegan a estar por debajo de ella. En el caso del P-2, el nivel se localiza por debajo de la cota cero durante periodos mucho más largos, aunque su nivel medio está por encima. El nivel medio de todos ellos está por encima del nivel del mar. Pero la situación mejora a partir de 1996, con una subida de niveles en todos ellos que llegan a estabilizarse y quedan por encima del nivel del mar, a un nivel que no se había alcanzado antes, por lo menos durante el período de medidas considerado. Por ejemplo, el P-1 pasa de tener una media de 0,20 m antes de 1996 a estabilizarse entorno a los 0,50 m. Parece evidente que el trasvase y las intensas lluvias de esas fechas han tenido un gran efecto positivo en la recuperación de los niveles.

También se puede obtener información de las evoluciones piezométricas en los puntos controlados por el ITGE (Figura 18) entre Abril de 1995 y principios de 1999 (ITGE 2044-7-1, 2044-6-2, 2044-6-8, 2044-6-14, 2044-6-19, 2044-6-21, 2044-6-26, 2044-6-28, 2044-6-71), que son estudiados por P. Pulido (2000). La mayor parte de estos puntos presentan oscilaciones de pequeña magnitud en torno al nivel del mar, ya que se encuentran en la zona de influencia de los mármoles. Los dos pozos que se encuentran más alejados del mar presentan un comportamiento más extremo, con un rango de variación de más de 7 m. Alcanzan los niveles más altos en primavera, y los más bajos en otoño-invierno. Hay que tener en cuenta que casi todos estos puntos de agua son pozos activos, por lo que algunas de estas mediadas pueden corresponder a niveles dinámicos (P. Pulido, 2000).

Intrusión marina

De todos los datos anteriores se puede concluir que la intrusión marina en el acuífero costero de Castell de Ferro presenta una gran variación en cuanto a su magnitud y orientación a lo largo del tiempo.

Se pueden observar diferencias entre los distintos años estudiados, según el régimen de precipitaciones, e incluso variaciones mensuales para un mismo año, según el volumen de extracciones de las aguas subterráneas.

En general se pueden distinguir dos vías preferentes por las que se produce la entrada de agua procedente del mar:

- A través del cerro calizo de Castell de Ferro se produce el avance de la intrusión marina gracias a la alta transmisividad que presentan esos materiales. Además, esa transmisividad es mayor que la de los materiales del aluvial, por lo que el avance se produce con una mayor velocidad.
- La otra entrada de la intrusión marina se produce por la playa del Sotillo, pero no a través de toda ella, si no, preferentemente por una franja, de unos 250 m de ancho, que corresponde aproximadamente con el eje de la rambla del Sotillo desde su desembocadura hasta 1 km en el interior en dirección sureste-noroeste. Posiblemente se deba a que existan en esa franja materiales con una mayor transmisividad que los del resto del aluvial. Esto permite que exista una vía preferente de entrada de agua procedente del mar.

5.6.- EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS Y DE LA CALIDAD DEL AGUA

Para poder conocer con detalle la intrusión marina es necesario, no solo conocer la calidad actual del agua, sino que lo es también estudiar su evolución en el tiempo. Esto nos dará información de la evolución y comportamiento de la intrusión marina, y permitirá adoptar las mejores medidas para su frenado.

Los primeros datos sobre la hidroquímica del acuífero aparecen en la tesis doctoral de J. Benavente (1982), que se basa en una red de 12 puntos muestreados el 23/9/81. Analizando las principales características hidroquímicas establece tres áreas dentro del acuífero con distinta facies química:

- En la cabecera del acuífero la facies es bicarbonatada cálcica con bajo contenido salino (600 mg/l).
- En el sector central la facies predominante es sulfatada cálcico-magnésica o magnésico-cálcica que podría estar originada por un proceso de disolución de yesos.
- En el sector costero la facies obtenida es clorurada sódica, clorurada cálcica o mixta entre ambas, justificada esta variación por un proceso de intrusión marina favorecido por la inversión del gradiente hidráulico a consecuencia de la sobreexplotación del acuífero.

En 1983, E. Terrón, hace un estudio más profundo del quimismo de este acuífero, así como de su evolución temporal y espacial. Para ello realiza 113 análisis correspondientes a 27 puntos muestreados durante los años 1980, 1981 y 1982. Las conclusiones son similares a las obtenidas por J. Benavente (1982), diferenciando por la facies química y el contenido salínico tres sectores:

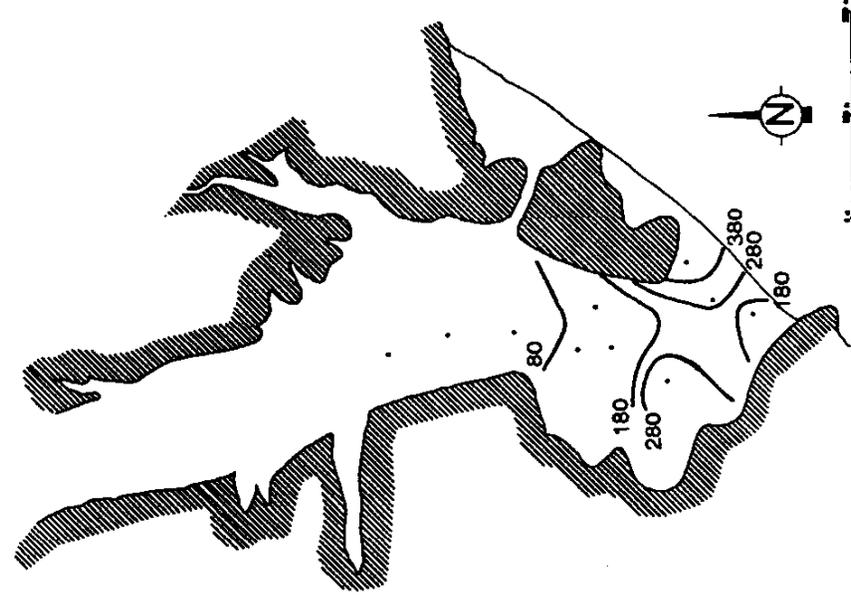
- Sector de cabecera. Las aguas de este sector son las de menor contenido salino de todas las analizadas (800 mg/l). Los puntos se localizan en un área de recarga predominante. Presenta facies principalmente bicarbonatadas cálcicas si los puntos están próximos a los afloramientos carbonatados, si no, son bicarbonatadas-sulfatadas cálcico-magnésicas.
- Sector central. Se produce un incremento notable de la salinidad de los puntos correspondientes al primer sector con respecto a los del segundo (entre 1000 y 2000 mg/l). Las facies que aquí predominan son: sulfatadas-cloruradas cálcico-magnésicas y cloruradas-sulfatadas cálcico-magnésicas.
- Sector costero. Los puntos correspondientes a éste, presentan, en general, mineralizaciones totales que oscilan entre 1000 y 2000 mg/l. Las facies son cloruradas sódico-cálcica, sódico-magnésica y cálcico-sódica. En este sector se detecta un avance de la interfase agua dulce - agua marina, favorecido por las discontinuidades de las calizas.

En las Figuras 19 y 20 se puede ver un resumen de las anteriores observaciones en unos mapas de isoconductividades e isocloruros.

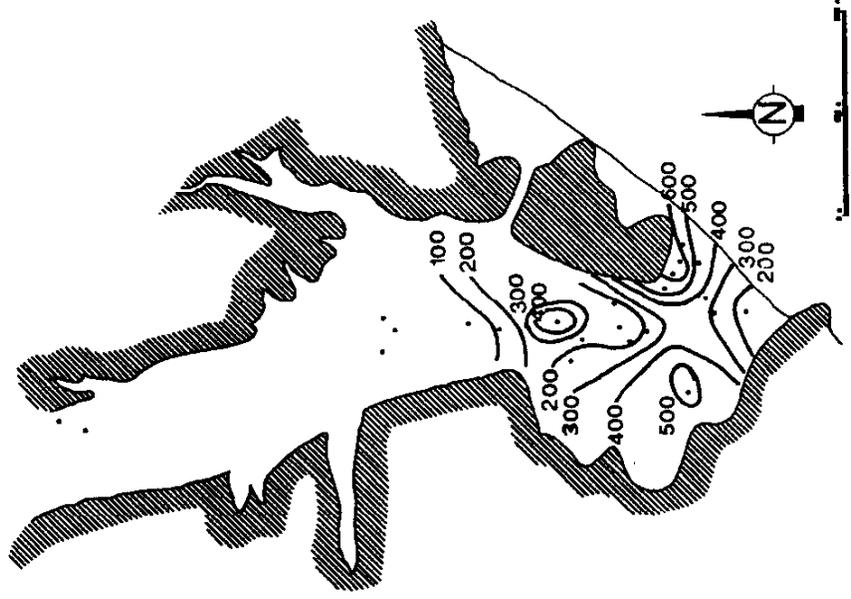
E. Terrón, también estudia de manera detallada la evolución espacial de las características hidroquímicas, que parecen estar regidos por aspectos sedimentológicos e hidrogeológicos, junto con otros de carácter antrópico.

El ión cloruro presenta sus máximos valores de concentración en la proximidad de los bordes carbonatados del acuífero, uno al oeste de Castell de Ferro y el otro al oeste del Cerro del Águila, relacionados con la penetración de la interfase agua dulce - agua marina, a través de las discontinuidades de estos afloramientos.

Con los resultados obtenidos de las investigaciones de este autor ya se puede poner de manifiesto que los afloramientos carbonatados constituyen una vía de entrada de agua procedente del mar mayor que en el caso de los afloramientos detríticos.



Septiembre 1981



Agosto 1982

Mapa de Isocloruros (mg/l)
(Modificado de E. Terrón, 1983)

El IGME, durante los años 1982, 1983 y 1984, realizó una serie de campañas de muestreo y análisis en 9 puntos de agua, que en 1984 quedaron en 5. Se determinaron fundamentalmente concentraciones de cloruros y conductividad eléctrica, con objeto del estudio de los procesos de intrusión marina en el acuífero.

En 1986 se inició el control de una red de vigilancia de la calidad en los acuíferos costeros de la provincia de Granada adyacentes a la cuenca del río Guadalfeo. Dentro de la red seleccionada se incluyeron 5 puntos correspondientes al acuífero de la rambla de Gualchos, los cuales continúan controlándose en la actualidad.

Los muestreos se realizan siempre tras el estiaje, durante el mes de Septiembre o de Octubre.

En el periodo de observación comprendido entre 1980-1984 se manifestó un empeoramiento de la calidad de las aguas, más acentuado en el sector costero, como consecuencia del incremento de las concentraciones de cloruros. Además, se observó que se producían variaciones estacionales, aumentando las concentraciones de cloruros en el mes de Septiembre, y disminuyendo en los meses de primavera.

También se registraron aumentos en las concentraciones de nitratos que, por ejemplo, en el punto 2044-6-026 pasaron de 25 mg/l en Septiembre de 1981 a 162 mg/l en Junio de 1983.

En las concentraciones de sulfatos y bicarbonatos no se aprecian variaciones significativas. En cambio, en los cationes analizados (sodio, potasio, calcio y magnesio) se observaron, en todos ellos, un incremento en las concentraciones.

En las observaciones realizadas en 1986, 1987 y 1988 en los cinco puntos que componen la red de control del ITGE, los puntos más cercanos a la costa presentaban una calidad mediocre, con excepción del punto 2044-7-001, que presentaba una calidad tolerable. El punto situado más al norte (2044-6-071) también presentaba una calidad tolerable. Todos los puntos presentaron excesivas concentraciones de nitratos.

En el muestreo realizado en 1989 se observó una considerable degradación de la calidad en todos los puntos con importantes incrementos en las concentraciones iónicas, que ya eran elevados en años anteriores. Esta degradación en la calidad se mantiene durante los siguientes años.

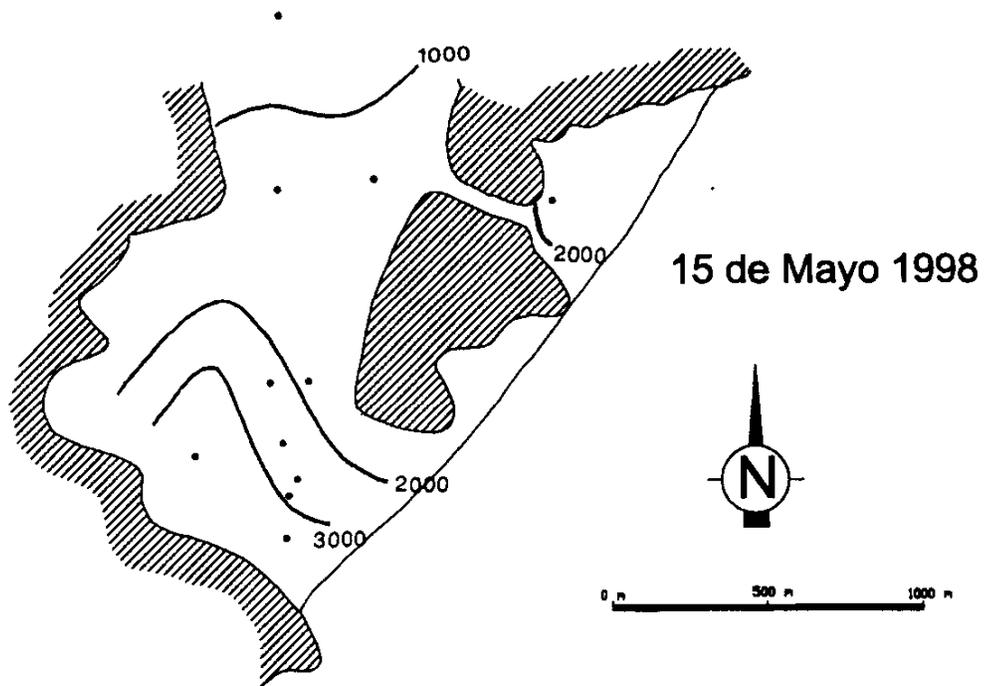
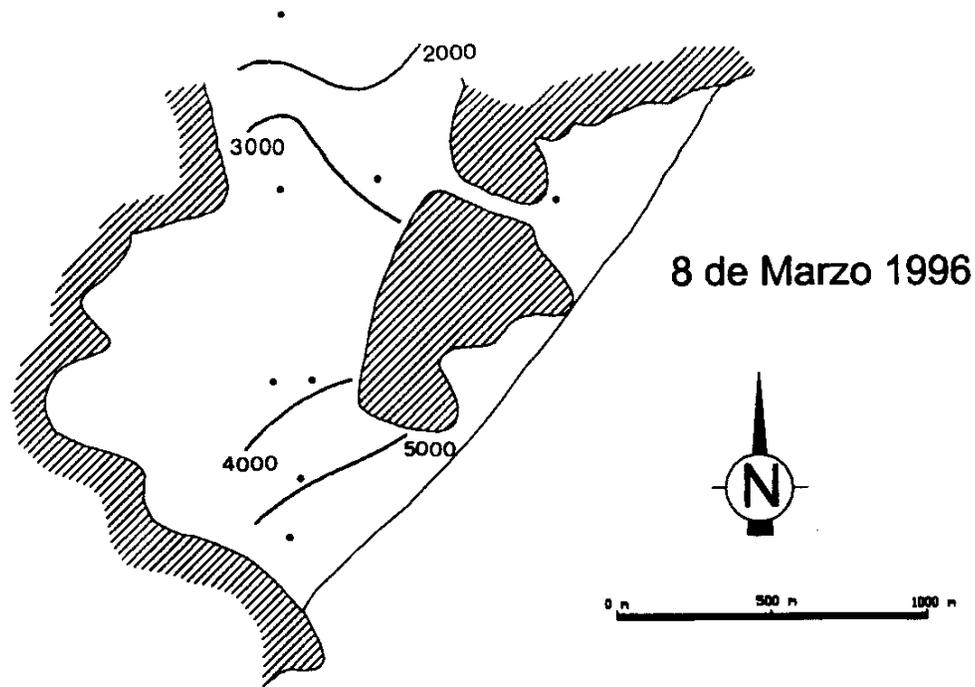
En el año 1998 la situación es algo más favorable, debido a que el invierno fue muy lluvioso y a que entró en funcionamiento un trasvase de agua de la cuenca del Guadalfeo. Estos dos factores propiciaron que se produjese un aumento de la recarga y una disminución de las extracciones que producen el avance del frente de agua dulce (ITGE 1999). Este hecho se puede constatar si se observan los mapas de isoconductividades de 1996 y 1998 (Figura 21), donde se aprecia el retroceso de la intrusión marina con la consiguiente mejora en la calidad del agua.

P. Pulido (2000), para determinar los parámetros fisicoquímicos del acuífero, toma un total de 160 muestras de agua, distribuidas en cinco muestreos realizados entre Agosto de 1998 y Marzo de 1999, en la zona costera. Pretende establecer no solo una distribución espacial, sino que también considera la distribución vertical del agua en el sector más cercano a la costa. Representando esos datos en un diagrama de Piper, llega a la conclusión de que el quimismo de las aguas analizadas indica que, además de una mezcla entre agua dulce y salada, deben existir otros procesos implicados, como el intercambio catiónico, la dolomitización o la reducción de sulfatos.

Al estudiar diversos parámetros fisicoquímicos, como la el contenido en ión cloruro e ión sulfato, o la relación sulfato/cloruro y la relación magnesio/calcio, pone de manifiesto la reactivación del proceso de intrusión marina tras su momentáneo retroceso debido a las intensas lluvias en el invierno de 1998.

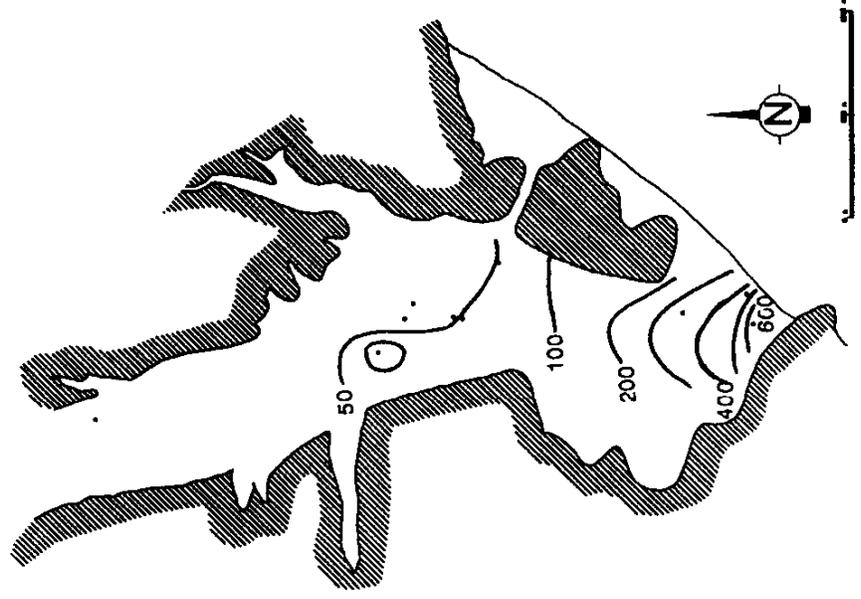
Según este autor, la distribución espacial del ión cloruro en el acuífero entre Agosto de 1998 y Marzo de 1999 (Figura 22), presenta menores concentraciones en la parte más septentrional, mientras que en las cercanías de la costa se encuentran valores superiores a los 600 mg/l. En general, a pesar de la escasa anchura del acuífero, la mitad occidental presenta mayores contenidos en cloruro que la mitad oriental. Existe, además, un progresivo enriquecimiento en cloruro de las aguas del sector central y de cabecera.

En cuanto a la distribución vertical, en los sondeos situados en los mármoles se aprecia una mayor amplitud de los valores de la concentración de ión cloruro, que en los sondeos en los materiales detríticos. Mientras que en los mármoles en la parte superior de los sondeos hay muestras con menos de 200 mg/l de cloruros y en el fondo se superan los 20000 mg/l, en el acuífero detrítico el menor valor obtenido es superior a 500 mg/l y el mayor es de unos 17000 mg/l.

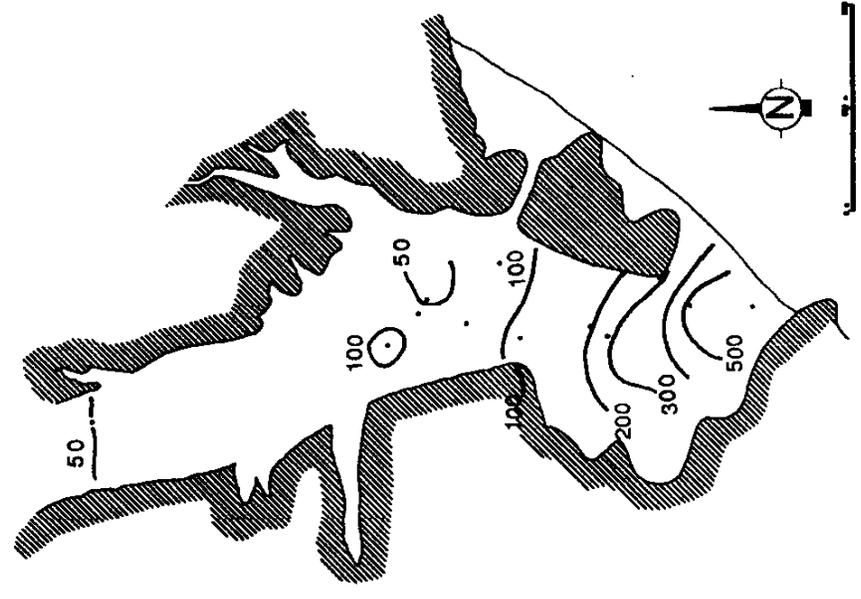


Mapas de Isoconductividades eléctricas ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
(Modificado de P. Pulido, 2000)

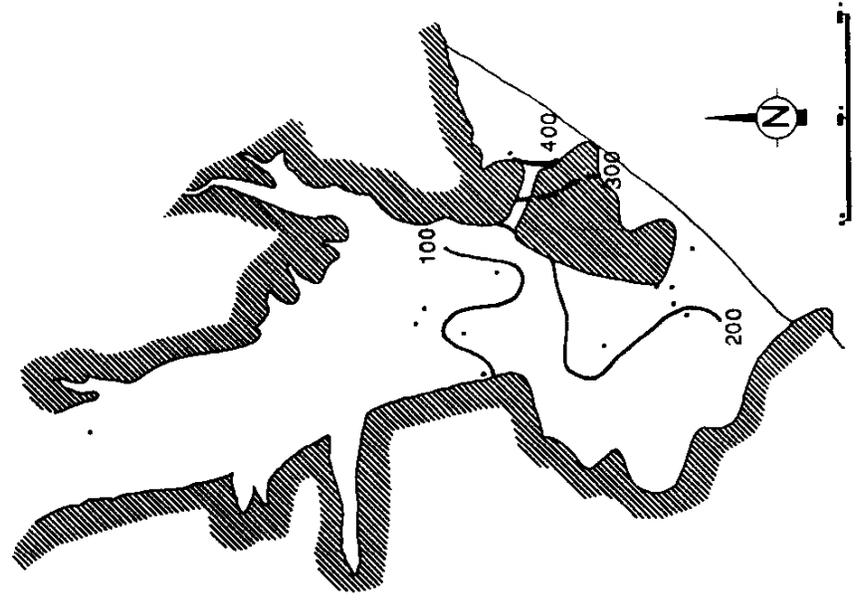
Figura 21



Agosto 1998



25 de Noviembre 1998



25 de Marzo 1999

Mapa de Isocloruros (mg/l)
(Modificado de P. Pulido, 2000)

Figura 22

Este mismo autor, también considera el contenido en ión sulfato, que alcanza los mayores valores en el sector costero, superiores a los 300 mg/l, aunque, curiosamente, los valores más altos no se encuentran en los pozos más cercanos al mar. Los contenidos más bajos en sulfatos se encuentran en los sondeos situados al oeste. Se detecta un aumento generalizado del contenido en sulfatos en el sector central y septentrional, donde pasan de unos 80 mg/l a unos 120 mg/l.

Realiza también registros de conductividad eléctrica y temperatura en siete sondeos (cuatro sondeos en los mármoles del Cerro Castillo y sondeos de la CASE 1, 2 y 3) entre Mayo de 1998 y Octubre de 1999. En general, la tendencia de estos registros es al ascenso de la interfase y el progresivo avance tierra a dentro del agua salada y de la zona de mezcla. Sin embargo, el mayor ascenso de la zona de mezcla se produce en los afloramientos carbonatados, que constituyen una vía preferencial de flujo frente a los materiales detriticos.

En cuanto a la calidad de las aguas para el consumo humano, ya en los datos de E. Terrón (1983) todos los puntos presentaban valores superiores a los permisibles por la legislación vigente en diversos aniones y cationes, sobre todo nitratos, excepto el punto situado más al norte (2044-6-071). Este punto, ya en la campaña de 1986, presentaba valores superiores a los permisibles debido a su elevada concentración en nitratos. También en 1983 se pone de manifiesto como en algunas fechas las aguas de algunos puntos, relacionados con los afloramientos carbonatados, no son potables al sobrepasarse los contenidos tolerables de ión cloruro.

P. Pulido (2000) en su campaña de muestreo entre Agosto e 1998 y Marzo de 1999 recoge en un cuadro el resumen de los resultados obtenidos:

	Cond.	Temp.	pH	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	B
Tamaño muestra	160	156	148	160	160	160	160	99
Máximo	55500	30,5	8,20	20493,2	18,0	541,2	388,5	4,56
Mínimo	643	15,8	7,02	23,5	3001,0	214,0	2,4	0,002
Media	20459	20,5	7,38	7683,0	1123,0	315,8	44,0	1,13
Mediana	10345	20,7	7,30	3387	625,5	321,6	36,8	0,37
Varianza	4,1 E8	2,60	0,025	6,6 E7	1,1 E6	2691,1	2773	1,63
Desviación Típica	20384	1,61	0,16	8111	1056	51,9	52,7	1,28
Asimetría	0,44	1,71	1,46	0,46	0,51	0,48	3,81	0,99
C. V. Pearson (%)	99,6	7,86	2,15	105,6	94,07	16,42	119,8	112,5

Se puede observar un valor máximo de contenido en nitratos, de 388,5 mg/l, muy por encima de los 50 mg/l permitidos por la legislación española. Los únicos puntos con contenidos admisibles son los situados en sectores del acuífero no cubiertos por invernaderos, en el sector de cabecera y en los afloramientos carbonatados al oeste de la rambla del Sotillo. En los perfiles verticales realizados en los afloramientos carbonatados, el contenido en nitrato desciende hacia abajo rápidamente, debido a procesos de reducción en profundidad y, sobre todo, a la alimentación por agua de mar, cuyo contenido en nitrato es muy reducido. En el acuífero detrítico, el contenido en nitrato en un perfil vertical, desciende en el sentido del flujo (P. Pulido, 2000).

Estas altas concentraciones de nitratos están provocadas por los retornos de riegos en los invernaderos situados en la Vega de Castell y en el sector costero.

En cuanto a la calidad de las aguas para riego, en los muestreos realizados hasta 1984, solo el 2044-6-006 presentaba un muy elevado peligro de salinización y medio de alcalinización de suelo, mientras que los restantes puntos cercanos a la costa presentaban peligro medio a elevado de salinización y bajo peligro de alcalinización. Por último, en el punto situado más al norte (2044-6-071), el peligro de salinización era moderado y bajo el de alcalinización del suelo (ITGE 1992).

A partir de los muestreos realizados en 1989, sólo el punto 2044-7-001 presentaba una calidad aceptable para regadío. Los puntos situados más cerca de la costa en el sector de la rambla del Sotillo, presentaban muy elevado peligro de salinización y elevado peligro de alcalinización, y los dos puntos situados más al norte presentaban elevado peligro de salinización del suelo (ITGE 1992).

6.- ANÁLISIS PREVIO DEL FRENADO DE LA INTRUSIÓN MARINA

6.- ANÁLISIS PREVIO DEL FRENADO DE LA INTRUSIÓN MARINA

La intrusión marina en el acuífero costero de Castell de Ferro presenta una gran variación en cuanto a su magnitud y orientación a lo largo del tiempo. Se pueden observar diferencias entre distintos años, según el régimen de precipitaciones, e incluso variaciones mensuales en un mismo año, según el volumen de explotación de las aguas subterráneas. Esta situación hace que el estudio de esa intrusión, así como el análisis de su frenado, sea complejo.

En general se pueden distinguir dos vías preferentes por las que se produce la entrada de agua procedente del mar:

- A través del cerro calizo de Castell de Ferro se produce el avance de la intrusión marina gracias a la alta transmisividad que presentan esos materiales (unos 30000 m²/día, según M. L. Calvache, 1991). Además, esa transmisividad es mayor que la de los materiales del aluvial (entre 300 y 10000 m²/día, según M. L. Calvache, 1991), por lo que el avance de la intrusión se produce con una mayor velocidad. Por estos motivos no se debe considerar este afloramiento como un límite impermeable, como numerosos autores consideran al realizar mapas de isopiezas de la Vega de Castell, pues en realidad existe una continuidad entre estos y los materiales del aluvial.

Este avance de la intrusión marina, se ve favorecido por los numerosos bombeos que existen al oeste del cerro, que deprimen los niveles

piezométricos en el aluvial, llegando a estar por debajo de la cota cero, produciendo un flujo hacia ellos del agua del mar, a través del cerro calizo.

Esta intrusión no presenta una continuidad ni en el tiempo ni en el espacio, debido a que está influenciada por el régimen de precipitaciones, el volumen de extracciones y, en los últimos años, por los trasvases de agua. Por estos motivos existe una variación temporal de los niveles piezométricos y de la salinidad del agua, y no se puede hablar de un frente continuo de agua procedente del mar. Lo que sí es evidente, es que cualquier medida encaminada al frenado de la intrusión, debe tener en cuenta el cerro calizo como una vía importante de entrada de agua salina que contamina el acuífero en algunas épocas del año.

- La otra entrada de la intrusión marina se produce por la playa del Sotillo, pero no a través de toda ella, si no, preferentemente por una franja, de unos 250 m de ancho, que corresponde aproximadamente con el eje de la rambla del Sotillo desde su desembocadura hasta 1 km en el interior en dirección sureste-noroeste. Esto es debido, posiblemente, a que existan en esa franja materiales con una mayor transmisividad que los del resto del aluvial. Esto permite que exista una vía preferente de entrada de agua procedente del mar.

Al igual que ocurría con el cerro calizo, esta intrusión es variable en el tiempo, y avanza o retrocede según el volumen de extracciones, la cantidad de precipitación y, en los últimos años, de los trasvases. Además, los bombeos que existen en la Vega de Castell producen un descenso de los niveles piezométricos, incluso por debajo de la cota cero, que favorecen la entrada del flujo de agua procedente del mar.

Cualquiera que sea la vía de entrada de la intrusión marina en el aluvial, esta varía en el tiempo, avanzando y retrocediendo según la cantidad de agua bombeada o de la cantidad de precipitación. Estas situaciones se pueden apreciar perfectamente en los diferentes mapas de isopiezas (Figuras 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15), en los de isoconductividades (Figuras 19 y 21) y en los de isocloruros (Figuras 20 y 22). También se pueden observar en algunos de ellos la formación de amplios conos de depresión provocados por los bombeos, que llegan a descender los niveles por debajo de la cota cero. Los más desarrollados y los que alcanzan mayor cota negativa (hasta

-3 m) se sitúan, uno al noroeste y el otro al sudoeste, de la peña carbonatada de Castell de Ferro (Figuras 8, 9, 10, 12 y 13). Estos provocan el avance de la interfase en el sector situado a unos 1500 m de la línea de costa.

La formación de esos conos de depresión provoca un aumento del flujo de agua procedente del mar, con el consiguiente aumento de la salinidad del agua y la contaminación de los suelos. Esto hace que en determinadas épocas del año algunos de los sondeos sean de muy pobre calidad para el riego y que los suelos presenten un elevado peligro de salinización.

Es significativo que la respuesta de la piezometría a las precipitaciones no es inmediata ni importante, si no que se produce de un modo amortiguado, y con cierto desfase.

En el sector de la vega de Castell de Ferro existen unas suaves oscilaciones del nivel piezométrico, donde en la mayor parte de los puntos aparecen variaciones de unos 50 cm, y sólo aquellos cercanos a los bombeos más importantes alcanzan oscilaciones superiores al metro. En la cabecera, sin embargo, las oscilaciones son mucho mayores, llegando incluso a superar los 12 m de amplitud. Una de las posibles causas es la proximidad del mar y del cerro carbonatado, que podrían amortiguar las oscilaciones producidas en el acuífero detrítico, hecho que no ocurriría si el acuífero estuviese rodeado por materiales impermeables, como ocurre en el sector de cabecera.

La dinámica de la intrusión marina puede resumirse como sigue. El inicio de la intrusión se produce a través de los materiales detríticos, mientras que por los carbonatos sigue saliendo agua dulce. En un estadio más avanzado, la contaminación volumétrica más importante se da a través del cerro carbonatado de Castell de Ferro y mucho menos por el detrítico. El inicio del lavado del acuífero empieza por el detrítico, mientras que por los carbonatos sigue entrando agua salada al sistema. En un momento más avanzado el lavado es más importante a través de las calizas. Así, el flujo hacia o desde el mar es siempre más importante a través del conjunto carbonatado. El material detrítico próximo a la costa no está sometido a un flujo suficiente como para que se produzca un lavado total del agua salina del sedimento.

Calvache (1991) realizó una simulación matemática del proceso de intrusión marina para el periodo comprendido entre Octubre de 1985 y Septiembre de 1988. Las principales conclusiones que obtuvo fueron las siguientes:

- El efecto de una hipotética barrera impermeable alrededor del cerro carbonatado de Castell de Ferro reduciría la entrada de agua salina al sistema desde $0,19 \text{ hm}^3$ a $0,09 \text{ hm}^3$ anuales. No obstante, el resultado más importante sería que las salidas pasarían a producirse fundamentalmente a través del detrítico (de un total de $0,26 \text{ hm}^3$, tan solo $0,03$ se darían a través de los carbonatos), lo cual contribuiría muy satisfactoriamente al lavado del acuífero aluvial.
- A pesar de que el volumen de intrusión marina no es muy importante, la calidad del agua del acuífero detrítico es bastante pobre, hasta el punto de que en el sector central del área simulada nunca se llega a recuperar la calidad propia del agua dulce. Responsable de esto es la existencia del conjunto carbonatado del cerro de Castell de Ferro, intensamente karstificado, que se encuentran en contacto tanto con el acuífero detrítico como con el mar, y a través de los cuales se produce mayor circulación del flujo subterráneo.
- La simulación de un cese de los bombeos en el acuífero de Gualchos indica que se experimentaría un ascenso de hasta 2 m en los niveles piezométricos y se evitaría el proceso de intrusión marina. Sin embargo, el lavado del acuífero detrítico sería muy lento, ya que el aumento de flujo se daría fundamentalmente a través de los carbonatos.
- La interfase agua dulce-agua salada es un plano muy horizontalizado en el sector próximo al límite con el mar, encontrándose tan sólo a 4 m de profundidad a 1 km de la línea de costas. Responsable de esto es, una vez más, la alta transmisividad de los referidos carbonatos.
- Se detecta la existencia de conoides en la interfase bajo los puntos de máximas extracciones, patentes a lo largo de todo el año, aunque menos visibles en la época de mayor intrusión, como consecuencia de la muy generalizada contaminación por agua salada.
- En lo que respecta a la evolución intraanual, no existe una tendencia similar en los tres años simulados.

- En general, el avance de la interfase se produce fundamentalmente en el sector situado a menos de 1500 m de la línea de costa, por ser el área donde se concentran las principales extracciones de agua subterránea.
- La evolución plurianual de la interfase también varía en función del período considerado. Comparando 1986 y 1988 durante el estiaje (Septiembre) se advierte un retroceso de 200 m, sin embargo en la época húmeda, tomando el mes de Marzo como referencia, se produce un avance de 1100 m. Las razones de esta tendencia estriban en el cambio de época de máximas extracciones. Mientras que en 1985-86 se concentran en Septiembre, al año siguiente, 1986-87, aunque lo siguen haciendo fundamentalmente en Septiembre, también se producen en Abril, y en 1987-88, los máximos bombeos tienen lugar definitivamente en Abril.

Como ya se ha explicado en el Balance Hidráulico, no existen aportes significativos procedentes de los afloramientos carbonatados al oeste de Castell de Ferro. Esto es debido, como ya se dijo, a que se ha considerado un espesor en profundidad de los materiales carbonatados muy superior al que realmente tienen. Aunque el contacto de las metapelitas con los carbonatos es irregular y está retocado por numerosas fracturas y fallas, en general se encuentra a profundidades iguales o superiores al nivel del mar. Esto supone un espesor saturado en las rocas carbonatadas pequeño, que supondría que la transferencia de agua subterránea hacia el aluvial sería poco significativa. Por este motivo, estos materiales no suponen una vía de entrada de agua procedente del mar como algunos autores consideran. Aunque algunos mapas de isoconductividades e isocloruros (Figuras 19, 20, 21 y 22) parecen indicar lo contrario, esto es debido a que, como ya se dijo anteriormente, existe una franja de materiales detríticos con una mayor transmisividad que el resto a lo largo del eje de la rambla del Sotillo, próxima al contacto del aluvial con los carbonatos.

Posibilidades de actuación

Si no se toman medidas, el proceso de intrusión marina ya iniciado, podría alcanzar a la totalidad de la zona donde se ubican las principales captaciones. Además, como la principal vía de entrada de aguas salinas al acuífero, así como las salidas del mismo al mar, se producen por los materiales carbonatados del cerro de

Castell de Ferro, el lavado de las sales remanentes en los materiales aluviales se produciría de manera muy lenta, aunque se redujesen las extracciones.

Si tenemos en cuenta que la principal entrada de aguas salinas se produce a través del cerro carbonatado, una barrera impermeable, como indica Calvache (1991), reduciría las entradas de agua del mar, así como las salidas del mismo al mar, su realización sería inviable económicamente debido a la gran extensión por la que se produce esa entrada.

La solución más efectiva y económica, consistiría en la recarga artificial del acuífero mediante las aguas residuales, tratadas previamente, que actualmente van a parar al mar. Esas aguas se cifran, para el total de la población estacionaria, en 0,23 hm³/año (unos 7 l/s continuos), que es la que se dispone de forma permanente. Además, en la época estival, con el aumento de la población en la zona, se tiene un caudal de 0,17 hm³/verano.

Una propuesta de actuación es la que realiza el ITGE en 1996. Calculan la superficie necesaria para poder realizar la recarga en el acuífero a partir de las aguas residuales disponibles. Mediante la carga hidráulica a utilizar, teniendo en cuenta el volumen de aguas residuales disponibles (0,23 hm³/año) obtienen como resultado una superficie de 15 ha. Proponen dos posibles soluciones, que consideran complementarias:

- Un único filtro verde, situado a 2 km aguas arriba de la población de Castell de Ferro (alargado en dirección este-oeste y de 15 ha), capaz de tratar el efluente de 0,23 hm³/año de la población permanente.
- Una recarga costera a través de 3 o 4 zonas de 1 ha cada una (situadas a unos 400 metros aguas arriba de la desembocadura de la rambla), capaces de tratar y recargar 15000 m³/año cada una, es decir, un total entre las cuatro de 0,06 hm³/año.

Aunque estas dos soluciones pudiesen ser efectivas, plantean una serie de problemas. En primer lugar hay que disponer de un espacio bastante amplio que no existe en la zona, que se encuentra totalmente ocupada por invernaderos. Para obtener ese espacio habría que recurrir a expropiaciones que harían aumentar enormemente el coste económico. Pero además se debe disponer de espacio adicional para que la cantidad de materia orgánica que se obtenga se pueda

reprocesar mediante un compostaje simple (apilamiento + humefacción + maduración), como se recomienda en el anterior trabajo. Si a esto se añade el bombeo necesario para distribuir las aguas residuales, hace que el coste de mantenimiento sea también elevado.

Conclusiones y recomendaciones

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, en el presente trabajo se recomienda también como medida para frenar la intrusión marina la recarga artificial del acuífero, aprovechando el volumen de aguas residuales existente en la zona. Pero el modo de hacerlo no sería mediante la colocación de filtros verdes, debido a los problemas económicos y de disponibilidad de espacio que se han comentado anteriormente.

Una posible solución, económicamente viable y que diese un resultado bastante satisfactorio, sería la inyección en el acuífero de las aguas residuales disponibles mediante un sondeo. Si tenemos en cuenta el volumen de aguas residuales disponible, unos 0,23 hm³/año, esto supone un caudal continuo de aproximadamente 7 l/s. Esa agua residual sería previamente tratada en una depuradora para evitar una contaminación en sales, amoníaco y otros componentes de esas aguas.

Al considerar todas las conclusiones a las que se ha llegado en el presente informe, y teniendo en cuenta las dos vías preferentes de entrada del agua salina (cerro de Castell de Ferro y Playa del Sotillo), la colocación más idónea de ese sondeo de inyección sería la que se muestra en la Figura 23. En ella también se representa de forma esquemática la situación de los dos principales conoides de depresión. La entrada de agua procedente del mar está condicionada por esas zonas donde el nivel piezométrico llega a estar por debajo de la cota cero.

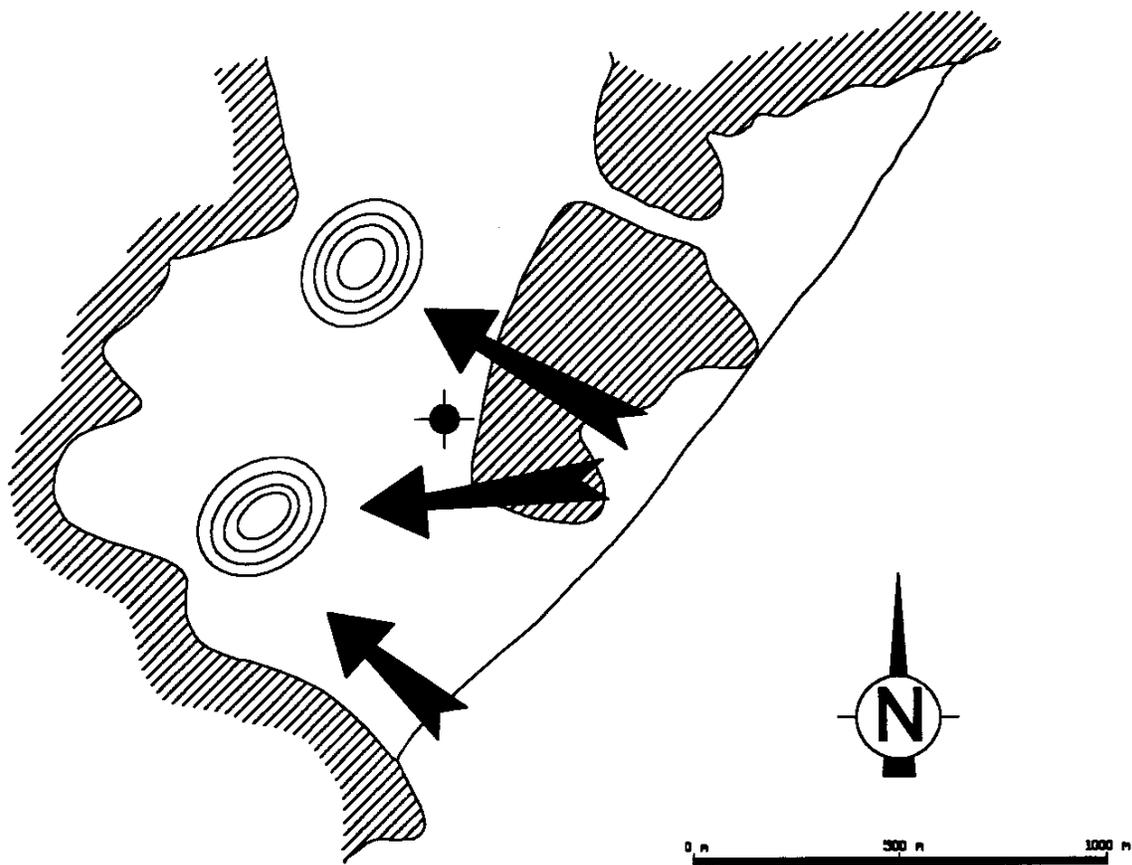
Con la inyección de agua en el punto indicado, se consigue frenar la entrada de aguas salinas por la peña carbonatada y además se obliga al flujo de agua dulce del acuífero a salir a través del detrítico por la playa del Sotillo. Así se frenaría de forma indirecta la intrusión por esa otra vía de entrada.

Con esta medida no solo se consigue crear una barrera contra el avance de la intrusión, si no que se introduce agua de baja salinidad que limpiará los sedimentos del aluvial que han sido contaminados en sales.

Otra posibilidad que se podría tener también en cuenta es la de utilizar las aguas de la depuradora, mezclándolas con aguas de riego, para disminuir así la extracción en la zona costera, mejorando también así la salinidad del agua actual. Como aún quedan por tratar los 0,17 hm³ que se producen en la época estival, ese caudal se podría emplear para mezclarlo con las aguas de riego. Así se conseguiría disminuir una parte de las extracciones en la época estival, que es uno de los momentos en los que se produce una mayor demanda de agua y un empeoramiento del problema de la intrusión.

Además, una reducción de los bombeos mediante la aplicación de mejores sistemas de riego, aumentaría aún más la efectividad de estos filtros verdes.

Para finalizar se puede concluir que más que una única solución al problema de la intrusión, habría que tomar de forma conjunta las medidas comentadas anteriormente, que son complementarias y no excluyentes. Así, la inyección sería más efectiva contra el problema de la intrusión marina.



- 
Situación del sondeo de inyección
- 
Vías de entrada de la intrusión
- 
Principales conoides de depresión

Mapa de situación de la inyección propuesta

7.- BIBLIOGRAFÍA

7.- BIBLIOGRAFÍA

- BENAVENTE, J. (1982): *Contribución al conocimiento hidrogeológico de los acuíferos costeros de la provincia de Granada*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada. 435 p. Granada.
- BENAVENTE, J. (1987): *Consecuencias de la sobreexplotación en el acuífero costero de la rambla de los Gualchos (Granada)*. IV Simposio Nacional de Hidrogeología. 685-696. Palma de Mallorca.
- BENAVENTE, J.; FERNANDEZ-RUBIO, R.; ALMECIJA RUIZ, C. (1988): *Hidrogeología de los acuíferos del sector oriental de la costa de Granada*. Tecnología de la intrusión en Acuíferos Costeros. 171-208. Almuñecar (Granada).
- BENAVENTE, J. Y TERRON, E. (1983): *Características hidroquímicas del acuífero aluvial litoral de Castell de Ferro (Granada)*. Hidrogeología de Recursos Hidráulicos VIII. 229-238. Madrid.
- CALVACHE, M. L. (1991): *Simulación del contacto agua dulce-agua salada en algunos acuíferos de la Costa del Sol*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada. 317 p. Granada.
- CALVACHE, M. L., PULIDO-BOSCH, A. (1993): The influence of sea-water intrusion process of a karstic massif in a detrital system. In: Some Spanish Karstic Acuífers 127-142.

- DEL VALLE, M. (1973): *Estudio hidrogeológico de la finca Playa Rijana (Granada)*. Informe técnico (inédito). Granada.
- INGEMISA (1995): *Obras correspondientes al presupuesto 03/95 de captaciones hidrogeológicas en la costa granadina. Investigación hidrogeológica para la mejora del abastecimiento a Castell de Ferro*. Confederación Hidrográfica del Sur (inédito).
- IGME (1985). *Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (1ª y 2ª fase)*.
- IGME (1987a). *Control de la intrusión marina en los acuíferos costeros de Almuñecar y Gualchos (Granada) durante 1986*. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase). Nota técnica n° 291.
- IGME (1987b). *Control de explotaciones de agua subterránea en los acuíferos detríticos costeros de Motril-Salobreña, Almuñecar y Gualchos (año 1985-86)*. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase). Nota técnica n° 293.
- IGME (1987c). *Control de la calidad de los acuíferos costeros de La Herradura, Almuñecar y Gualchos (Granada) durante 1986*. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase). Nota técnica n° 296.
- IGME (1987d). *Medidas y cálculo de las explotaciones de aguas subterráneas en los acuíferos costeros de Motril-Salobreña, Almuñecar y Gualchos durante el último trimestre de 1986*. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase). Nota técnica n° 308.
- IGME (1987e). *Piezometría del acuífero costero de Gualchos en 1985-86*. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase). Nota técnica n° 310.
- IGME (1987f). *Control de la intrusión marina en los acuíferos costeros de Almuñecar y Gualchos (Granada) durante 1987*. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase). Nota técnica n° 316.
- IGME (1988a). *Control de la calidad de los acuíferos costeros de La Herradura, Almuñecar y Gualchos (Granada) durante 1987*. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase). Nota técnica n° 319.
- IGME (1988b). *Control de las explotaciones de agua subterránea en los acuíferos detríticos costeros de Motril-Salobreña, Almuñecar y Gualchos (observaciones correspondientes al año hidrológico 1986-87)*. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase). Nota técnica n° 319.

-IGME (1988c). *Medidas y cálculo de las explotaciones de aguas subterráneas en los acuíferos costeros de Motril-Salobreña, Almuñecar y Gualchos durante el último trimestre de 1987*. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase). Nota técnica nº 325.

-INGEMISA (1995): *Obras correspondientes al presupuesto 03195 de captaciones hidrogeológicas en la costa granadina. Ensayo de bombeo en Cala Rijana (Castell de Ferro)*. Confederación Hidrográfica del Sur (inédito).

-ITGE (1988). *Piezometría del acuífero costero de Gualchos en 1987*. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase). Nota técnica nº 331.

-ITGE (1989a). *Piezometría del acuífero costero de Gualchos en 1988*. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase). Nota técnica nº 345.

-ITGE (1989b). *Control de explotaciones de agua subterránea en el acuífero de Gualchos durante el año hidrológico 1987-88*. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase). nota técnica nº 346.

-ITGE (1989c). *Control de limnigrafos en el acuífero costero de Gualchos. Resumen de las observaciones correspondientes al período 1983-84/1987-88*. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase). Nota técnica nº 347.

-ITGE (1989d). *Cálculo de lluvia útil (según Thornthwaite) en las estaciones de: Almuñecar, Salobreña, La Mamola, Lentegí y Motril*. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes (3ª fase). Nota técnica nº 353.

-ITGE (1990). *Control de la explotaciones de agua subterránea en el acuífero de Gualchos durante el año hidrológico 1988-89*. Proyecto de actualización infraestructura, vigilancia y catálogo de acuíferos. Años 1988, 1989 y 1990. Bloque 3. Cuenca del Guadalfeo. Axarquía. Nota técnica nº 357.

-ITGE (1991a). *Evolución de la calidad hidroquímica en los acuíferos detríticos costeros de la provincia de Granada (La Herradura, Almuñecar, Castell de Ferro y Motril-Salobreña) durante los años 1987-88 y 1988-89*. Proyecto de actualización infraestructura, vigilancia y catálogo de acuíferos. Años 1988, 1989 y 1990. Bloque 1. Redes de control. Cuenca Sur-Sector Occidental. Nota técnica nº 366.

- ITGE (1991b). *Control de limnigrafos en los acuíferos costeros de la provincia de Granada (Almuñecar, Motril-Salobreña y Castell de Ferro) durante el año 1988-89*. Proyecto de actualización infraestructura, vigilancia y catálogo de acuíferos. Años 1988, 1989 y 1990. Bloque 3. Cuenca del Guadalfeo. Aixarquía. Nota técnica n° 369.
- ITGE (1991c). *Control de extracciones de agua subterránea en el acuífero de Castell de Ferro durante el año hidrológico 1989-90*. Proyecto de actualización infraestructura, vigilancia y catálogo de acuíferos. Años 1988, 1989 y 1990. Bloque 3. Cuenca del Guadalfeo. Aixarquía. Nota técnica n° 370.
- ITGE (1992): *Acuífero costero de Castell de Ferro. Síntesis de estudios realizados, situación actual y perspectivas futuras*. Nota técnica n° 394.
- IGME (1996): *Estudio de las posibilidades de depuración de aguas residuales mediante instalación de filtros verdes en Almuñecar y Castell de Ferro*. (inédito).
- PULIDO, P. A. (2000): *Contribución al conocimiento de acuíferos costeros complejos. Caso de Castell de Ferro*. Tesis Licenciatura, Universidad de Granada (inédita). Granada.
- TERRÓN, E. (1983): *Estudio hidrológico e hidroquímico de las ramblas Ancha y de Gualchos (Granada)*. Tesis Licenciatura, Universidad de Granada (inédita). Granada.



LEYENDA

CUATERNARIO		5		LITOLÓGICAS		PERM.
SUPERIOR		1		4.- Aluvial de la Rambla de Guadalef. (Fluviolacustrino de Oriva)		Alto
MEDIO		2		COMPLEJO ALPEARRRE:		Alto
INFERIOR		3		2.- Formación carbonatada del Monte de Marías. (Monte de Liérez)		
PALEOZOICO		1		1.- Formación metapelítica. (Monte de Marías) 2.- Bacia de Kala		Bajo

----- Contacto discordante
 - - - - - Contacto mecánico
 → Dirección y sentido aproximado del flujo subterráneo
 ◆ 58 Sondeo
 ◆ 74 Pozo
 0 100 200 300
 Escala en metros División en hajas y sectores

		DIRECCION DE AGUAS SUBTERRANEAS Y GEOTECNIA	
PROYECTO MEJORA DEL CONOCIMIENTO HIDROGEOLOGICO DE LOS ACUIFEROS DE LA CUENCA DEL GUADALEF Y SECTORES COSTEROS ADYACENTES PARA LA INTEGRACION DE SUS RECURSOS EN LOS ABASTECIMIENTOS PUBLICOS. 1997-98-99.			
DENOMINACION CARTOGRAFIA HIDROGEOLOGICA DE LA U.H. 06.20 "CARCHUNA-CASTELL DE FERRO"			PLANO N° 1
FECHA Octubre 1.999	COMPROBADO J.C. Rubio A. 5092962	AUTOR	ESCALA 1/50.000
		CONSULTOR 	