



Instituto Geológico y Minero de España

Palma de Mallorca, junio de 2017



**Estudio geoambiental y análisis de parámetros  
hidráulicos en el acuífero ubicado en la zona prevista  
para la construcción de la depuradora, las  
urbanizaciones de Cala Pi, Vallgornera, Es Pas y zonas  
adyacentes, para la viabilidad de construcción de  
alcantarillados específicos y sistemas individuales de  
aguas fecales en Luçmajor, Mallorca**



Índice

Introducción.....3

Antecedentes y objetivos.....4

Zona de estudio.....6

Marco geológico.....7

Estructura geológica del área de Lucmajor.....14

Geología de la Plataforma de Lucmajor.....16

Marco hidrogeológico.....23

Hidrogeología en la Plataforma carbonática de Lucmajor.....25

Hidrogeología en la zona de las urbanizaciones de Cala Pi, Vallgornera, Es Pas y zonas adyacentes.....27

Zona vadosa.....32

Zona freática.....35

Características de los ensayos, pozos de bombeo y piezómetros de observación.....39

El endokarst de la Plataforma de Lucmajor.....48

Significancia de la relación hidrogeológica de la Cova des Pas de Vallgornera.....49

Estudios geofísicos en el entorno de la Cova des Pas de Vallgornera.....53

Discusión.....74

Conclusiones.....76

Recomendaciones.....78

Referencias.....82

### Introducción

Con fecha 24 de abril de 2017 el Ayuntamiento de Luçmajaor solicitó al IGME un informe científico-técnico relativo al acuífero ubicado bajo las urbanizaciones de Cala Pi, Vallgornera y es Pas, así como a la viabilidad de la construcción de alcantarillado y fosas sépticas en dichas urbanizaciones, con el fin de conocer el impacto que puede tener sobre la Cova des Pas de Vallgornera, Lugar de interés Comunitario y Zona de Especial Protección, dentro de la Red Natura 2000 (LIC Núm: ES5310049, D.92/43/CEE. Decisión de la Comisión de 18 de noviembre de 2011, por la que adopta la quinta lista actualizada de lugares de importancia comunitaria de la región Biogeográfica Mediterránea). Para ello, además de una inspección técnica sobre el terreno sobre el desarrollo kárstico de algunas fracturas y cavidades en los primeros dos metros de la zona vadosa del área de estudio, se realizó un ensayo de bombeo en el pozo de la Finca Capocorb Vell (figura 1), al norte de la zona de estudio, con el que se pudieron determinar con precisión las características hidráulicas del acuífero en el área donde se ha previsto ubicar la depuradora.

Durante este trabajo, se constató que una gran parte del sector de las urbanizaciones está construidas sobre las facies de frente arrecifal y lagoon externo del Mioceno superior, muy porosas y permeables, con zonas de cavernamiento muy cercanas a la superficie del terreno distribuidas con elevada heterogeneidad lateral y vertical. Este hecho, unido a otros elementos de inestabilidad que se observaron en ciertas zonas del frente acantilado donde se ubican las urbanizaciones, junto con la revisión del diferentes estudios geofísicos como tomografías eléctricas y georadar, que el Ayuntamiento de Luçmajaor facilitó al IGME para la realización de este informe.

Para la realización de este trabajo se plantearon tres líneas de trabajo paralelas:

En los dos informes se establecía en sus conclusiones lo siguiente:

Con fecha de 9 de enero de 2010 la Federación Balear de Espeleología, en colaboración con la Conselleria de Medi Ambient del Govern de les Illes Balears, solicitó al IGMF un informe técnico para el asesoramiento en la instalación de una red sensores en la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca) para el control de los parámetros ambientales frente a la futura construcción de la red de alcantarillado en las urbanizaciones de es Pas y Vallgornera. Posteriormente, a instancias del Ayuntamiento de Llucmajor el 9 de enero de 2014, este Organismo realizó un informe para delimitar el perímetro de protección de la Cova des Pas de Vallgornera, con el fin de implementar y regular actuaciones que puedan ejercer un elevada presión ambiental sobre la cueva y que esta pueda conservarse de acuerdo con los criterios establecidos por la Directiva Hàbitats para la Red Natura 2000.

### Antecedentes y objetivos

1. Desarrollo e interpretación de un ensayo de bombeo en el pozo más cercano a la parcela donde está previsto ubicar la depuradora.
2. Estudio hidrogeológico del bloque que comprende las zonas adyacentes de Cala PI, Es Pas y Vallgornera.
3. Zonación del acuífero de Cala PI en relación al análisis de la vulnerabilidad.
4. Revisión de las prospecciones geofísicas realizadas en las urbanizaciones y de Cala PI, Es Pas y Vallgornera.

1. La construcción de una red de alcantarillado que discurre en parte sobre de La Cova des Pas de Vallgornera en el municipio de Luçmajor, Mallorca, presenta un elevado riesgo de alteración del equilibrio natural de la misma, tanto en el proceso de ejecución de la obra como en las posteriores incidencias que el agua de la red pueda causar en la cavidad si se producen infiltraciones.
2. La construcción de la red de alcantarillado podía provocar derrumbamientos del techo y paredes de la cavidad y la destrucción parcial del valioso conjunto de espeleotemas que posee la cavidad.
3. Que la infiltración de agua del alcantarillado si se producen pérdidas puede dar lugar a la contaminación de las aguas del acuífero y un cambio en la química del agua, así como en la modificación de los parámetros ambientales de la atmósfera de la cueva.
4. Que en caso de ser construido, este debe ser absolutamente efectivo y estanco, evitando riesgos de filtraciones a la cavidad que impida las posibles filtraciones al subsuelo y supongan la contaminación y modificación del quimismo de las aguas de la cavidad y de los parámetros ambientales de la atmósfera de la cueva.
5. Que la construcción de fosas sépticas estancas en las viviendas, con un mecanismo de evacuación seguro en el conjunto de las urbanizaciones de Cala Pi, Vallgornera y Es Pas (zona de protección integral) impida filtraciones al subsuelo y por consiguiente, la contaminación de las aguas endokársticas de la cavidad y la modificación de los parámetros ambientales de la atmósfera de la cueva.
6. Que la ejecución de cualquier obra urbana sea evaluada con anterioridad por un técnico especialista de forma que se garantice la

Las urbanizaciones de Cala Pi, Vallgornera y Es Pas se sitúan al sur de la isla de Mallorca, en el término municipal de Luçmaior. Se trata de tres núcleos urbanos que lindan al sur con la costa acantilada en un perímetro de más de 5 km. El área total que ocupan los tres núcleos es de aproximadamente 1,4 km<sup>2</sup>, con una longitud de 1,2 km y una anchura de aproximadamente un 1 km de longitud en su sector más este (Vallgornera) y mínima de 100 m el sector más oeste (Cala Pi). Cuenta con 18 km de red viaria que articulan un conjunto de

### Zona de estudio

la Galería Negra. Con fecha 2 de mayo 2017, el IGME solicitó al SEPRONA mediante oficio, copia de los resultados correspondientes a las muestras tomadas para determinar la contaminación de las aguas subterráneas en La Cova de Pas de Vallgornera, tomadas el 19 de octubre de 2016 por agentes de dicho organismo, a petición del Servicio de Agentes de Medio Ambiente. El muestreo consistió en la recogida de cuatro muestras líquidas (A, B, C y D); la primera en las aguas endokársticas de la entrada de la cueva y, el resto, en las aguas de

de acuerdo con los estudios realizados desde este organismo. Todo ello ponía de relieve el previsible riesgo que implica la construcción de una red alcantarillado en las urbanizaciones de Cala Pi, Vallgornera y es Pas,

estabilidad del techo y de las paredes de la cavidad y así, se impida la destrucción parcial del valioso conjunto de espeleotemas que posee la cavidad. Las obras deben acometerse bajo el control de los parámetros ambientales de la cavidad, analizando si existen cambios en los indicadores ambientales de la cueva como son la temperatura, la humedad o CO<sub>2</sub>.



viviendas plurifamiliares y unifamiliares de uso residencial y turístico (figura 1)

Toda el área de estudio está determinada por la ubicación.

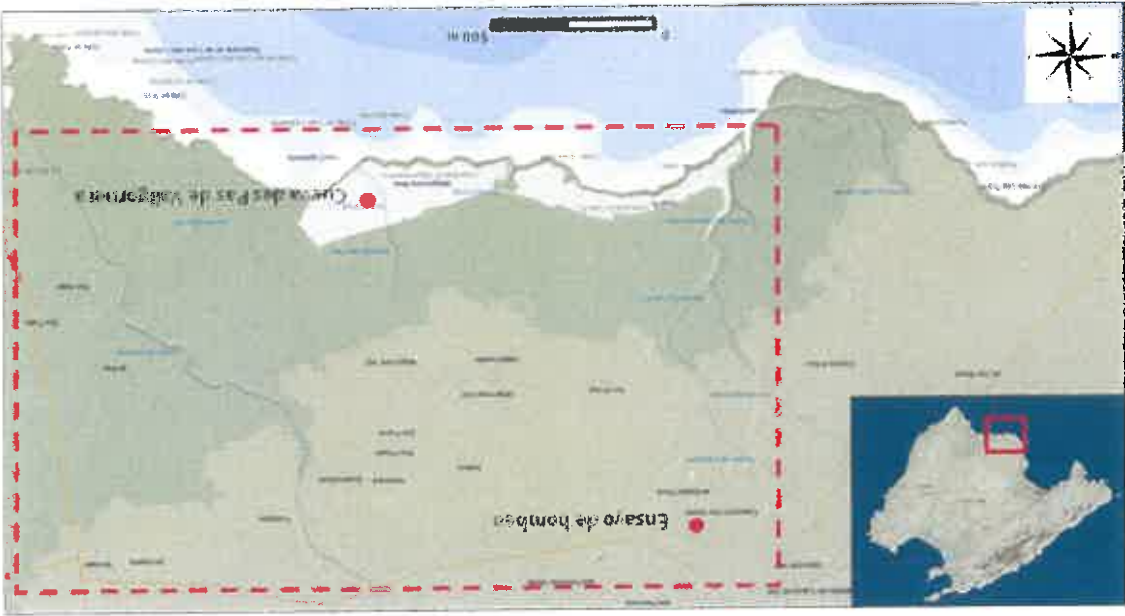


Figura 1. Localización del área objeto de estudio, en las que se ha realizado un ensayo de bombeo y el estudio de los acuíferos adyacentes a la Cova des Pas de Vallgornera.

### Marco geológico

Las Islas Baleares corresponden a la parte emergida del Promontorio Balear, que ha sido interpretado como la prolongación hacia el NE del Sistema Bético Externo (Gelabert, 1998). El Promontorio Balear está limitado por la Cuenca Lliguro-Provenzal al NE, por una serie de fallas normales activas al SE, consecuencia de la formación de la Cuenca Argelo-Balear, y hacia el NO por el Surco de Valencia donde la corteza continental en esta zona está adelgazada (Roca, 1992).

### Geología de Mallorca

La isla de Mallorca está constituida por diversas unidades morfoestructurales, que se corresponden con un conjunto alternativo de *horsts* y *grabens*,

asociados fisiográficamente los primeros a las sierras y los segundos a los llanos. Las zonas elevadas son: la Serra de Tramuntana al NE, les Serres de Llevant al SE y las Serres Centrals, en la zona central de la isla. Las zonas deprimidas se disponen entre los relieves principales: la cuenca de Campos y la cuenca de Palma-Inca-Sa Pobla. Estas unidades son el resultado de la compartimentación por fallas normales listricas con desplazamientos kilométricos, de edad Mioceno superior, con una orientación NE-SO consecuencia de la distinta posición estructural de los bloques limitado por fallas, de su composición litológica y de su exposición en el modelado del relieve (Gelabert, 1998). Su representación litoestratigráfica abarca desde el Paleozoico hasta el Cuaternario.

Los bloques elevados de las Serres de Tramuntana y Llevant se corresponden a *horsts* con orientación NE-SO. La estructura interna de estas sierras muestra una imbricación tectónica, vergente al NO, aunque con estructuras de rampa lateral en las Serres de Llevant producto de la fase compresiva ocurrida durante el Mioceno Medio (Sabat, 1986). La serie estratigráfica que las componen incluye sedimentos paleozoicos, triásicos, mesozoicos y terciarios. Entre el Cretácico superior y el Paleógeno inferior aparece un hiato. Las calcarenitas marinas y los conglomerados aluviales del Eoceno superior y Oligoceno muestran importantes variaciones de espesor. Los depósitos del Mioceno inferior y medio se superponen en discordancia angular sobre los materiales anteriormente descritos y, todos ellos, se hallan implicados en las estructuras compresivas.

Las cubetas neógenas corresponden a áreas actualmente deprimidas identificadas como cuencas subsidentes (*semi-grabens*), cuyo relleno sedimentario abarca desde el Mioceno superior, Plioceno y Cuaternario (Gelabert, 1998) a excepción de la cuenca de Campos que está formada únicamente por materiales de la plataforma carbonática miocena.



La estratigrafía de la Isla de Mallorca en su conjunto abarca desde materiales del Carbonífero hasta el Holoceno. Litológicamente, las unidades que conforman Mallorca se caracterizan por el dominio de materiales sedimentarios carbonatados, fundamentalmente calizas y dolomías, con escasa presencia de sedimentos metamórficos e ígneos. Los ambientes de deposición son diversos, desde facies de tipo eólico y lacustre, pelágicas, pasando por facies de plataforma abierta y talud. Esta diversidad está estrechamente relacionada con episodios tectónicos que junto que los marcos sedimentarios dieron lugar a la litografía actual de la isla.

#### *Litografía de la Isla de Mallorca*

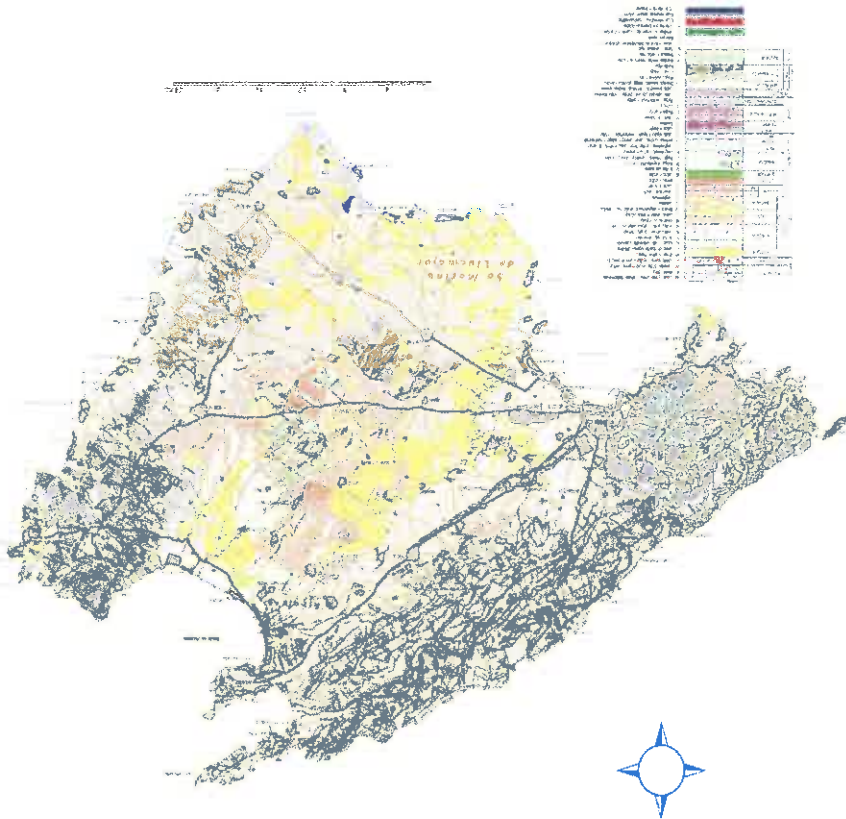
Las plataformas del Mioceno superior solapan los márgenes de los horsts, sobre los cuales progradan desde la zona central hacia el S. La plataforma de Lucmañor se extiende hacia el SE en la actual cuenca de Campos y hacia el NO, en forma de estrecha plataforma, rodeada de la cuenca de Campos por Marratxí, Porto-Pi, Palma-Nova hasta Portals Vells-Cala Figuera. Desde el horst de las Serres de Llevant estas plataformas progradaron hacia el SE, pudo bordear los paleorelieves que hoy conforman el archipiélago de Cabrera (Pomar y Ward, 1991; Pomar *et al.*, 1996)

Los sedimentos miocenos sinorogénicos de Mallorca se disponen discordantes sobre el Paleógeno o Mesozoico. En este primer grupo se distinguen seis unidades diferentes. La Formación Calcarenítica de Sant Elm esta compuesta por calizas bioclásticas, depósitos conglomeráticos, calizas arrecifales y niveles de paleosuelos (Pomar *et al.*, 1986). Presenta un espesor de 40 m y aflora en la zona más meridional de la Serra de Tramuntana. Su sedimentación se atribuye a un ambiente de plataforma somera y en medios litorales, con pequeños aportes de sedimentos terrígenos. La presencia de rocas volcánicas descritas por Wadsworth y Adams (1989) ha permitido datar esta unidad al

Depósitos sinorogénicos

*Mioceno*

Figura 2. Mapa geológico de Mallorca (IGME, 2003)



*[Handwritten signature]*

Burdigaliense (Mioceno inferior). La Formación Turbídica de Banyalbufar y la Unidad Calizas de Randa se disponen discordantes sobre la anterior o sobre el sustrato mesozoico y paleógeno (Rodríguez-Perea, 1984; Pomar y Rodríguez-Perea, 1983). Están compuestas por margas grises con fauna planctónica situando estas unidades entre el Burdigaliense superior-Langhiense (González-Donoso *et al.*, 1982). Presentan una estratificación muy definida con intercalación de niveles de conglomerados, calcarenitas y brechas. En las Serres Centrales pasan a techo a calcarenitas con algas rojas, dispuestas en varios ciclos turbídicos de grano grueso (Pomar *et al.*, 1986). En La zona de Tramuntana alcanzan espesores los 450 m en los surcos de antepais relacionadas con el emplazamiento de los cabalgamientos los cuales truncan el límite superior de esta secuencia. En su conjunto se interpreta como turbiditas depositadas durante el emplazamiento de los cabalgamientos (Gelabert, 1988).

El Complejo Terrigeno Marginal, La Margas de Pina y Las Calizas de Son Verdera registran los últimos pulsos de compresión miocena (Ramos *et al.*, 2001). Están dispuestos de forma discordante sobre las unidades anteriores y afloran en la zona central de la isla con espesores muy variables. El Complejo Terrigeno Marginal está formado por conglomerados y limos rojos en los márgenes de las cuencas. Localmente se observan paleosuelos que se interdigitan con las Margas de Pina. Esta unidad aflora en la zona central de Mallorca aunque en sondeos se han descrito espesores superiores a los 500 m. Presenta una serie formada por margas grises con niveles de areniscas, carbón y yesos atribuidos al Serravaliense (Mioceno medio) (Oliveros *et al.*, 1960). Su ambiente de deposición se interpreta como depósitos de llanura fangosa evaporítica y períodos lacustres de aguas salobres poco profundas. Concordante sobre esta unidad se disponen. Las Calizas de Son Verdera, formada por calizas algales e intercaladas con margas grises ferroguminosas formadas en ambientes palustres y lacustres de aguas salobres (Ramos *et al.*, 2000).

Depósitos postorogénicos

Están divididos en diversas unidades de ambientes distintos, algunas de las cuales se disponen en cuencas subsidentes entre las sierras y otros, como plataformas carbonáticas arrecifales.

La Unidad Calcisistitas con Heterostegina se dispone discordante sobre el basamento y puntualmente aflora en el sector meridional de Mallorca, aunque en sondeos han sido descritos depósitos que superan los 200 m de espesor (Pomar *et al.*, 1986). Está formada por calcarenitas y calcisistitas con foraminíferos, equínidos y algas rojas, muy bioturbados. Se interpretan como depósitos de rampa carbonática (Pomar *et al.*, 1996; Pomar, 2001).

Recubriendo esta unida de forma concordante o sobre el basamento se dispone el Complejo Arrecifal. Se trata de una plataforma arrecifal progradante que aflora en los acantilados de la costa sur de Mallorca (Marina de Luçmajor). Lo constituyen cuatro asociaciones de facies características de este tipo de plataformas: facies de plataforma abierta o cuenca poco profunda, facies de talud arrecifal, facies de *lagoon* y facies de frente arrecifal (Pomar y Ward, 1999; Pomar *et al.*, 1996). Su edad se ha estimado a partir de dataciones absolutas de sanidina y biotita en Tortoniense superior-Messiense (Mioceno superior) (Pomar *et al.*, 1996).

Equivalentes a esta Unidad se han descrito las unidades Calizas de Santanyí, Margas de la Bonanova y Calizas del Pont d'Inca. Las Calizas de Santanyí están formada por depósitos submareales y supramareales (estromatolitos y colitos) (Fornós y Pomar, 1983). Las Margas de la Bonanova se corresponden con abanicos delticos compuesto por margas con fauna litoral que pasan a techo a limos rojos y conglomerados (Fornós y Pomar, 1983) (Ver parte II).

### *Plioceno*

Este periodo aflora escasamente en los márgenes de las cuencas de Palma e Inca-Sa Pobla. Su espesor máximo observado es de 370 m en las zonas centrales de las cuencas. Se dispone sobre los materiales miocenos y destacan las Formaciones de Calcisistitas de Son Mir y las Calcarentas de Sant Jordi (Barón y Pomar, 1985). Las Calcisistitas se asocian a depósitos marinos someros constituidos, como su nombre indica, por calcisistitas azuladas de edad Zancliense (Colom, 1975). Las calcarenitas, con espesores entorno a los 70 m compuestos por calizas bioclásticas correspondientes a ambientes litorales de dunas y playas. Afloran en el margen sureste de la cuenca de Palma cerca de la localidad de Algaida, entre Palma y Lluçmajor.

### *Cuaternario*

Los estudios sobre el Cuaternario de Mallorca ya sea desde la paleontología, la estratigrafía o análisis integrados en un marco paleogeográfico han sido múltiples. Entre todos ellos destacan Butzer y Cuerda (1962) y Cuerda (1975) quien describe detalladamente desde el tránsito plio-cuaternario hasta el Pleistoceno superior, a partir de depósitos litorales, eólicos y marinos, relacionado fósiles marinos y continentales.

Es un periodo subdividido a grandes rasgos en dos grandes estadios: Pleistoceno y Holoceno, abarcando un intervalo de tiempo de 2,58 millones de años aproximadamente, aunque el Holoceno únicamente representa 10.000 años.

### *Pleistoceno*



El Pleistoceno de Mallorca está caracterizado por los numerosos cambios climáticos, asociados a etapas glaciares (frías) e interglaciares (templado y cálido). La ciclicidad de estas etapas provocó numerosas fluctuaciones eustáticas, con las consiguiente implicaciones en el registro sedimentario, destacando tanto depósitos litorales colgados en acantilados (con cotas desde 90 m atribuidos al Pleistoceno inferior, hasta otros entre 1 y 4 m s.n.m. y datados como Pleistoceno superior) (Cuenda, 1975). El Pleistoceno destaca por la alternancia de dichos depósitos con formaciones eólicas dunares que recubre las zonas adyacentes a la Bahía de Palma, Alcudia, Pollença y gran parte de la costa del sur, este y noreste de Mallorca.

### **Estructura geológica del área de Luçmajor**

Las direcciones de las estructuras alpinas del área de Luçmajor tienen una orientación dominante NE-SO. El contacto entre los materiales que conforman el Macizo de Randa y la plataforma de Luçmajor está solapado por sedimentos cuaternarios. Sin embargo el macizo de Randa puede interpretarse como un horst limitado por fallas normales NE-SO en los sectores occidental y oriental, y NO-SE en los sectores meridional y septentrional. Debido a que la gran mayoría de la plataforma arrecifal está cubierta por sedimentos cuaternarios, y que además existe una gran cantidad de campos de cultivo en toda el área, los afloramientos de esta zona se limitan, básicamente a los acantilados costeros. En estos acantilados se observa que los materiales del Mioceno superior presentan una fracturación relativamente elevada, con una dirección dominante de NE-SO. Los materiales están dispuestos de forma subhorizontal y, en discordancia sobre ellos se encuentran los depósitos cuaternarios, que presentan poca deformación y fracturación.

En Cap Enderrocats las dunas Pliocuaternarias solapan una parte más oriental de la plataforma carbonatada. En esta costa se observan materiales de



En la zona de Bahía Azul las fracturas afectan a los materiales Miocenos y a las eolianitas Pliocuaternarias sin observarse componente de desplazamiento destacable. Hacia e SE en la zona de Punta Roja aflora una falla de grandes dimensiones que afecta al conjunto materiales arrecifales del Mioceno superior, sellada a techo por las eolianitas Pliocuaternarias (IGME, 2005). Se trata de una falla con un componente en dirección de tipo horizontal con un sentido del desplazamiento dextral. Debido a que los afloramientos en superficie en la plataforma son escasos se ha correlacionado la información obtenida con datos de sondeos. Los datos obtenidos indica que el basamento está a más profundidad en la zona del núcleo urbano de Luicmajor en comparación con el área más hacia al oeste (del orden de 50 m de diferencia). La información de los sondeos también permite observar que el Plioceno solo está presente en la zona al oeste de Bahía Azul y el Pleistoceno también aumenta su potencia hacia el oeste. Este hecho corrobora supuesto levantamiento diferencial del bloque central de la plataforma con relación a sus bordes. Pomar y Ward (1999) deducen que la estructura de Punta Roja comentada anteriormente produce un desplazamiento en la horizontal de las facies del Mioceno superior que podría ser del orden de 1 km.

En el piedemonte discordantes sobre las dunas y el Mioceno (IGME, 2005). En el sector de Ses Olles los materiales Miocenos están delimitados por fracturas NE-SO con una componente de desplazamiento en la vertical y la horizontal (IGME, 2005). Un número importante de fracturas están cubiertas por dunas Pliocuaternarias o materiales holocenos lo que dificulta la correlación entre las facies miocenas de los bloques adyacentes, y por tanto, determinar el movimiento de las mismas. Sin embargo, la forma de la costa permite trazar lineamientos y fracturas, que en general, se orientan en dirección N 60° E (NE-SO) (IGME, 2005 y 2013).

La Plataforma de Lluçmajor se ubica el sur de Mallorca, es la más extensa de las Islas Baleares y en la que aflora con más claridad el Complejo Arrecifal. El análisis estratigráfico de la plataforma carbonática de Lluçmajor muestra peculiaridades muy definidas. La plataforma presenta un registro sedimentario muy nítido en relación a las fluctuaciones del nivel del mar. Pueden reconocerse dos fases dentro de cada uno de los ciclos sedimentarios principales en respuesta a las oscilaciones marinas: uno inferior, caracterizado por la agradación de todos los cinturones de facies que se forman durante las fases de ascenso del nivel del mar y durante el nivel del mar alto y, un paquete superior caracterizado por la progradación de los cinturones de facies formado durante las fases de descenso del nivel del mar y nivel del mar bajo.

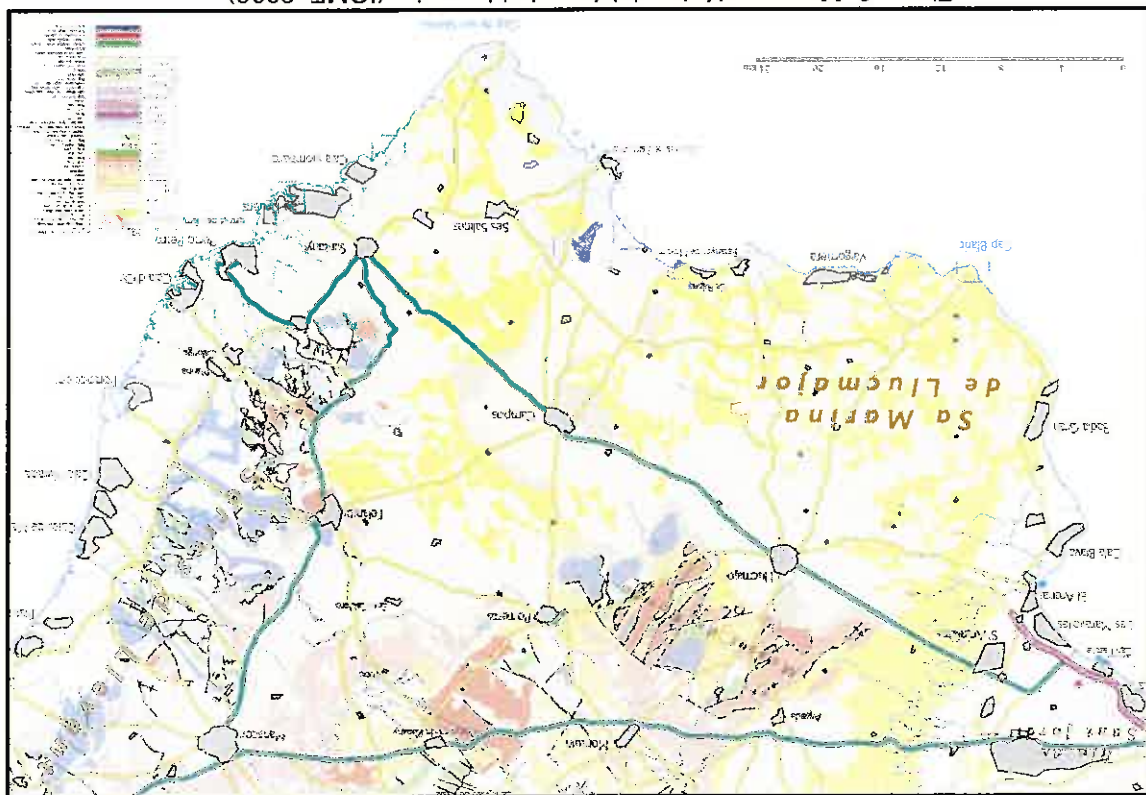
Los arrecifes del Mioceno superior de las Islas Baleares se desarrollan cerca del límite norte de crecimiento arrecifal del Mediterráneo occidental. Durante el Mioceno superior los complejos arrecifales se desarrollan en aguas poco profundas alrededor del Archipiélago Balear, con mayor desarrollo en el margen sur. La progradación de las plataformas carbonáticas arrecifales de Mallorca, se produjo alrededor de dos paleoislas. Se disponen discordantes tanto sobre la Unidad Calcisilitas con *Heterostegina* como sobre otros depósitos terciarios.

En la plataforma de Lluçmajor afloran básicamente materiales Cuaternarios (limos y conglomerados rojos y eolianitas) y rocas del Mioceno superior (calizas arrecifales). En el macizo de Randa afloran materiales anteriores al Mioceno medio muy deformados por la orogenia alpina. No obstante, los materiales arrecifales son los predominantes en esa región geológica.

## Geología de la Plataforma de Lluçmajor

La plataforma de Luçmaçor coincide con el dominio geomorfológico del la Marina de Luçmaçor tiene un perímetro de costa de 20 km aproximadamente con alturas de superiores a 90 m en algunas zonas. Las rocas que forman la plataforma de Luçmaçor corresponden a una unidad litostratigráfica: el Complejo Arrecifal, recubierta discontinuamente por eolianitas del Pleistoceno. Entre estos acantilados afloran en tres dimensiones y con gran detalle la arquitectura de facies del Complejo Arrecifal (Pomar y Ward, 1991; Pomar *et al.*, 1996). Su posición cronoestratigráfica, atribuida al Tortonense-Messinense, se ha determinado en base al estudio de foraminíferos e isotópicos cerca de Cabo de Cabo (Alvaro *et al.*, 1984; Robledo, 2005). Esta compuesta por una Unidad estratigráfica: el Complejo Arrecifal en la que se distinguen cuatro cinturones de facies, una zonación del arrecife, planos de estratificación, discontinuidades y superficies de erosión (figura 4). El análisis de la

Figura 3. Mapa geológico del área de Luçmaçor (IGME, 2006)



*Handwritten signature or initials in blue ink.*

arquitectura de facies, definiendo ciclos de acreción sedimentaria, ha permitido identificar las fluctuaciones eustáticas desde ciclos de 3<sup>er</sup> orden hasta ciclos de 7<sup>o</sup> orden (Pomar y Ward, 1994; Pomar, et al., 1996; Robledo, 2005).

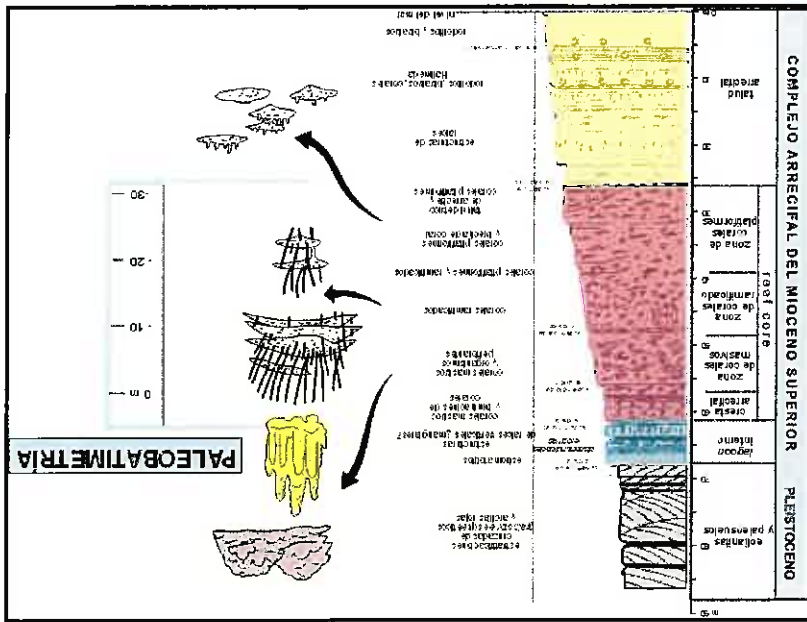


Figura 4. Serie estratigráfica tipo de la Plataforma carbonatada de Luçmajor realizada en Cabo Blanco (Pomar, 1991).

El modelo general para las facies arrecifales del Mioceno superior fue inicialmente establecido para el Mediterráneo occidental por Esteban et al., (1977) y Esteban (1980). Sin embargo fue Pomar et al., (1983 a y 1985) quienes establecen un modelo de facies para el Complejo Arrecifal de Mallorca, en la plataforma de Luçmajor y posteriormente Pomar, (1991) y Pomar et al., (1996) describen detalladamente las facies y su arquitectura. Los afloramientos ubicados entre las localidades de Cabo Blanco y Cala Pi, por su mejor exposición. El Complejo Arrecifal está formado por cuatro cinturones de facies principales que representan distintos ambientes de deposición asociados al crecimiento arrecifal (figura 5):

1. Facies de plataforma abierta (cuenca poco profunda)

- II. Facies de talud arrecifal
- III. Facies de frente arrecifal
- IV. Facies de lagoon

Las facies son definidas por su litología, componentes, estratificación e interrelación geométrica. Los cinturones de facies del Complejo Arrecifal presentan características geológicas y espesores diferentes (figura 5).

I.- La facies de **plataforma abierta** se disponen a base de las facies de talud arrecifal y están muy bioturbadas por lo que presentan una estratificación difusa. Están compuestas por dos tipos diferentes: (1) *litolías de algas rojas*, formadas por *grainstones-packstones* de grano grueso con abundantes algas rojas y *rudstones-floatstones* de rodolitos (2) *litolías de grano fino* formada por *packstones-wackestones* de grano fino ricos en foraminíferos planónicos con una estratificación poco definida. El primero aflora en la base de los acantilados a lo largo del margen meridional de la Plataforma de Luçmaçor. También han sido descritas, a partir de testigos de sondeo en la zona central, suroeste y oeste de la Plataforma de Luçmaçor (Pomar y Ward, 1995; Pomar et al., 1996). Este conjunto está compuesto por facies depositadas en una cuenca poco profunda. El segundo tipo de litofacies de plataforma abierta aflora a lo largo del sureste de la plataforma. También se han descrito a partir de testigos de sondeo en la zona central de la Plataforma de Luçmaçor. Dichas litofacies se disponen sobre las facies ricas en algas rojas a lo largo de la costa oeste de la Plataforma de Luçmaçor.

II.- Las facies de **talud arrecifal** solapan y se interdigitan con las facies de plataforma abierta y se componen principalmente por *grainstone* esqueléticos dolomitizados, *packstone* y *wackestone*. La extensión lateral y el espesor de las facies de talud son muy variables, dependiendo de la configuración del arrecife, así como del porcentaje de producción de sedimento de éste. El espesor



máximo del talud medido en afloramientos o en testigos de sondeo es de 70 m. Afloran en el margen oeste y sureste de la Plataforma de Lucmajor. El conjunto de estas litofacies se pueden subdividir en dos grandes grupos: facies de talud distal y talud proximal.

III.- Las facies de **frente arrecifal** están constituidas por *framework* de corales masivos recubriendo e interdigiando hacia cuenca, los depósitos de talud. El edificio arrecifal está formado sólo por tres géneros de coral, *Portes*, *Tarbellastraea* y *Siderastrea*. De forma secundaria aparecen incrustaciones de algas, foraminíferas, briozoa y gasterópodos verméticos, y costras microcristalinas formadas por cianobacterias. Localmente, se observan facies asociadas compuestas por *rudstone* y *floatstone*.

Las colonias de coral presentan una zonación vertical de acuerdo con el gradiente de profundidad que controla su forma de crecimiento. En la zona inferior, los corales son platformes pasando en la vertical a formas digitadas y ramificadas en una zona intermedia (con alturas de hasta 4 m). La zona superior está distribuida heterogéneamente y no siempre aflora. Esta formada por colonias masivas hemisféricas y/o ciliunares, con abundantes restos de organismos incrustantes y perforantes. Los perforaciones de esponjas, así como las incrustaciones de algas rojas y cianobacterias, son más abundantes en esta zona superior de la pared. Los espacios intercoralinos están rellenos normalmente por depósitos esqueléticos de organismos con textura *grainstone-packstone* y/o *wackestone*.

A partir de los afloramientos en los acantilados costeros en diferentes localidades, se distinguen tres tipos en función de los componentes coralinos principales: (1) arrecifes de Vallgornera, discontinuos, de tipo monticular con *Portes* y *Tarbellastraea*. Afloran entre Vallgornera y Cala Pi, (2) arrecifes de Cala Beltrán, de pared arrecifal continua, formadas por *Portes* y *Tarbellastraea*, y Siderastrea de forma accesoria, Afloran entre Cala Pi y Els Bancals, (3) Los



arrecifes de Cabo Blanco, con pared arrecifal continua, formados casi exclusivamente por *Portes*. Afloran entre Els Bancals y Cabo Blanco. Los depósitos más recientes de la plataforma de Lluçmajor afloran a lo largo del margen oeste de Ses Ollas y están constituidos por el género *Portes* y *Tarbellastreaa*.

Los arrecifes de *Vallgornera* son los más antiguos de los afloramientos costeros del Complejo Arrecifal y se extiende entre el Torrente de Vallgornera y Cala Pi. La base de estas construcciones arrecifales está en la actualidad por debajo del nivel del mar. Las estructuras de corales que afloran en esta zona, están constituidas por colonias masivas y columnares de *Tarbellastreaa* y *Portes* y, en menor medida, por *Siderastreaa* y forma montículos individuales que no llegan a formar una pared arrecifal continua

Los arrecifes de *Cala Beltrán-Els Bancals* se extienden desde Cala Pi-Cala Beltrán hasta la mitad de la costa de *Els Bancals*. También está compuesto por *Tarbellastreaa* y *Portes*. Sin embargo, se diferencia de los arrecifes de *Vallgornera* en que no forman montículos sino, un frente arrecifal continuo cortado por pequeñas depresiones canaliformes (*grooves*). En esta área tampoco aflora la base del arrecife, que permanece por debajo del nivel del mar.

Los arrecifes de *Cabo Blanco* se extienden desde *Els Bancals*, hasta Punta Roja, al N de Cabo Blanco. El edificio arrecifal está formado esencialmente por *Portes* con menor presencia de *Tarbellastreaa* y *Siderastreaa*. Gran parte de las rocas arrecifales desde *Els Bancals* hasta Cabo Blanco están dolomitizadas excepto al norte de la localidad de Punta Negra, donde sólo han sido observados pequeños parches dolomitizados. La secuencia vertical más completa de este tipo de arrecife aflora en la zona superior de la costa acantilada de Cabo Blanco, donde el arrecife forma parte de una secuencia de

La progradación del Complejo Arrecifal a lo largo de unos 20 km en la Plataforma de Lucajor, refleja un marco deposicional posttectónico, que se pone de manifiesto por la dimensión de la plataforma que apenas ha sufrido subsidencia (Pomar, 1991). En este contexto, la progradación de la Plataforma de Lucajor fue más extensa hacia el SO donde dominaban condiciones de

**IV.- Las facies de lagoon** recubren las facies del frente arrecifal. Están formadas por estratos horizontales, limitados por superficies de erosión planas. La extensión y espesor de estas facies es variable en el Complejo Arrecifal en función de los cambios relativos del nivel del mar que controlan cada episodio del edificio arrecifal. Los *lagoons* presentaban una extensión kilométrica durante las subidas del nivel del mar, mientras que eran muy reducidos durante los descensos del nivel del mar. Los espesores máximos de las facies de *lagoon* que afloran en los acantilados costeros es de 30 m aproximadamente. Se pueden diferenciar tres tipos de *lagoons*: *lagoon externo*, *lagoon medio* y *lagoon interno*.

Aunque la secuencia arrecifal no está completa en la vertical en ninguna localidad, los afloramientos estudiados nos permiten aproximar la profundidad del agua en cada zona del arrecife. En este sentido se estima que la zona de corales platformes se hallaba entre los 20 y 30 m de profundidad, los corales ramiformes entre los 10 y 20 m y por último, la zona de corales masivos a profundidades inferiores a los 10 m. Esta zonación es un herramienta muy importante para determinar la relación entre las arquitectura de facies y las fluctuaciones relativas del nivel del mar (Pomar, 1991), así como para el análisis de la secuencia estratigráfica.

En este punto se han descrito tres zonas según las formas de las colonias coralinas: (1) la base de la pared arrecifal está formada por corales platformes, (2) en la zona intermedia aparecen corales ramificados y (3) en la parte superior los corales masivos son predominantes.



fisuradas, con permeabilidades y porosidades muy variables. La recarga se produce en su mayor parte por las precipitaciones y la descarga a favor de manantiales naturales, de forma subterránea a través de acuíferos adyacentes y por los bombeos para abastecimiento.

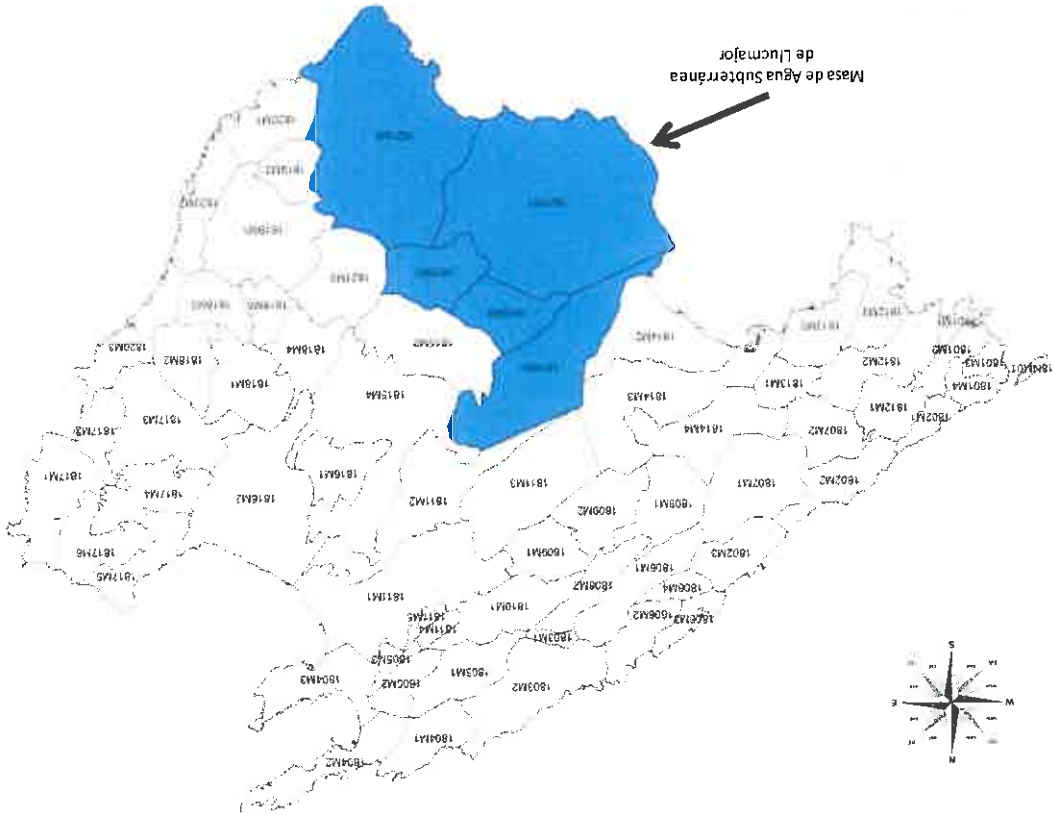
Los llanos centrales presentan una distribución hidrogeológica compleja debido a la heterogeneidad litológica lateral y vertical de los materiales que rellenan las cuencas. Los límites de las diferentes MAS no son siempre impermeables, lo que permite la transferencia procedente de otros acuíferos adyacentes. La descarga natural se produce en las zonas litorales, de formas subterráneas hacia acuíferos adyacentes o, en el caso de acuíferos colgados, a través de manantiales naturales, a lo que se suman los bombeos.

La Masa de Agua Subterránea de Luçmañor ocupa el sector meridional de la Isla de Mallorca. Limita al N con la MAS 18.14-M1 de Xorriç; al SE con la MAS 18.21-M2 de Campos y al NE con las MAS 18.15-M3 de Porreras y 18.15-M3 de Algaida, límites probablemente todos ellos permeables aunque no han sido definidos (figura 6).

La plataforma de Lucmajor se dispone sobre un zócalo impermeable constituido por las margas grises con *Heterostegina* del Tortonense hacia el centro de las mismas, y por materiales paleógenos y/o miocenos pre y sintectónicos.

### Hidrogeología en la Plataforma carbonática de Lucmajor.

Figura 6. Ubicación de las Masas de Agua Subterránea de Lucmajor y otras adyacentes con posible relación hidráulica entre ellas.



*Handwritten signature or initials.*

volumen anual extraído es aproximadamente de 5,248 hm<sup>3</sup>/a con unos recursos disponibles para 2015 de 4,60 hm<sup>3</sup>. En el balance del PHIB 2015, las entradas se estiman en 21,9 hm<sup>3</sup>/a, siendo la mayoría por infiltración de agua de lluvia y las descargas al 21,9 hm<sup>3</sup>/a, de las cuales 16 hm<sup>3</sup>/a son al mar y el resto son extracciones, transferencia lateral a otros acuíferos y descarga a través de torrentes. El uso del agua subterránea es fundamentalmente para regadío, abastecimiento urbano y doméstico (3 hm<sup>3</sup>/a 1,080 hm<sup>3</sup>/a y 1,11 hm<sup>3</sup>/a, respectivamente). Los acuíferos en esta zona presentan variaciones espaciales, laterales y verticales, que condicionan el funcionamiento hidrogeológico y los parámetros hidráulicos, ya que es una masa de agua muy compartimentada. Presenta permeabilidad por fracturación, fisuración y karstificación, conectando hidráulicamente lumaqueles y dunas cuaternarias en el sector próximo a Campos y facies del Complejo arrecifal en la zona más próxima a Cala Pi. La recarga natural se produce por infiltración de las precipitaciones que constituyen la aportación principal del sistema, por aguas que provienen desde la recarga en el Puig de Randa y por la entrada de agua salada desde el mar en el sistema. Artificialmente, los retornos de los riegos, la infiltración de aguas residuales tratadas, así como las pérdidas en la red constituyen otra fuente de recarga. La descarga se produce directamente al mar, generando una zona de mezcla entre agua dulce y agua salada observada en cavidades de la zona y en bombeos. Los niveles piezométricos presentan cotas entre 3 a 1 m s.n.m., lo que indica una buena permeabilidad y/o escasa recarga, aunque se ha observado la presencia de pasillos interpretados como zonas donde se incrementa la permeabilidad por fracturación, entre la Colonia de Sant Jordi, Ses Salines y Campos, que dan lugar a niveles entorno 1 m s.n.m. Al N de la localidad de Lluçmajor los niveles piezométricos están generalmente por encima de los 10 m s.n.m. El flujo del agua subterránea en la zona de Lluçmajor es perpendicular a la línea de costa NO-SE y NE-SO, con sentido hacia el mar, sin que existan importantes bombeos identificados que puedan causar depresiones piezométricas locales. En cuanto a los parámetros



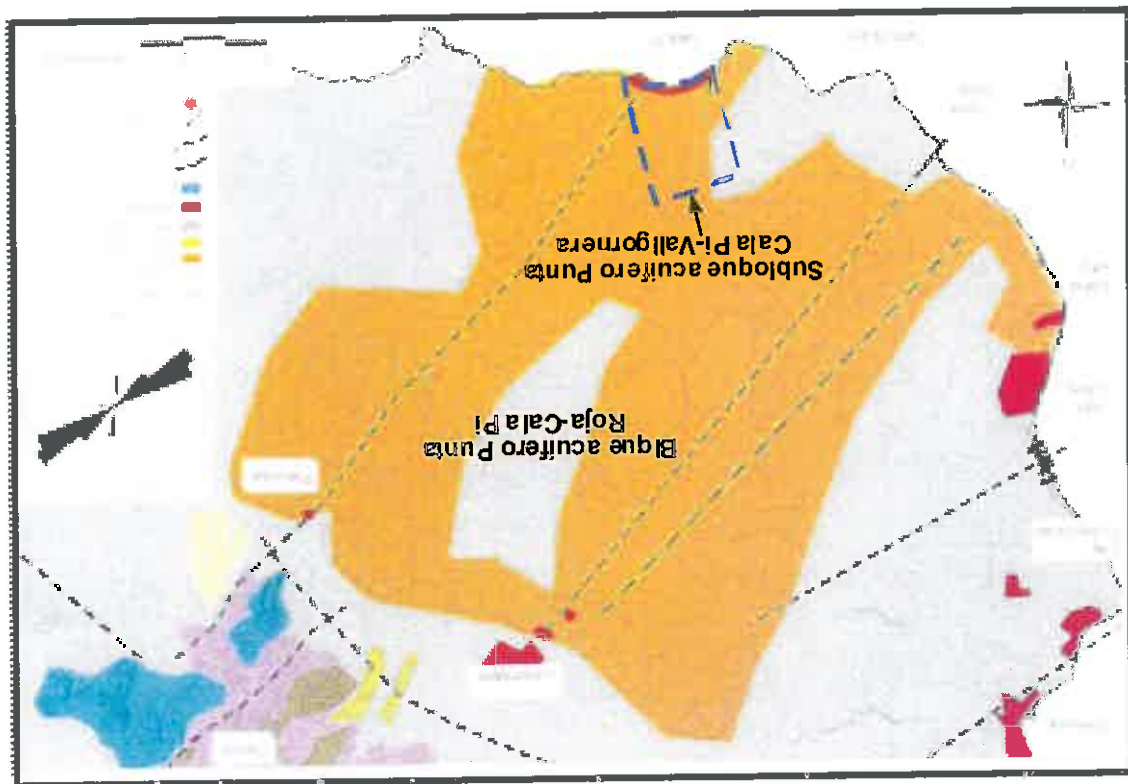
Aunque la masa de agua de la Marina de Luçmañor ocupa un conjunto del territorio permeable muy vasto, está compartimentada en bloques acuíferos, algunos definidos por fallas kilométricas con orientación NE-SO y NO-SE. En la MAS 1821M1 se ha detectado grandes fallas que individualizan estos bloques, como se muestra en la figura 7.

### **Hidrogeología en la zona de las urbanizaciones de Cala Pi, Vallgornera, Es Pas y zonas adyacentes**

hidrodinámica del mismo (Lores *et al.*, 2012). del acuífero hace que su equilibrio está directamente asociado a la particularmente singular y vulnerable, ya que su relación con todas las zonas aspecto hace de la Cova des Pas de Vallgornera un sistema endokárstico arrecifal muy permeables (bajo las zonas urbanizadas) y de lagoon. Este en contacto con el mar desarrollada en su zona más oriental en facies de frente saturada del acuífero, se ubica en la zona sur de la Masa de Agua Subterránea 0,03. La cueva de Pas de Vallgornera, que ocupa parte de la zona vadosa y halla en torno a los 100 y 2000 m<sup>2</sup>/día con coeficientes de almacenamiento de interno, facies de talud y dunas Pliocuaternarias, la transmisividad media se de almacenamiento superiores a 0,2. Sin embargo, en facies de lagoon medio, frente arrecifal y lagoon externo (entre 10.000 y 20.000 m<sup>2</sup>/día) y coeficientes hidráulicos, este acuífero presenta una elevada transmisividad en las facies de

No obstante, dentro de estos grandes bloques se han podido diferenciar otros de orden menor, definido por fallas y fracturas de menor longitud, casi todas ellas, fallas inversas con una cierta componente en dirección (figura 9). Las urbanizaciones de Cala Pi, Es Pas y Vallgornera se ubican en el bloque acuífero de la Punta de Cala Roja-Cala Pi. Se trata de un gran acuífero individualizado por fallas NE-SO que está limitado al N por una falla NO-SE (figura 8). Dentro de este bloque se ha realizado un estudio sobre las fallas y fracturas del entorno de las urbanizaciones mencionadas y la zona donde estaba previsto construir la depuradora. Este sub-bloque más pequeño,

Figura 7. Esquema geológico del sector de Lluçmaïor con la orientación de las fallas supuestas y las fallas identificadas sobre el terreno. En la rosa de direcciones se observa una orientación principal NE-SO, alineada con las grandes fallas, y dos direcciones secundarias, E-O y N-S (IGME, 2005). En la parte media se observa el bloque acuífero Punta Roja Cala Pi y en el margen inferior se muestra el sub-bloque de Cala Pi-Vallgornera



*[Handwritten signature]*

denominado de Cala Pi-Vallgornera, cuenta con una superficie de 24,58 Km<sup>2</sup> y una distribución espacial de fractura NO-SE (N 160°-170° E) y NE-SO (N 35°-50°E), similar a la dirección de los conductos de la cavidad. Esto ha permitido un compartimentado un acuífero en el que se ubica la cueva des Pas de Vallgornera cuya relación es directa con el comportamiento hidráulico de este acuífero.



Figura 8. Distribución de fracturas y plano de la cueva en la zona adyacentes a las urbanizaciones de Cala Pi, Es Pas y Vallgornera.



ITM

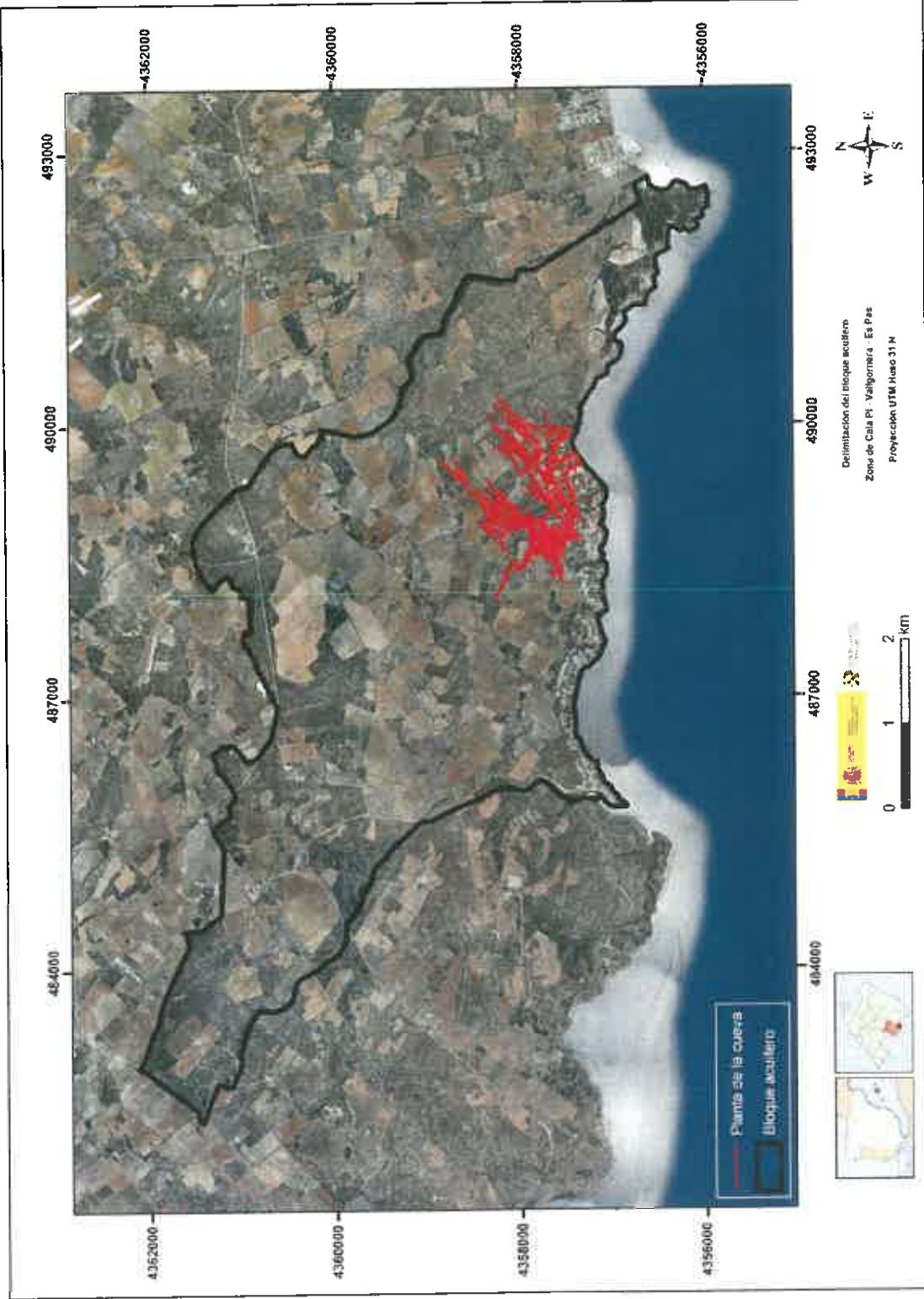


Figura 9. Sub-bloque acuífero de Cala Pi-Valligornera.



Zona vadosa

El acuífero presenta un compleja distribución de facies que hace que los parámetros hidráulicos sean muy diferentes, predominando en esta zona las facies de frente arrecifal (corales), lagoon y talud.

La zona vadosa de este acuífero viene determinada por el tipo de roca y el uso del suelo, que puede ser muy importante en parámetros como el coeficiente de infiltración o la propia autodepuración del agua. En superficie presenta una distribución de afloramientos de roca caliza desnuda, zonas de cultivo y zonas urbanas. Esto condiciona una diferencia importante de las permeabilidades, parámetro básico para entender tanto la capacidad de infiltración como los tipos de flujos que se producen en la zona vadosa. Como muestra la figura 10, existen tres áreas con diferente permeabilidad muy bien diferenciadas de acuerdo con los estudios realizados por este organismo.

A- Áreas de Alta Permeabilidad.

B- Áreas de Moderada Permeabilidad.

C- Áreas de Baja Permeabilidad.

A) Las áreas de muy alta permeabilidad coinciden con afloramientos rocosos en superficie y presenta un volumen importante de porosidad por fracturación y karstificación que da lugar a un flujo de componente vertical con poca capacidad de autodepuración. En la zona de estudio superan los 12 km<sup>2</sup>. La permeabilidad estimada para estas zonas es > 10<sup>-1</sup> cm/s.

B) Las áreas de permeabilidad media se corresponden con terrenos de cultivo, compuesto por sedimentos detríticos, y presentan una mayor capacidad de autodepuración, con una superficie de 15 km<sup>2</sup>. El flujo en





la primera zona del acuífero se infiltra al acuífero más lentamente y además, existen tramos de componente horizontal hasta llegar a la roca carbonática. La permeabilidad estimada para estas zonas está entre  $10^{-3}$  -  $10^{-5}$  cm/s.

C) Las áreas de baja permeabilidad coinciden con las zonas urbanas donde la infiltración es prácticamente inexistente, salvo en terrenos aislados que no se han construido. La permeabilidad estimada para estas zonas está entre  $>10^{-7}$  (cm/s) en una superficie cercana a los  $6 \text{ km}^2$ .





Zona Freática

Para el mejor conocimiento de la zona freática se ha realizado una reinterpretación de dos ensayos de bombeo realizados en distintos sondeos correspondientes al mismo expediente CAS-288 para el abastecimiento público a las urbanizaciones de Cala Pi, Vallgornera Nou y Es Pas de Vallgornera del término municipal de Lucmañor, uno antiguo realizado por el IGM en el año 1989 y otro realizado recientemente por el Servei d'Estudis i Planificació de la Direcció General de Recursos Hídrics en el año 2016. El objetivo es determinar los parámetros hidráulicos del acuífero en un sector concreto al norte de Cala Pi, perteneciente a la masa de agua subterránea de la Marina de Lucmañor.

Situación geográfica

Los sondeos correspondientes al expediente CAS-288 se sitúan en la finca denominada Capocorb d'en Munar, ubicada en la Carretera de Cala Pi, a 3,3 km al norte de esta última localidad (figuras 11 y 12).



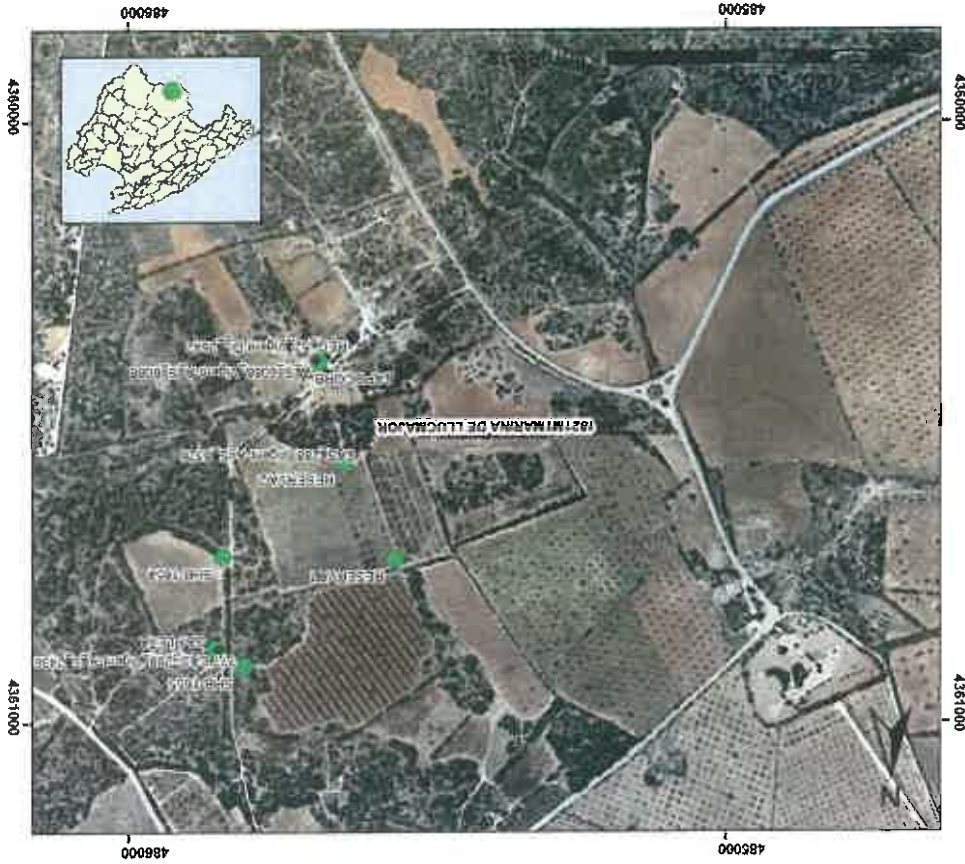
Figura 11. Situación general de los sondeos correspondientes al expediente CAS-288.



Los sondeos empleados para la determinación de los parámetros hidráulicos se ubican en la masa de agua subterránea de la Marina de Luçmafor (18.21 M1) a unos 3 km al norte de Cala Pi, en la línea de costa. En líneas generales, la caracterización hidrogeológica de esta masa se describe como un acuífero superficial libre formado por las calizas arrecifales del Mioceno, con un espesor medio de 150 m (figura 13).

### Marco Geológico e hidrogeológico

Figura 12. Situación detallada sobre ortofoto de los sondeos correspondientes al expediente CAS-288 para abastecimiento urbano y los sondeos SHB-1454 y SHB-1455 para riego agrícola, ubicados en la finca Capocorb Vell. En el recuadro: mapa de las masas de agua subterránea de Mallorca y localización de la masa 1821 M1, Marina de Luçmafor.

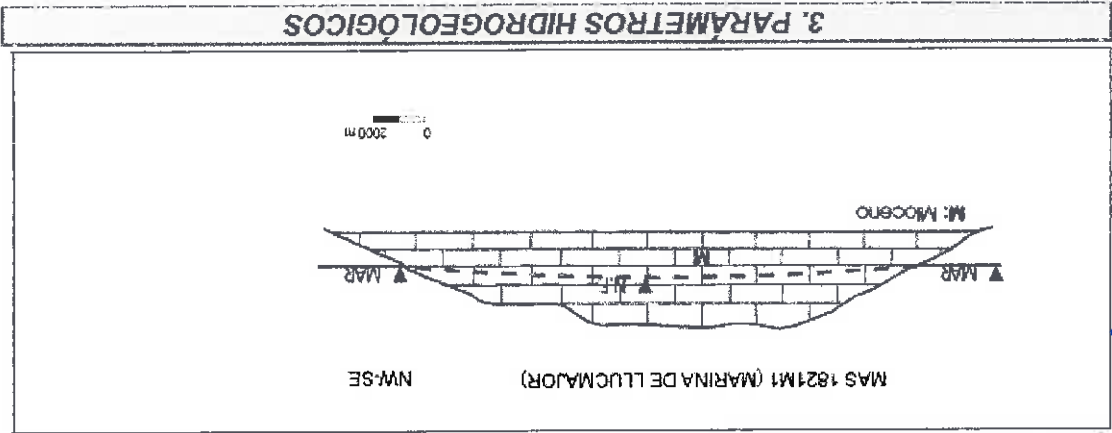


*Handwritten signature in blue ink.*

Las calizas arrecifales son visibles en la costa acantilada de la Marina de Lucmañor y bajo los recubrimientos plio-cuaternarios en las escasas canteras que explotan las calizas miocenas en el entorno de la marina (figura 14). Todo el conjunto es postorogénico y presenta una distribución geométrica subhorizontal.

Acuifero	Litología	Edad	Espesor (m)	Tipo
Mioceno	Calizas y calcarenitas	Tortonense-Messiniense	150	Libre

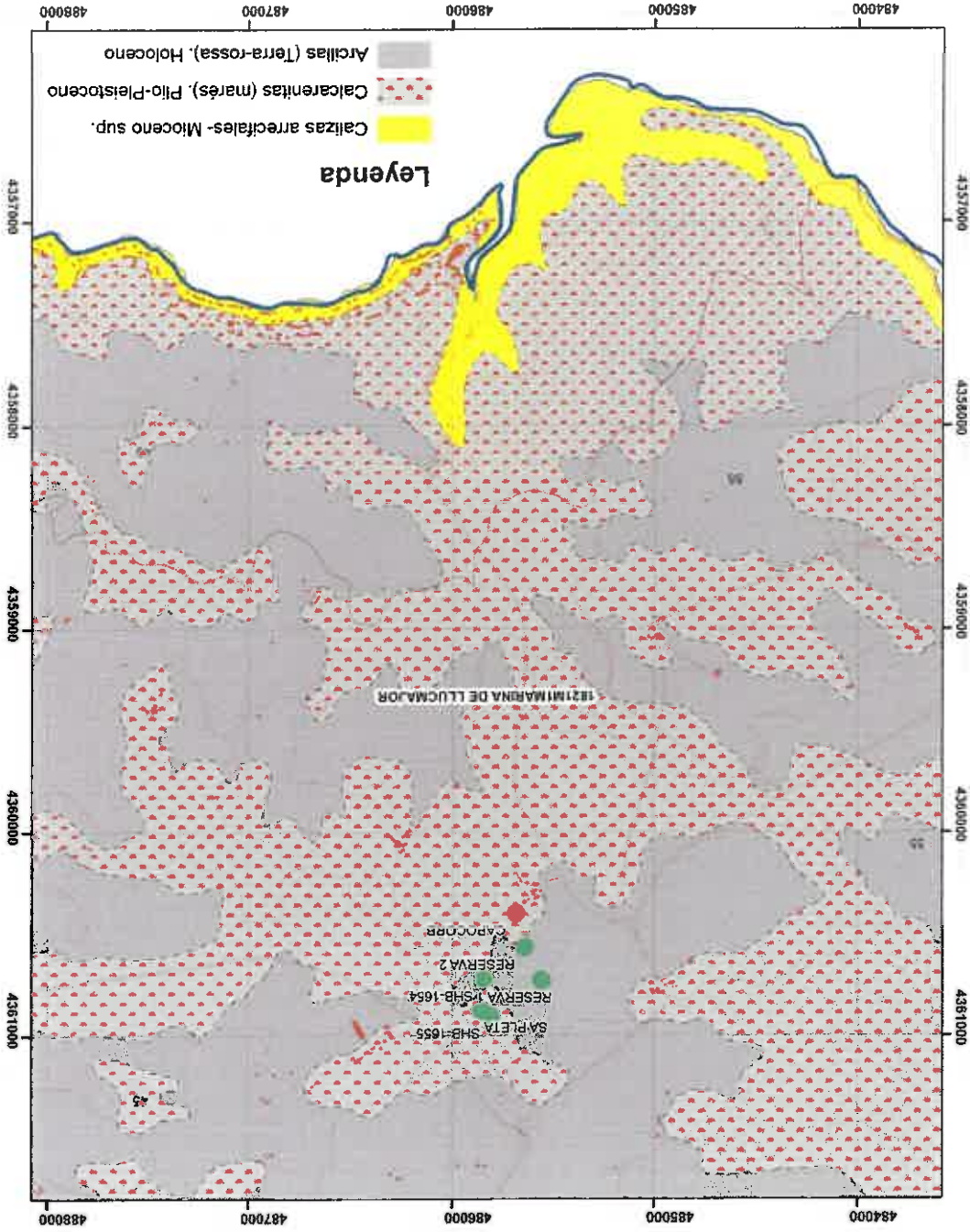
Corte hidrogeológico conceptual



Permeabilidad (m/d): 200  
 Coeficiente de almacenamiento 0.03  
 Caudal específico (l/s/m): 1000

Figura 13. Detalle de la ficha de caracterización inicial de la masa de agua subterránea 1821 M1.

Figura 14. Mapa geológico continuo escala 1:50.000 GEODE (IGME) y situación de sondeos.



*Handwritten signature in blue ink.*

Instituto Geológico y Minero de España



MAPA GEOLÓGICO CONTINUO DE ESPAÑA

MALLORCA





La interpretación del ensayo original de acuerdo con el informe del IGM de fecha 13 de noviembre de 1989 fija los parámetros hidráulicos deducidos en:

Caudal de bombeo: 390 m<sup>3</sup>/día (4,5L/s)

Profundidad nivel dinámico final: 84,25

Profundidad nivel estático: 72,93 m

Cota topográfica: 81,93m (nivelada)

Diámetro: 300 mm

Profundidad: 92 m

Sondeo: SHB-1654; 392850014

siguiente tabla:

SHB-1654. Las características principales de este ensayo se recogen en la de registro nacional del IGM 392850013 y del Servicio Hidráulico de Baleares que obra en este Organismo el ensayo se llevó a cabo en el pozo con número CAS-288 de concesión de aguas subterráneas. De acuerdo con la información de bombeo de 72 horas con recuperación de tres horas para el expediente Entre el 29 de agosto y el 1 de septiembre de 1989 el IGM efectuó un ensayo

Ensayo SHB-IGME 1989

observación

**Características de los ensayos, pozos de bombeo y piezómetros de**

Dado el reducido espesor de la cobertura plio-cuaternaria y teniendo en cuenta que el nivel freático se sitúa a una profundidad próxima a los 70 m en la zona de Capocorb, se puede considerar que el acuífero atravesado está formado únicamente por las calizas arrecifales miocenas subyacentes en este sector.

Transmisividad inicial (3'): 5 m<sup>2</sup>/día.

comportamiento inicial de:  
 captación, pero que aporta un valor mínimo de transmisividad de la  
 insuficiente para conocer con certeza los parámetros hidráulicos de la  
 interpretación posible la de los tres primeros minutos de bombeo, tiempo  
 que dificulta la interpretación del ensayo. Queda por lo tanto como única  
 dinámico del bombeo hubiera alcanzado el nivel de aspiración de la bomba, lo  
 este momento. En estas circunstancias cabe la posibilidad de que el nivel  
 una recta de pendiente nula lo que impide cualquier interpretación a partir de  
 prueba. Por lo tanto a partir del tercer minuto de bombeo la curva pasa a ser  
 mismo a los 84,25 m de profundidad durante la totalidad del resto de la  
 m durante los tres primeros minutos de bombeo, quedando estabilizado el  
 El gráfico de evolución de niveles (figura 15) muestra un fuerte descenso de 11

Reinterpretación mayo 2017

Coef. Pérdidas B = 0,000057499

R = 0,15m

Coefficiente de almacenamiento deducido: 0,5

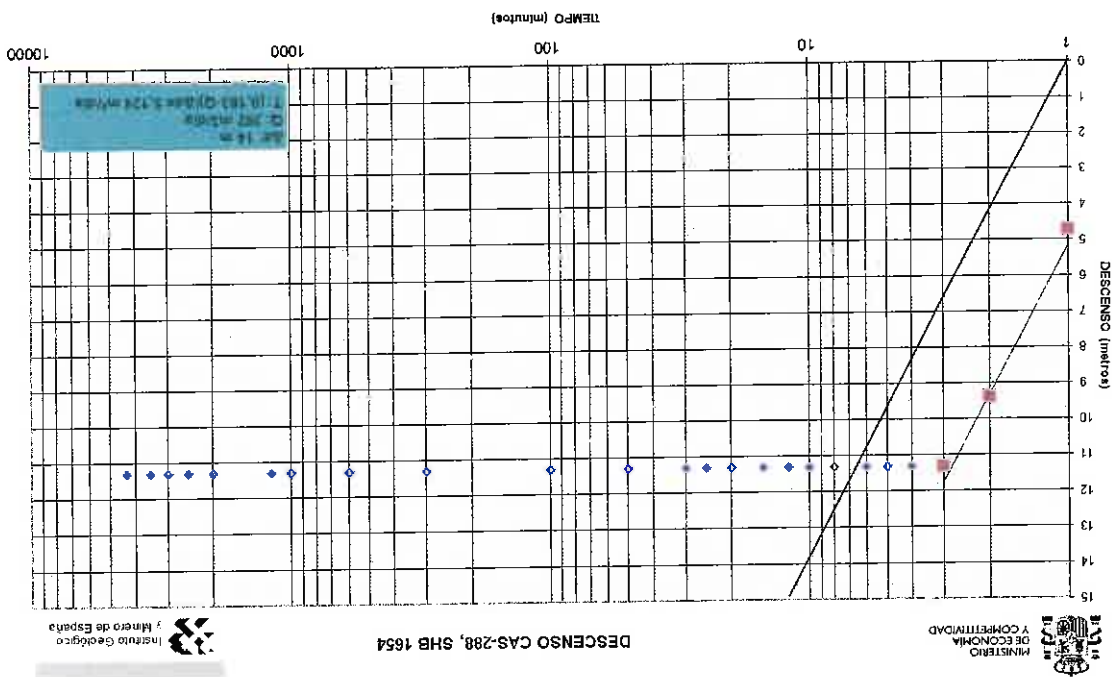
Transmisividad: 90 m<sup>2</sup>/día

Transmisividad en recuperación: 2.379 m<sup>2</sup>/día

estimar:

En estas circunstancias consideramos más aproximada la interpretación de la curva de recuperación al contar con un mayor tiempo de registro de variación de nivel (figura 16). El análisis del tramo final de la recuperación permite

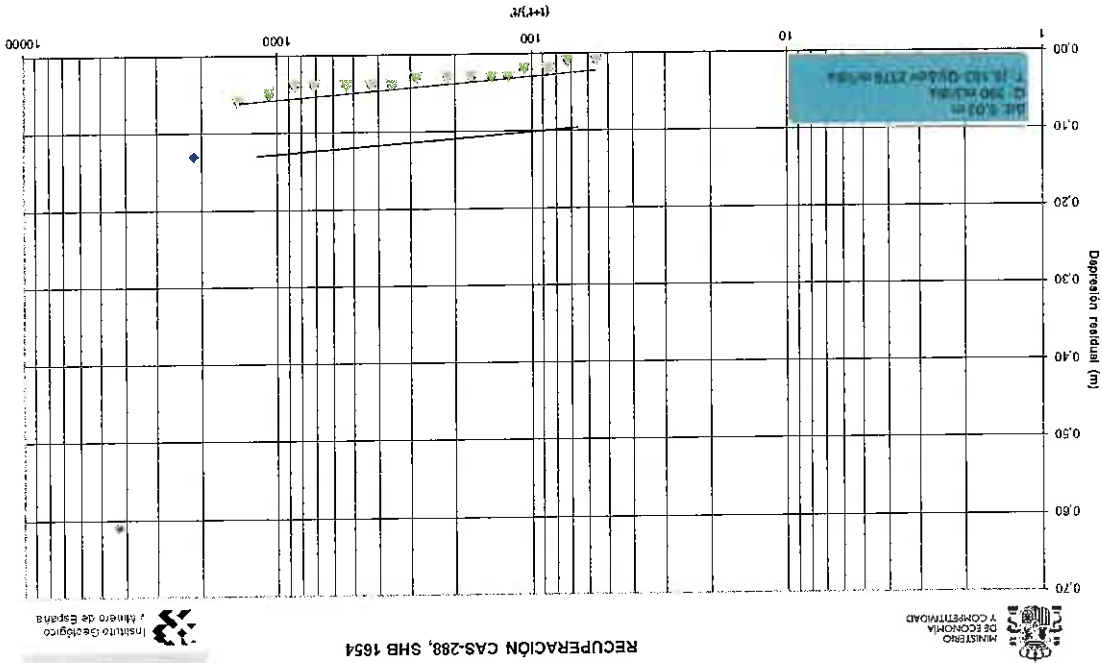
Figura 15. Curva de descensos correspondientes al ensayo de bombeo CAS-288 efectuado en agosto-septiembre de 1989 y reinterpretación y obtención de parámetros hidráulicos.



*[Handwritten signature]*

Los intentos de optimización de la variación de niveles durante el bombeo y la recuperación mediante el programa PIBE2 se enfrentan a esta misma problemática lo que da lugar a un mal ajuste entre las curvas teórica y real de descensos/recuperación (figura 17). Se ha realizado el ajuste con el método de Theis para régimen variable con una corrección de Dupuit para acuíferos libres, y con una estimación del coeficiente de almacenamiento de 0,03, de acuerdo con los valores medios representativos para el conjunto de la masa de agua subterránea de la Marina de Luçmañor que se recogen en la ficha de caracterización y en los resultados propios obtenidos mediante el ajuste de la curva de descensos en el piezómetro de observación durante la prueba de bombeo.

Figura 16. Reinterpretación de la curva de recuperación del ensayo de bombeo CAS-288 efectuado en agosto-septiembre de 1989.



*Handwritten signature in blue ink.*



Tabla 1. Parámetros hidrodinámicos obtenidos por PIBE2 en el ensayo realizado en el pozo de bombeo en agosto-septiembre de 1989.

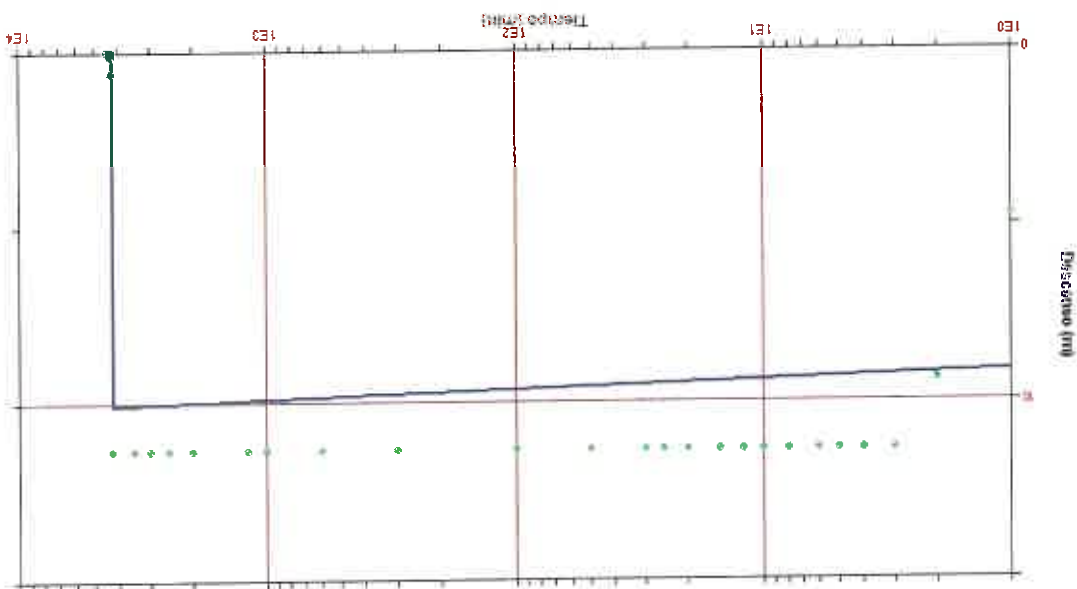
Tipo de		Medidas en Pozo de Bombeo	
Trans. (m <sup>2</sup> /día)	760	Rad. Efic. (m)	0.0011
Coef. Almac.	0.03	Rad. Pozo (m)	0.15
Hantush r/B		Log (Sy/S)	
Neuman		B	0.3
Pér. de carga = B x Q <sup>n</sup>		n	2
Corr. de Dupuit	Ho (m)		15
Efecto capacidad	1/α		

Transmisividad (PIBE2): 760 m<sup>2</sup>/día

transmisividad:

Los parámetros obtenidos mediante PIBE2 se recogen en la tabla 1, siendo la

Figura 17. Ajuste de la curva de descensos-recuperación del ensayo de bombeo CAS-288 efectuado en agosto-septiembre de 1989 mediante el algoritmo PIBE2.



*Handwritten signature or initials in blue ink.*

Los valores así obtenidos se encuentran más próximos al valor promedio de 1.000 m<sup>2</sup>/día que se recoge en la ficha de caracterización de la masa de agua subterránea de la Marina de Luçmañor (figura 13).

Durante la prueba se recogieron muestras de agua para su análisis químico y bacteriológico. La conductividad eléctrica se mantuvo prácticamente constante en el entorno de los 1.000 µS/cm con una concentración de ión cloruro ligeramente inferior a los 250 mg/L.

Ensayo CAS-288 Vigent, AS-8326 (Servei d'Estudis i Planificació)

Durante los días 24 y 25 de marzo de 2016 el Servei d'Estudis i Planificació (SEP) de la Direcció General de Recursos Hídrics (Conselleria de Medi Ambient, Govern Balear) realizó un ensayo de bombeo de 24 horas con recuperación para la autorización de un pozo de reserva AS-8326 (Reserva2 en la figura 12) dentro del expediente CAS-288. Las características principales de este ensayo se recogen en la siguiente tabla:

Sondeo: AS\_8326 (Reserva2)  
Profundidad: 100 m  
Diámetro: 300 mm

Cota topográfica: 70 m s.n.m. (estimada)  
Profundidad nivel estático: 69,98 m  
Profundidad nivel dinámico final: 70,32 m  
Caudal de bombeo: 20 m<sup>3</sup>/hora (5,5L/s)

El descenso máximo producido fue de 0,34m, de los cuales 0,32 se produjeron en el primer minuto de bombeo y solamente 2 cm durante el resto de las prueba. La interpretación del ensayo de acuerdo con el informe del SEP fechado en 12 de abril de 2016 fija los parámetros hidráulicos deducidos en:







Transmisividad: 10.000m<sup>2</sup>/día

Durante el bombeo se controló la influencia del descenso en dos pozos aparte del propio pozo de bombeo. El primero denominado REG\_Vivent\_DI\_2642 (Capocorb en la figura 12) situado 180 m al sur del pozo de bombeo, no registra descensos ya que continuaba recuperando después de haberse detenido 4,5 horas antes del comienzo de la prueba, por lo que no puede emplearse para la interpretación que a su vez se encuentra en parte influenciada por la recuperación de un bombeo anterior.

El segundo punto de observación lo constituye el sondeo denominado Reserva1 (figura 12) situado a 190 m al norte del punto de bombeo. En este punto la influencia del bombeo se comienza a registrar a las 4 horas de comienzo del mismo produciéndose un descenso de tan solo 2 cm durante la totalidad de la prueba. Una vez detenido el bombeo la recuperación se produce en 6 minutos.



Reinterpretación IGME mayo 2017

Dado que se cuenta con los datos de descenso en un piezómetro de observación (una vez descartado uno de los piezómetros influenciado por una recuperación previa) se ha procedido a interpretar éste en primer lugar para poder obtener una estimación del coeficiente de almacenamiento que no puede obtenerse en la interpretación del propio pozo de bombeo.

Los puntos de descenso se registran en el gráfico de la figura 18. Se corresponden únicamente a un descenso total de 2 cm a lo largo de todo el periodo de duración de la prueba, lo que hace poco significativo el ajuste de

una curva de interpretación efectuada con el algoritmo PIBE2. El resultado arroja un valor del coeficiente de almacenamiento y una transmisividad de:

S: 0,034

Transmisividad: 3.921 m<sup>2</sup>/día

La tabla 2 recoge los parámetros hidrodinámicos resultantes de la interpretación del ensayo mediante el algoritmo PIBE2.

Tipo de		Medidas en Piezómetro	
Trans. (m <sup>2</sup> /día)	3921	Rad. Efic. (m)	
Coef. Almac.	0.03416	Dist. Pozo (m)	190.0
Hantush r/B		Log (Sy/S)	
Neuman		Per. de carga = B x Q <sup>n</sup>	B
		Corr. de Dupuit	Ho (m)
Efecto capacidad	1/α		30

Tabla 2. Parámetros hidrodinámicos obtenidos por PIBE2 en el piezómetro de observación Reserva1 a partir del ensayo realizado por el SEP en marzo de 2016.

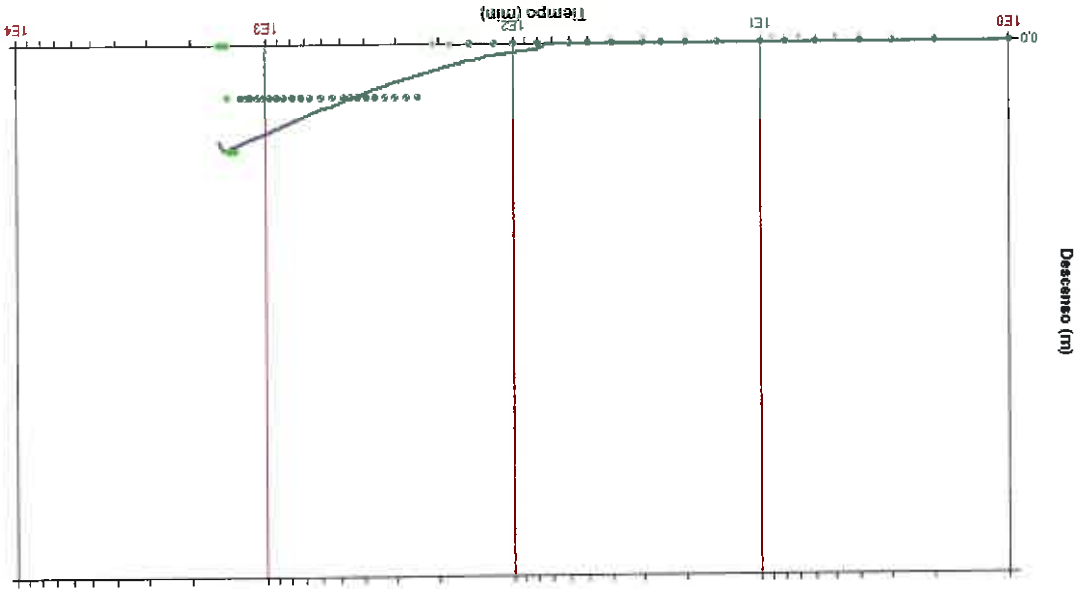


Figura 18. Ajuste de la curva de descensos-recuperación del ensayo de bombeo CAS-288 en el piezómetro de observación Reserva1 (Figura 2) efectuado en marzo de 2016 mediante el algoritmo PIBE2.

Con un valor de partida de  $S = 0,03$  obtenido en el pozo de observación y coincidente con el valor promedio asignado para esta masa de agua subterránea en la ficha de caracterización previa, se procede al cálculo de la transmisividad mediante el algoritmo PIBE2 en el pozo de bombeo Reserva2.

Los puntos de descensos y la curva de ajuste en el pozo de bombeo Reserva2 se recogen en la figura 9. Se consigue un buen ajuste de ambos una vez introducido un factor de pérdidas de carga que permite ajustar el fuerte descenso inicial de los primeros minutos de bombeo.

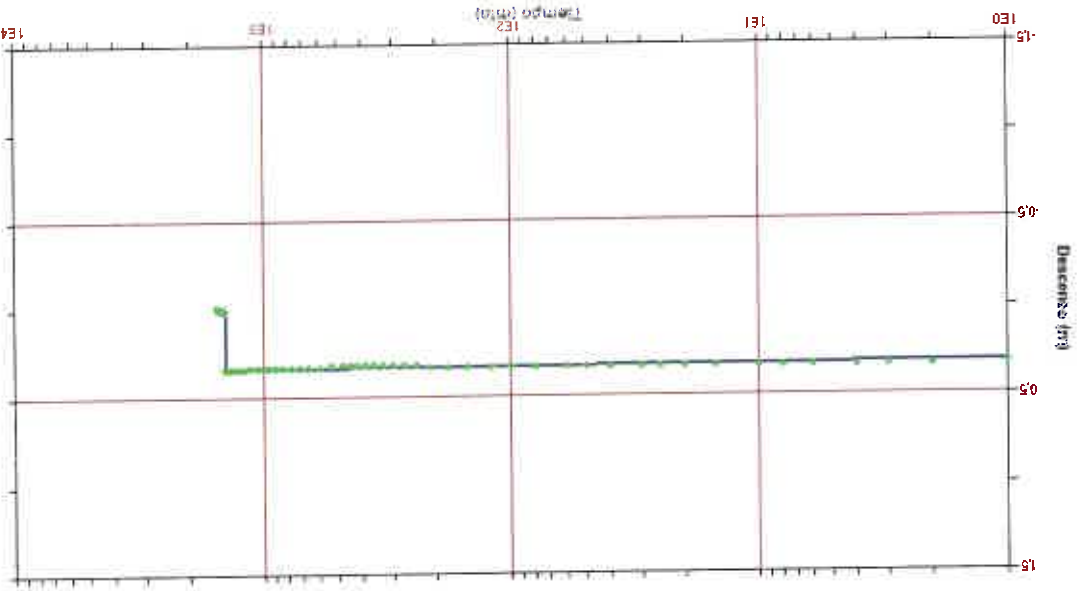


Figura 19. Ajuste de la curva de descensos-recuperación del ensayo de bombeo CAS-288 en el pozo de bombeo Reserva2 (Figura 2) efectuado en marzo de 2016 mediante el algoritmo PIBE2.

Los parámetros hidráulicos obtenidos se recogen en la tabla 3, con un valor de transmisividad final de:

Los procesos de disolución que se producen en la zona subterránea de la plataforma carbonatada adquieren gran importancia en el modelado y la configuración de la costa acantilada. La litología de la plataforma carbonáticas de Luçmaçor y Santanyi hacen que estas áreas sean en las que se han catalogado más cavidades por m<sup>2</sup> de la Isla de Mallorca, teniendo por tanto, un gran interés endokárstico (Robledo, 2005). La cueva más importante de esta zona es La Cova des Pas de Valligornera, objeto de este estudio.

**El endokarst de la Plataforma del Luçmaçor**

Este valor final es muy similar al obtenido en la interpretación efectuada por el SEP, quedando ambos en este sector de la masa de agua subterránea en el entorno de los 10.000 m<sup>2</sup>/día.

Tabla 3. Parámetros hidrodinámicos obtenidos por PIBE2 en el pozo de bombeo Reserva2 a partir del ensayo realizado por el SEP en marzo de 2016.

Tipo de		Medidas en Pozo de Bombeo	
Trans. (m <sup>2</sup> /día)	11092	Rad. Efic. (m)	0.15
Coef. Almac.	0.03	Rad. Pozo (m)	0.15
Hantush r/B		Log (Sy/S)	
Neuman		B	0.009
Pér. de carga = B x Q <sup>2</sup>		n	2
Corr. de Dupuit	Ho (m)		30
Efecto capacidad	1/α		

Transmisividad = 11.092 m<sup>2</sup>/día



El área donde se sitúa la cavidad forma parte de la denominada Marina de Lucmajor y se desarrolla en las facies del Complejo Arrecifal (frente y lagoon). Se han topografiado más de 74 km, siendo la cavidad de mayor desarrollo en planta de las Islas Baleares y unas de las mayores de España y Europa, ocupando una extensión sobre el terreno de aproximadamente 3 km<sup>2</sup>, aunque todavía permanece una parte en fase de exploración.

Genéticamente, el endokarst de las plataformas carbonatadas de Mallorca está claramente condicionado por las oscilaciones eustáticas desde el Mioceno superior hasta la actualidad (Robledo, 2005). Esta ciclicidad de la fluctuación de dominios vadoso y freáticos de aguas dulces y saladas, provocó tanto la disolución diferencial de la roca, según la distribución litológica y la fracturación, como la precipitación de carbonato cálcico

La estructura de los pasajes de cavidades generados en la zona de mezcla del levante de Mallorca se describe como geometrías caóticas, anastomosadas o dendríticas (Robledo *et al.*, 2009 c; Robledo, 2010). Sus salas se comunican de forma aparentemente casual por conductos sinuosos. En muchos casos, se observan depósitos sedimentarios (brechas) provocados por el colapso de las paredes y techos de las cavidades. También, son frecuentes depósitos detríticos relacionados con flujos endokársticos laminados o difusos. La mayoría de cavidades descritas presenta un volumen importante de porosidad (Robledo *et al.*, 2009; Robledo, 2010).

## Significancia de la relación hidrogeológica de la Cova des Pas de Vallgornera

La Cova des Pas de Vallgornera constituye un paraje natural muy significativo y de gran relevancia, debido a las de formas y registros sedimentarios derivados analizados ligados a la dinámica y arquitectura del karst litoral. Constituye parte

La cavidad está ubicada en la parte más suroriental del sub-bloque acuífero de Cala Pi-Valligornera (figura 10) y de acuerdo con los análisis de los niveles piezométricos, los lagos endokársticos de la cueva coinciden con el nivel freático del acuífero. Tanto el estudio regional de la pizometría como el análisis de datos concretos de algunos pozos al norte de la cavidad, muestran que el acuífero en esta zona presenta en algunos puntos cotas negativas si bien, casi todos los valores están entre 1 y 0 m s.n.m. (figura 20 y 21). Como se aprecia en la figura 20 y 21, la zona al norte de la cavidad donde estaba prevista la ubicación de la depuradora, presenta valores que oscilan entre 2,5 y -0,5 m.s.n.m.

La Cova des de Valligornera forma parte, vadosa y freática, de la MAS 1821M1 Marina de Lluçmaïor (concretamente en el sub-bloque Cala Pi-Valligornera), y la situación del nivel freático, que intersecta una gran parte de la cavidad en la actualidad, nos permite conocer los procesos que tienen lugar en el acuífero, tanto en el ámbito de la hidrodinámica como en la calidad del agua subterránea y otros procesos hidroquímicos.

del patrimonio geológico e hidrogeológico de Mallorca lo cual otorga a esta cueva un alto valor natural, patrimonial y científico (Robledo, 2014). Entre estas características destaca el gran desarrollo longitudinal de la cavidad, junto con la cantidad y diversidad de los espeleotemas, su relación genética con aguas de formaciones acuíferas libres y profundas confinadas, así como el interés científico que sus formas y sedimentos presentan en la investigación de diversos campos de la Ciencias de la Tierra.



Figura 21. Mapa de isopiezas en la central de la MAS 1821 Marina de Lluçmajor en la que se observan tanto el gradiente, hacia el sur, como la detección de cotas piezométricas negativas (datos de 2006 y 2017).

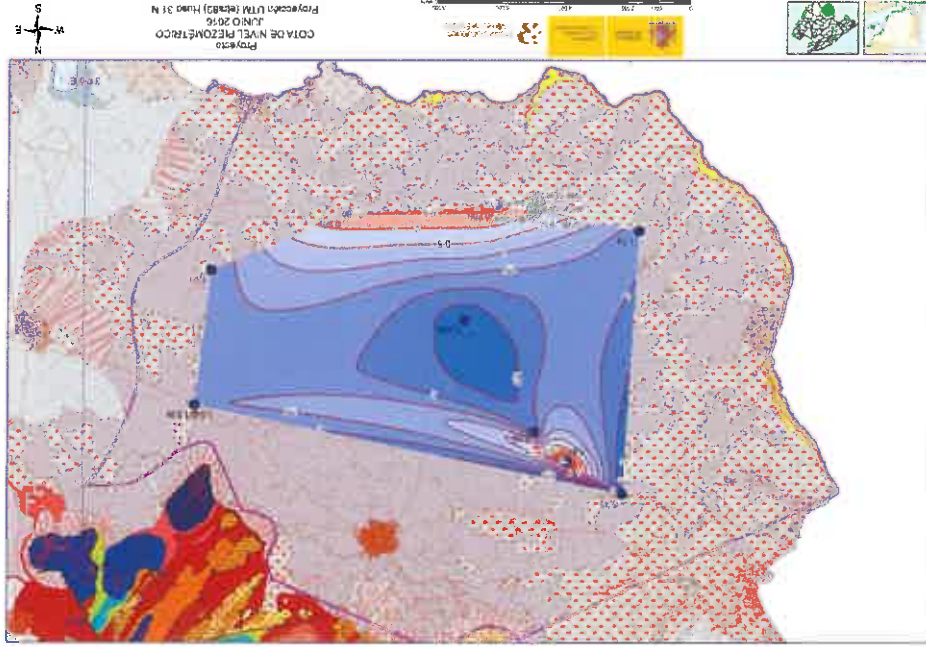
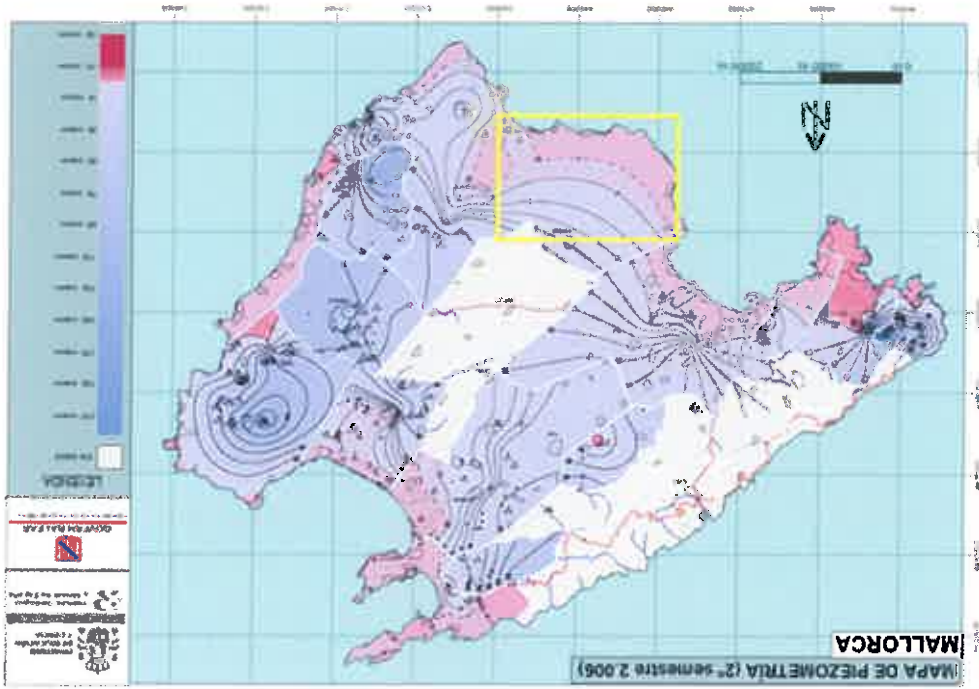


Figura 20. Mapa de isopiezas en la central de la MAS 1821 Marina de Lluçmajor. El recuadro amarillo marca la zona de estudio.



*[Handwritten signature]*

El mapa regional de isopiezas en Mallorca, muestra que la Marina de Luçmajor presenta el flujo regional del agua subterránea tiene una dirección N-S, como también se ha verificado en el mapa de isopiezas de la zona central, de donde se disponen más datos.

Estos datos, junto con los obtenidos del mapa de permeabilidades, muestran por un lado, que en la zona vadosa existe una gran extensión, con mucha dispersión, de áreas con un flujo horizontal donde cualquier elemento llega muy rápidamente a la zona freática. Otras áreas presentan zona con menos permeabilidad donde el agua tiene más capacidad de autodepurarse. En la zona freática es flujo es horizontal, con una alta transmisividad, en algunos puntos estudiados alcanza los 20.000 m<sup>2</sup>/día, aunque la media obtenida en el ensayo de bombeo es de 10.000 m<sup>2</sup>/día

Todo ello, significa que cualquier actividad que se realice en la MAS 1821 repercutirá en la cavidad, con especial importancia aquellas actividades que se lleven a cabo en el sub-bloque de Cala Pi-Lluçmajor.

Con todo ello, es importante apuntar que la red hidrográfica con cauces ligados de la propia estructura de la plataforma carbonatada, esto es, determinado por el sistema de fallas y fracturas en la zona de estudio, presentan una componente hidrológica perdedora, esto es, que una parte importante del agua que transcurre pasa se infiltra al acuífero.

La zona sobre la que se desarrolla el sistema endokárstico de la Cova des Pas de Vallgornera está delimitado por dos torrentes encajados; al este por el torrente de Cala Pi y al oeste por el Torrent de Garonda, ambos límites hidrográficos de la zona de estudio. No obstante, sobre la cueva pasan el Torrent Gros, en su zona central y el Torrent de Son Moix en el límite oeste de la misma. Existen otros cauces, Torrent Fondo y Torrent de Sa Dent, que

- b. Evaluar la continuidad del sistema endokárstico.
- a. Detectar cavidades de tamaño centimétrico, métrico o de mayor tamaño conectadas o no físicamente con la superficie, pero que pudieran estar ligadas a galerías y salas conocidas y exploradas con métodos espeleológicos.

Los objetivos fundamentales en el conjunto de ambos trabajos:

1. Estudio mediante georadar en la Urbanización de Vallgornera por la empresa GEOEXPLORER.
2. Prospección geofísica mediante tomografía eléctrica para la detección de cavidades en la urbanización de Vallgornera (Lluçmajor, Mallorca) por la empresa SGS.

**Estudios geofísicos en el entorno de la Cova des Pas de Vallgornera**

Para confirmar la existencia de pasajes, conductos, cámaras u otros sistemas de cavidades y más concretamente para la protección del sistema kárstico de la Cova des Pas de Vallgornera, se han revisado los estudios geofísicos de subsuelo así como se ha estudiado la características geológicas de las rocas sobre las que se ubica la urbanización.

aunque poco desarrollados y desconectados de las redes principales, parece muy probable que discurren sobre la cueva como los anteriores. Se trata de torrentes desarrollados sobre la roca encajante y denominado perdedores, puesto que parte del agua que circula por ellos durante eventos lluviosos, se infiltra a la zona no saturada alcanzando la cavidad.

La prospección geofísica por radar se engloba dentro de los métodos electromagnéticos de alta frecuencia. Los reconocimientos mediante georadar se basan en el estudio de la propagación de ondas electromagnéticas en el subsuelo en un dominio de frecuencias que varían entre unas decenas de Mhz hasta algunos Ghz. Se trata de ondas emitidas como impulsos temporales cortos, desde una emisor que se desplaza por la superficie del terreno. Cuando estas ondas se encuentran con un contraste dieléctrico, se reflejan hacia la superficie donde sus características son medidas por un receptor. La propagación de las ondas a través del terreno se rige por las ecuaciones de Maxwell y dependen en gran medida de las características del medio en el que se propagan, así como de las propiedades dieléctricas y las heterogeneidades del subsuelo. El fundamento en el caso de las cuevas consiste en que una vacío puede ser detectada desde la superficie debido a la anomalía electromagnética. La señal electromagnética de una cavidad es un contraste de amplitud más o menos pronunciado sobre el resultado. Ese contraste es particularmente fuerte para una cavidad vacía. La señal asociada a ese contraste presenta a menudo hipérbolas de difracción seguidas de

Georadar



- determinadas zonas de estudio.
- e. Evaluar la viabilidad de la red de saneamiento proyectada en o subsidencia.
  - d. Delimitar las zonas en las que la construcción de la red de saneamiento pudiese provocar efectos nocivos sobre la cavidad, colapso, hundimiento sistema de alcantarillado o de las fosas sépticas de las viviendas.
  - c. Evaluar la vulnerabilidad de las posibles construcciones ligadas a la urbanización, como la posible infiltración de las aguas procedentes del

interacciones con los bordes y techos. La señal es elevada para una cavidad inundada, con presencia de reflexiones múltiples y sin embargo está muy atenuada cuando las ondas atraviesan medio relleno de materiales conductivos como las arcillas. El resultado se observa en un radargrama, que es la representación de los tipos y distribuciones de contrastes de impedancias electromagnéticas y que alteran la señal emitida de forma distinta.

Los límites de profundidad en el que se realizaron los radiogramas los test cubrían un margen de entre 5 y 10 m de profundidad con longitudes en algunos casos de 120 m aproximadamente. Los resultados generados fueron una serie de perfiles radiométricos bidimensionales del subsuelo en el que se dibuja de forma digital y de acuerdo con los parámetros eléctricos y electromagnéticos las reflexiones producidas en los elementos del subsuelo. El modelo de final es filtrado de los radargramas obtenidos en el que ciertas anomalías pueden ser interpretadas como cavidades.

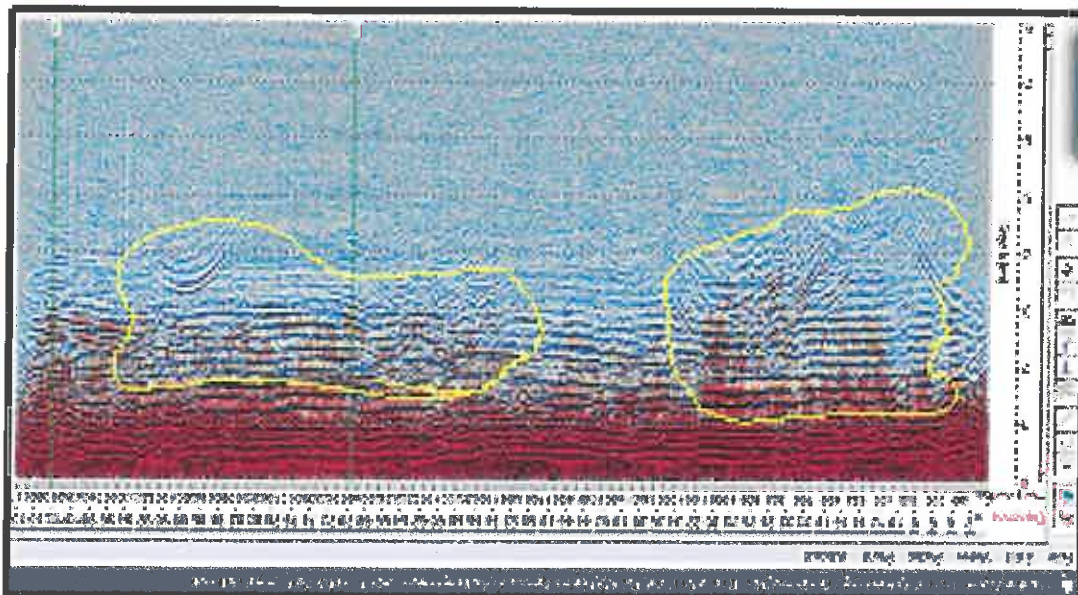
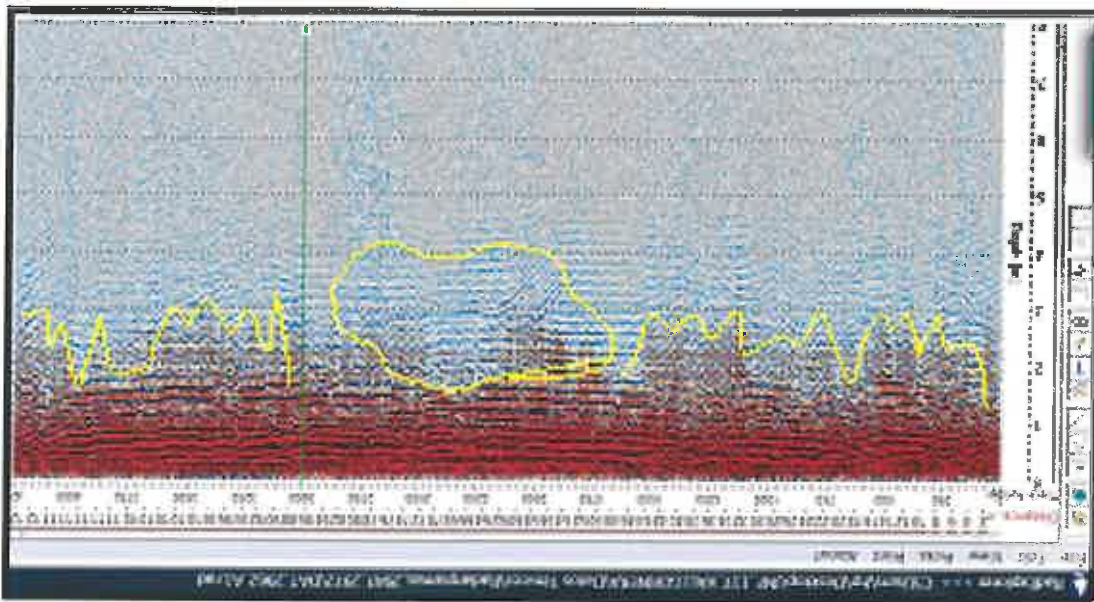
En la zona de estudios, las urbanizaciones de Cala Pi, Vallgornera y es Pas, se han realizado más de 300 radiogramas. Como se puso de relieve en algunos ejemplos, tras los trabajos realizados se detectaron varias anomalías que en este caso, parece corresponder a cavidades ubicadas en dichas urbanizaciones, especialmente en la zona de la Calle Albéniz. De acuerdo con el informe se observaron pequeñas cavidades con pocos centímetros de desarrollo en la horizontal y muy próximas a la superficie del terreno. La revisión de las radogramas y su reinterpretación nos ha permitido observar anomalías que podrían identificarse como cavidades, especialmente en los identificados bajo en la calle Liszt, Chopin, Verdi o Mozart, entre otras.

Además, se han detectado otras estructuras que como fallas, domos coralinos o un epikarst desarrollado. La conexión hidráulica entre estas estructuras y la cavidad no se ha constatado, aunque existe conocimiento que la exploración



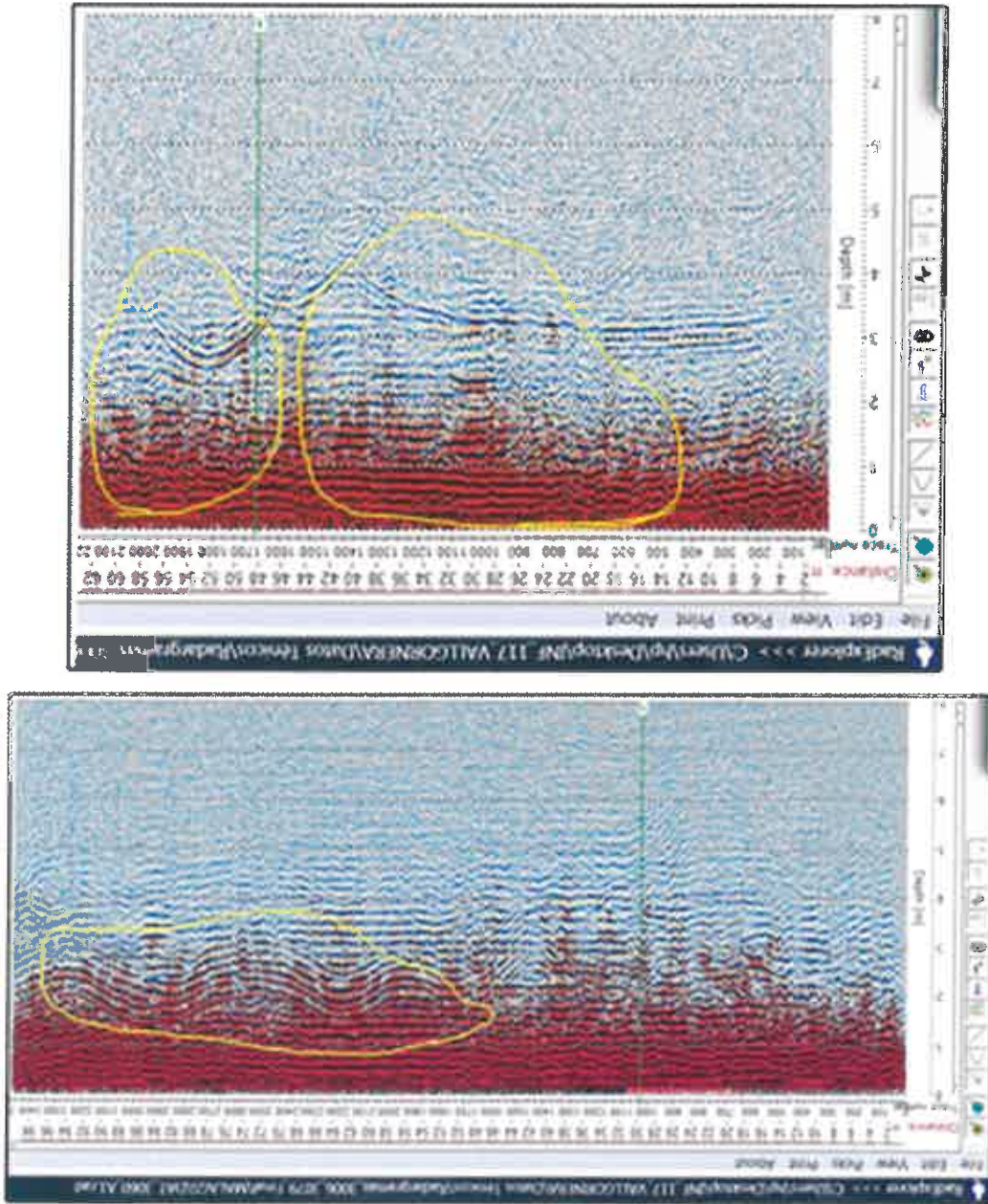
de la cavidad se ha extendido hacia el oeste. Este aspecto tiene dos componentes importantes; por un lado estos huecos forman parte del mismo acuífero, por lo que parece evidente que una zona potencialmente vulnerable a las actividades urbanas que puedan realizarse en el entorno por su condición de zona de infiltración preferente o riesgo de colapso o hundimiento.

*M.*



*Handwritten signature or initials in blue ink.*

Figura 22. Radargramas obtenido en la calle Chopin y Albeniz. Como se observa en la figuras se han constatado la presencia anomalías electromagnéticas que se interpretan como domos arrecifales, epikarst y pequeñas cavidades. (Radiorgrama realizado por la empresa GEOEXPLORER (2010) y cedido por el Ayuntamiento de Lucajor).



*[Handwritten signature]*



Las tomografías eléctricas se basan en el estudio de la resistividad de los materiales al paso de la corriente eléctrica. La resistividad de un material viene dada por su composición, la textura y la porosidad, junto con el contenido en fluidos. Esto factores van a condicionar la existencia de una mayor o menor concentración de iones que tiene como consecuencia una mayor o menor conductividad o, lo que es lo mismo, una mayor o menor resistividad.

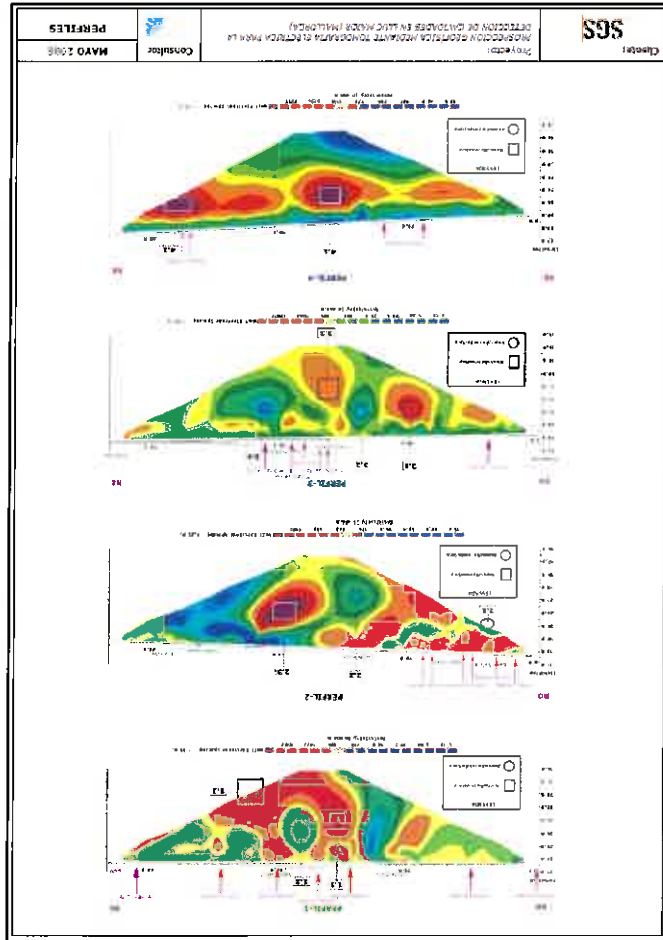
La tomografía eléctrica consiste en la implantación de electrodos a lo largo de una sección elegida y con una separación determinada entre cada electrodo. Los electrodos se conectan a un equipo de medida y, mediante un programa determinado para cada caso de estudio, cada electrodo emite y/o recibe una determinada corriente eléctrica en cada momento. El resultado final es una sección del terreno en la que se representan los valores de resistividad con distintos colores. La interpretación se realiza a partir de la resistividad aparente medida sobre el terreno, una vez obtenida de la diferencia entre el superior y el central que da el error cuadrático medio (RMS). Los perfiles de tomografías se representan en las pseudosecciones con el origen 0, inicio del perfil (electrodo nº 1) en la parte izquierda de la sección y, el final se sitúa en la parte derecha del mismo (con el número de electrodo utilizado en cada caso). La resistividad del terreno en los perfiles se define en las gráficas en la unidad de medida  $ohm \cdot m$ , representado en una escala de colores que va desde valores cercanos a 0 (colores azules) que son las zonas menos resistivas, a valores superiores a 3.000 que son las zonas más resistivas (colores rojos). El eje X superior es la longitud en metros, que este caso son 65 m y el eje Y la altura (profundidad de alcance) en el ejemplo de estudio fueron 18 m.

### Tomografías eléctricas

Las anomalías conductoras se han interpretado, bien debido a la presencia de fracturas rellenas de sedimentos detríticos tipo arcilla o por la posibilidad de superficie, respectivamente.

Las principales conclusiones extraídas de acuerdo con el informe apuntan a que la unidad geológica presenta una resistividad moderada-baja. Se detectaron ciertas anomalías resistivas y otras anomalías conductoras. Las anomalías resistivas se ha interpretaron debido a la presencia de posibles cavidades como los ejemplos del perfil 1 de la figura 12 a 30 y 43 m desde el inicio del perfil en su longitudinal y a una profundidad de 6 y 9 m bajo la

Figura 23. Representación de las tomografías eléctricas relajadas por SGS. (Tomografías cedidas por el Ayuntamiento de Lucmañor)..



*[Handwritten signature]*

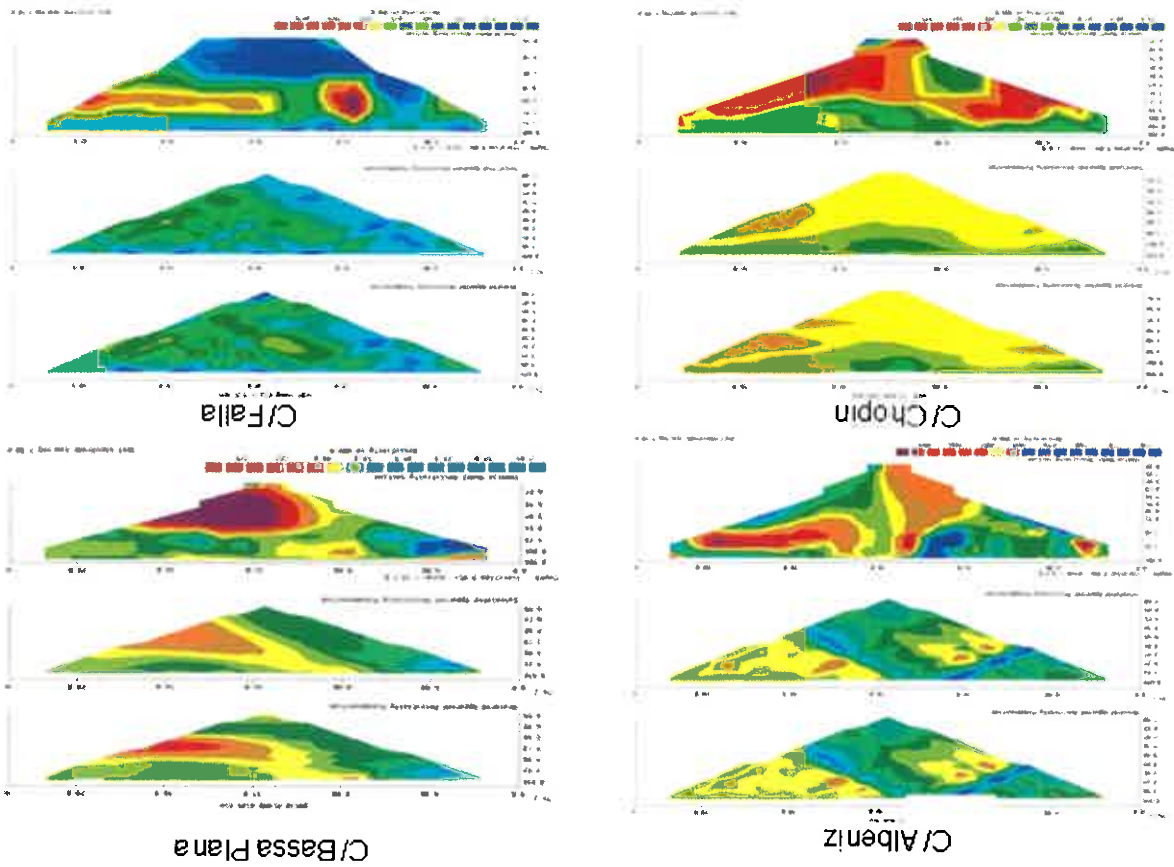
presencia de una cavidad parcialmente rellena de agua. Por ejemplo se muestra en el perfil 3 dos anomalías, en los metros 27 y 43 a una profundidad de entre 3 y 4 m bajo la superficie (figura 23).

No obstante, la revisión del informe ha permitido constatar un conjunto importante de anomalías tanto resistivas como conductivas y, fundamentalmente, destacan aquellas que presentan continuidad física espacial de la sección representada. Destacan sobre manera las anomalías resistivas observadas en el perfil 1, que se inicia a 4 m de profundidad y acaba en los 14 m, con continuidad en el espacial en la sección desde 35 a 53 m (figura 23). En el perfil 2 destaca la anomalía conductiva observada entre los 38 y 62 m con una profundidad de 12 m desde la superficie del terreno (figura 23). Y el perfil 3 con dos anomalías resistivas y una conductiva, todas con continuidad espacial; las primeras tienen su inicio a 2 m de profundidad y se extienden 4 m en la vertical; las segundas están en la base del perfil, con una potencia de 4-5 m (figura 12).

Estas anomalías, que inicialmente podrían ser cavidades, permiten por un lado la conexión hidráulica de la superficie del terreno con las cuevas y la previsible conexión con la propia Cova des Pas de Vallgornera. Hidráulicamente la conectividad es lógica dada las características del acuífero. Sin embargo, el hecho de que pueda ser una parte de la propia cueva hace de esta zona un área muy vulnerable a cualquier actividad que puedan realizarse en su entorno.

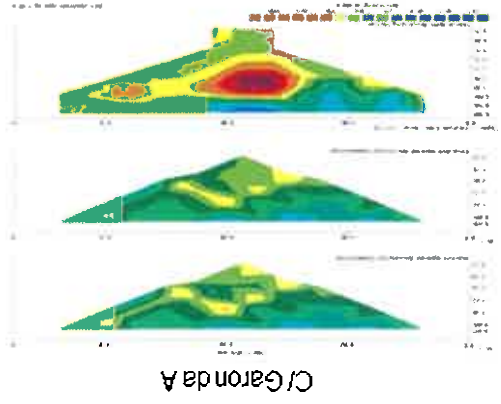
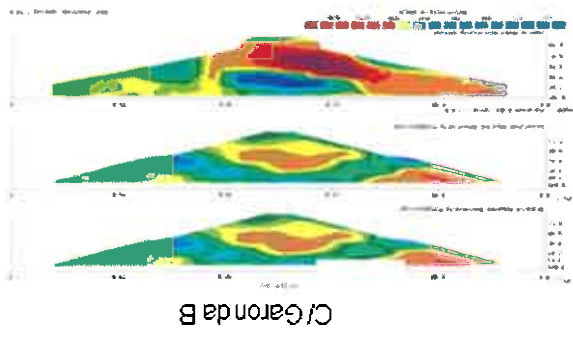
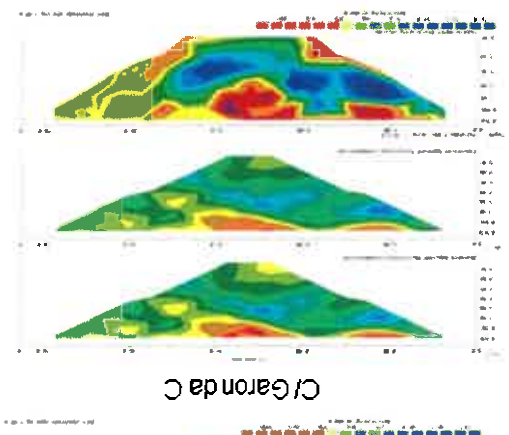
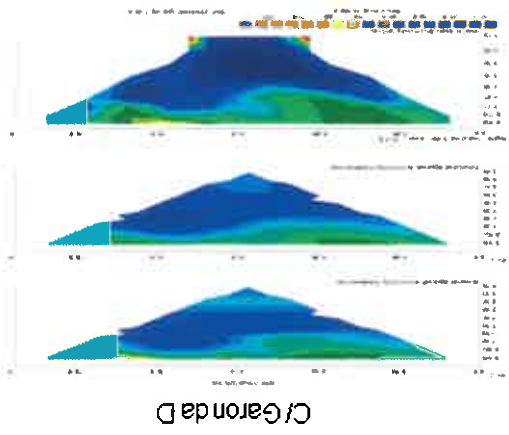
Por otra parte, la empresa el Ayuntamiento de Lluçmajor y GEOMA, nos han cedido una serie de tomografías eléctricas para su estudio y reinterpretación. En total se han revisado 19 tomografía, que muestran, al igual que la anterior, anomalías muy cerca de la superficie del terreno. También, existe una clara conexión hidráulica, pudiendo ser inclusive conductos ligados a la propia cavidad (figura 24). En algunos lugares de la urbanización de Cala Pi se

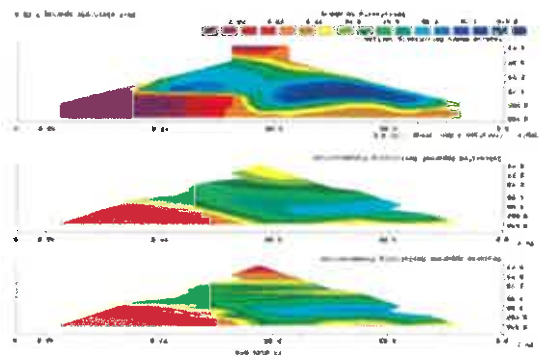




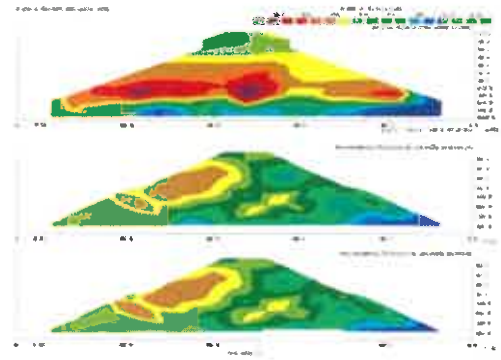
observan fracturas muy potentes que pueden conectar con cavidades de mayor tamaño, como se observa en la tomografía de la C/ Albeniz. En otras, como en la C/ Merola, Chopin o Torreo, las cuevas detectadas están a menos de 2,5 m de la superficie del terreno, lo que supone una zona de alto riesgo de colapso o subsidencia.

*Handwritten signature*

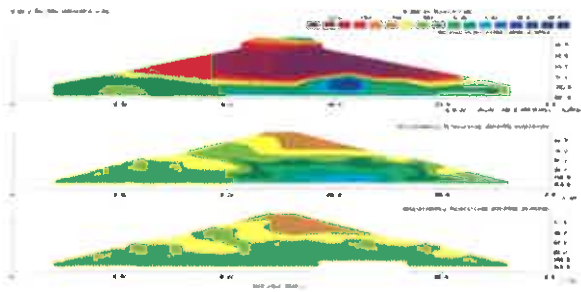




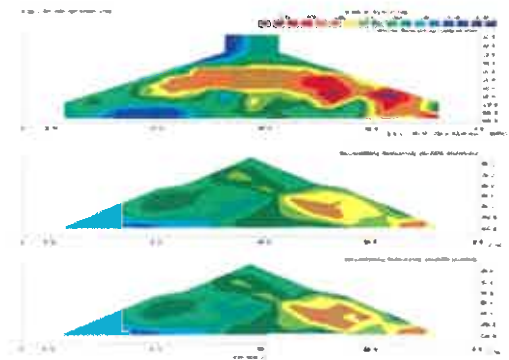
C/Merla C



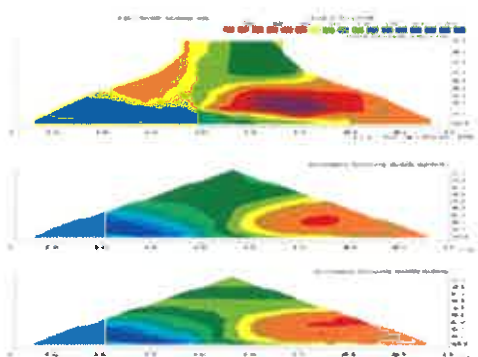
C/Merla B



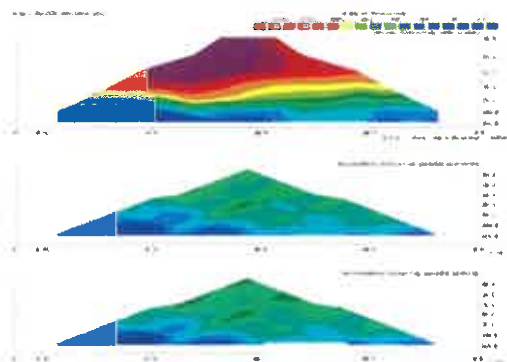
C/Merla A



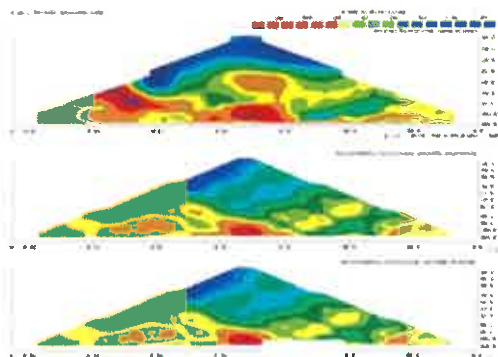
C/Gomera



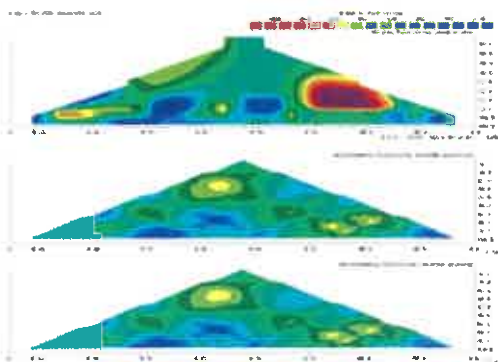
C/Pedres



C/Pedres B

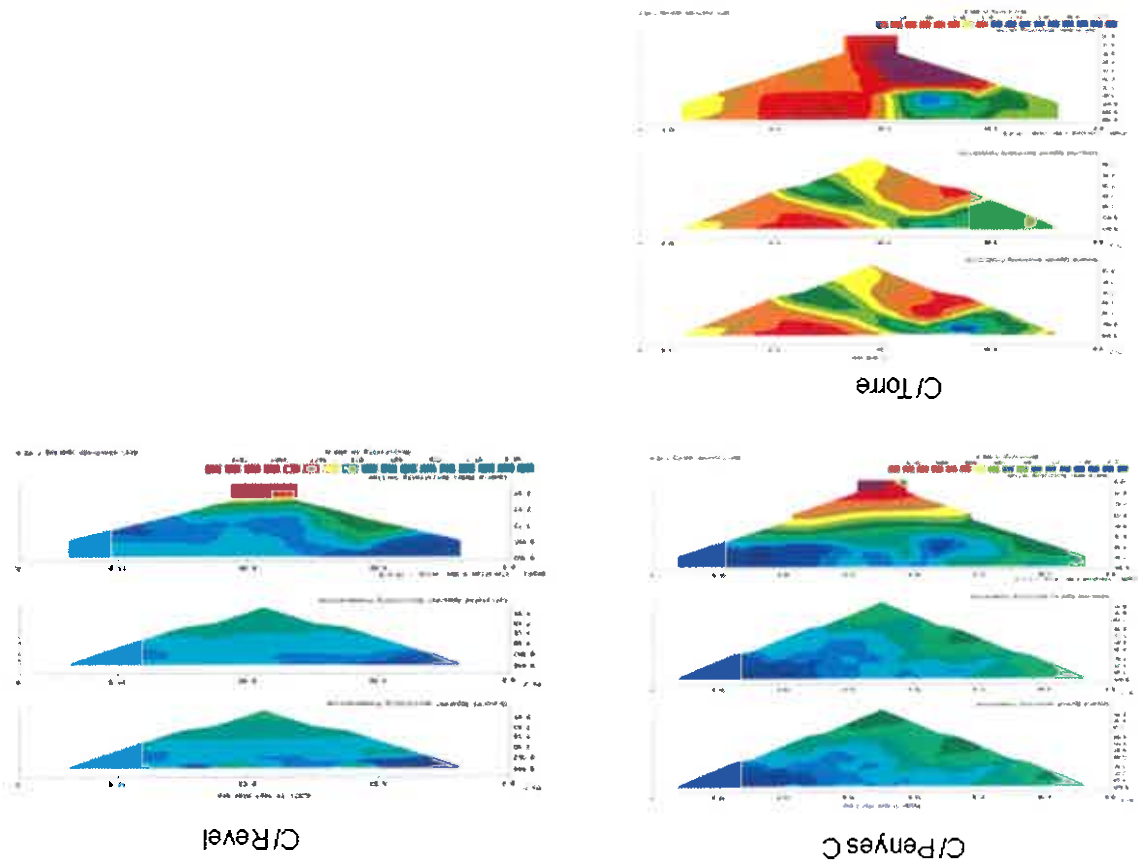


C/Paus Casals



C/Paus Casals B

Figura 24. Representación de las tomografías eléctricas. (Tomografías cedidas por GEOMA y el Ayuntamiento de Lucmañor).



*[Handwritten signature]*





*Handwritten signature in blue ink.*



Figuras 25. Detalle de un desprendimiento en Cala Pi, en el borde del frente acantilado.



Figuras 26. Imagen de pequeñas cavidades debajo de la urbanización de Cala Pi.



Figuras 28. Conjuntos de cavidades próximas a la superficie del terreno debajo de la urbanización de Cala Pi.



Figuras 27. Detalle de cuevas ubicadas a 1 m de profundidad debajo de la urbanización de Cala Pi.



*Handwritten signature in blue ink.*

Figuras 30. Continuidad físicas de las cavidades de las estratos superior de la zona de Cala Pi



Figuras 29. Cavity de tamaño importante cerca de la superficie del terreno en el límite de Cala Pi y Vallgornera.



*Handwritten signature in blue ink.*



Figuras 31. Imágenes en las que se observa la gran cantidad de cavidades y la cercanía de éstas a la superficie del terreno en facies próximas a la superficie del terreno. Esto constata el riesgo de colapso, subsidencia y desprendimiento derivado de cualquier actividad que se realice sobre la superficie de las urbanizaciones de Cala Pi, Vallgornera y Es Pas.



*Handwritten signature or initials in blue ink.*



MI



Figura 32. Ejemplos del gran desarrollo del karst en las facies del Complejo Arrecifal, con un elevado volumen de poros.



Figura 33. Ejemplos de el gran volumen de poros de origen kárstico en las facies del Complejo Arrecifal.



Figuras 34 y 35. Ejemplos del gran desarrollo del karst en las facies del Complejo Arrecifal y el alto grado de alteración de la roca. Este aspecto corrobora el riesgo de colapso y hundimiento derivado de cualquier actividad constructiva sobre las urbanizaciones de Cala Pi, Es Pas y Vallgornera.



*[Handwritten signature]*





Figuras 36. Imagen de una de las fosas sépticas detectadas que conecta directamente con la Cova des Pas de Vallgornera.



*[Handwritten signature]*

### Discusión

Los estudios hidrogeológicos sobre las zonas acuíferas que comprenden las urbanizaciones de Cala Pi, Vallgornera y Es Pas, han puesto de manifiesto que existe un gran bloque acuífero que se compartimentan en bloques menores. El estudio de la fracturación y las fallas nos han permitido localizar un sub-bloque que hemos denominado Cala Pi-Vallgornera, de aproximadamente 24,58 km<sup>2</sup> de extensión. Este bloque, muestra particularidades hidráulicas específicas, debido a la distribución de facies en la plataforma, ya que está compuesto en por facies de frente arrecifal, lagoon y talud. Esto hace que una parte importante sea muy transmisivo y, por tanto, que el flujo de agua subterránea sea muy rápido, con dirección N-S.



Las cartografías y la cuantificación de la permeabilidad, muestra una distribución heterogénea entre zona con valores elevados, otras que muestran valores intermedios y la zona de las urbanizaciones que presenta valores bajos, debido a la poca permeabilidad de los viales y otras construcciones. Para ello, se ha procedido a realizar un mapa de vulnerabilidad hidrogeológico a la contaminación con respecto a la Cueva de Pas de Vallgornera (figura 35). Para esta cartografía se han utilizado cuatro variables ponderadas (donde 1 es el valor más bajo de peligrosidad y 5 el más alto): 1) permeabilidad, 2) litología, 3) tiempo en que tarda una gota de agua en llegar a la cavidad y 4) pendiente. El mapa muestra que en el bloque acuífero todas las zonas son de vulnerabilidad elevada, especialmente el área dibujada (vulnerabilidad muy alta, con 3,86 km<sup>2</sup>) porque aglutina una parte de la zona urbana y el conjunto total de la cavidad. La zona de Cala Pi, se considera de alta vulnerabilidad (0,54 km<sup>2</sup>) debido a la cercanía a la cavidad y a las características hidráulicas de la cueva. Debido a que no hay conductos de la cueva que alcancen esta zona no se considera hidrogeológicamente vulnerable. El resto del bloque acuífero se considera una zona de vulnerabilidad moderada (un total de 20,18

km<sup>2</sup>), debido tanto, a la distribución heterogénea de permeabilidades y a que la cueva no recae bajo ella. No obstante, es importante destacar que la cueva está en la zona de descarga del acuífero y cualquier actividad que se realice aguas arriba de la misma tendrá un impacto directo sobre la cavidad.

Respecto la revisión de los estudios geofísicos y el estudio sobre el terreno de la zona de roca que linda con la superficie del terreno se ha constatado que existe una gran cantidad de huecos y cavidades (figuras 25, 26, 27, 28, 29, 30 y 31). En las zonas próximas a la urbanización de Vallgornera y Es Pas, alguna de estas cavidades podría estar conectada con la propia cueva. También se han observado zonas con un elevado grado de karstificación, ligadas a zonas de corales del frente arrecial y el lagoon externo. Como ejemplo de este aspecto se han estudiado los afloramientos de una cantarrera cercana a Cala Pi en la que ha podido cuantificarse de forma precisa el volumen de poros además de las pequeñas cuevas que se han desarrollado en estas facies (figuras 32, 33, 34 y 35). Este hecho, pone de relieve que existe un alto riesgo de hundimiento, colapso y subsidencia, ligado a las actuaciones invasivas sobre el terreno, como obras y construcciones. Para mostrar este aspecto se ha procedido a elaborar un mapa de peligrosidad en el que se ha valorado un índice con cuatro variables ponderadas (donde 1 es el valor más bajo de peligrosidad y 5 el más alto): 1) superficie ocupada por superficie de cavidad, 2) construcciones, 3) potencia de roca por encima de las cuevas y 4) bombeos. El resultado muestra como todo la zona de las urbanizaciones, adyacentes a la cavidad son de de peligrosidad muy alta (un total de 4,40 km<sup>2</sup>) (figura 36). El resto, al norte de la cueva y de las urbanizaciones, con un total de 20,18 km<sup>2</sup> representa una peligrosidad moderada. Este aspecto enfrenta dos puntos clave, contaminación y posibilidad de hundimiento, lo que dificulta evaluar la viabilidad de un alcantarillado convencional, obras constructivas y fosas sépticas enterradas. La necesidad de un alcantarillado y fosas sépticas estancas es un aspecto evidente para cualquier núcleo de naturaleza urbana.

No obstante, el riesgo de colapso y hundimiento también es evidente, lo que dificulta ejecutar una obra de tal envergadura y crea una importante incertidumbre.

## Conclusiones

1. Hidrogeológicamente, el área de las urbanizaciones es de vulnerabilidad muy alta y alta respecto a la contaminación de las aguas subterráneas y el posible impacto que puede tener en la cueva, lo que implica la necesidad de implementar un sistema eficaz para el tratamiento o recogida de las aguas pluviales y fecales.

2. Dadas las características geológicas e hidrogeológicas del sub-bloque acuífero Cala Pi-Vallgornera, y de la Cova des Pas de Vallgornera, a tenor de los datos obtenidos, directos e indirectos, hasta el momento, una obra de alcantarillado supone un elevado riesgo de hundimiento, por lo que su ejecución es muy poco viable y, en caso de realizarse, debería contar con todas las garantías necesarias para evitar riesgos de colapso y alteración del sistema ambiental de la cavidad. Es por tanto necesario bajar alternativas a la construcción de un alcantarillado para las aguas fecales y pluviales que garanticen la calidad de las aguas subterráneas en general y la conservación de la cueva en particular. Este aspecto ya se ponía de manifiesto también en el informe de SGS realizado en junio de 2008.

3. El ensayo de bombeo ha puesto de manifiesto la alta transmisividad del acuífero en la zona donde está previsto la construcción del alcantarillado. Por ello, en caso de construir la depuradora y que esta vierta las aguas tratadas sobre el terreno, podría modificar rápidamente

la geocimica de las aguas subterráneas, alterando en último término el agua de la cueva y el sistema ambiental asociado.

4. Los torrentes que atraviesan el sub-bloque acuífero Cala Pi-Vallgornera son todos perdedores, por lo que el vertido de aguas residuales depuradas en estos cauces supone un elevado riesgo de infiltrarse a la cavidad. Aunque la depuración del agua sea muy elevada, no garantiza que no se modifiquen los parámetros hidrogeocimicos del agua del acuífero y, por tanto, del agua de la cueva, dando lugar a cambios ambientales e, incluso, un impacto en organismos troglobios que viven en su interior.

5. Los análisis microbiológicos realizados por la Conselleria de Medi Ambient del Govern de les Illes Balears en las aguas de la cavidad muestran que existe contaminación en fecal por enterococos, y por tanto, contaminación de las aguas subterráneas en este acuífero. Aunque se desconoce la procedencia, como indica el informe de la Conselleria de Medi Ambiente citado en este informe, la conexión de fosas sépticas con la cavidad, como se ha observado sobre el terreno, parece indicar que es lógica que un parte proceda de estos focos de vertido urbano.

6. En relación a las soluciones preguntadas al IGME por el Ayuntamiento de Llucmajor, entre un sistema de recogida de aguas fecales por vacío en las urbanizaciones de Cala Pi, Vallgornera Nou y Es Pas de Vallgornera, con una conducción a una estación depuradora a 4,2 km al norte o, por el contrario, hasta la estación depuradora del Arenal, a 17,6 km, ambas son soluciones muy poco viables. Sobre la primera, se ha puesto de manifiesto en este informe el riesgo de modificar los parámetros geocimicos del agua subterránea y la vulnerabilidad de los



1- El elevado riesgo de hundimiento sobre la cavidad y en otras zonas de las urbanizaciones de Cala Pi, Vallgornera y Es Pas, ligado a la construcción de viviendas y a la construcción de un alcantarillado desaconseja que se ejecute esta obra hasta no tener garantías de su

### Recomendaciones

Es importante implementar las medidas recomendadas en el informe de 2014 realizado por este IGM para garantizar la calidad de las aguas subterráneas y la conservación de la cavidad. opción.

8. De los sistemas tipificados para recogida de aguas fecales homologados en el Plan Hidrológico de les Illes Balears, 2015 (Anexo 4) a los que se pregunta a este IGM, se considera el más efectivo el sistema de oxidación total ya que cumple con las necesidades previstas para una zona altamente vulnerable como la estudiada. No obstante y dada las características del subsuelo, debería considerarse en cada caso, la posibilidad elevarlos sobre la superficie del terreno, a fin de minimizar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y de la cueva en caso de fuga o vertido.

7. En relación a la segunda pregunta sobre la implantación de sistemas de individuales de recogida de aguas fecales homologados en Cala Pi, Vallgornera Nou y Es Pas de Vallgornera en edificaciones antiguas y modernas, es una opción viable, más sostenible y que genera menos impacto sobre el medio.

torrentes que cercanos si se vierte las aguas depuradas tratadas. En relación a la segunda, la distancia entre ambos puntos y las características geológicas y topográficas del transecto, podrían suponer un impacto geoambiental muy notable en una zona altamente sensible como es la Marina de Luçmajor.

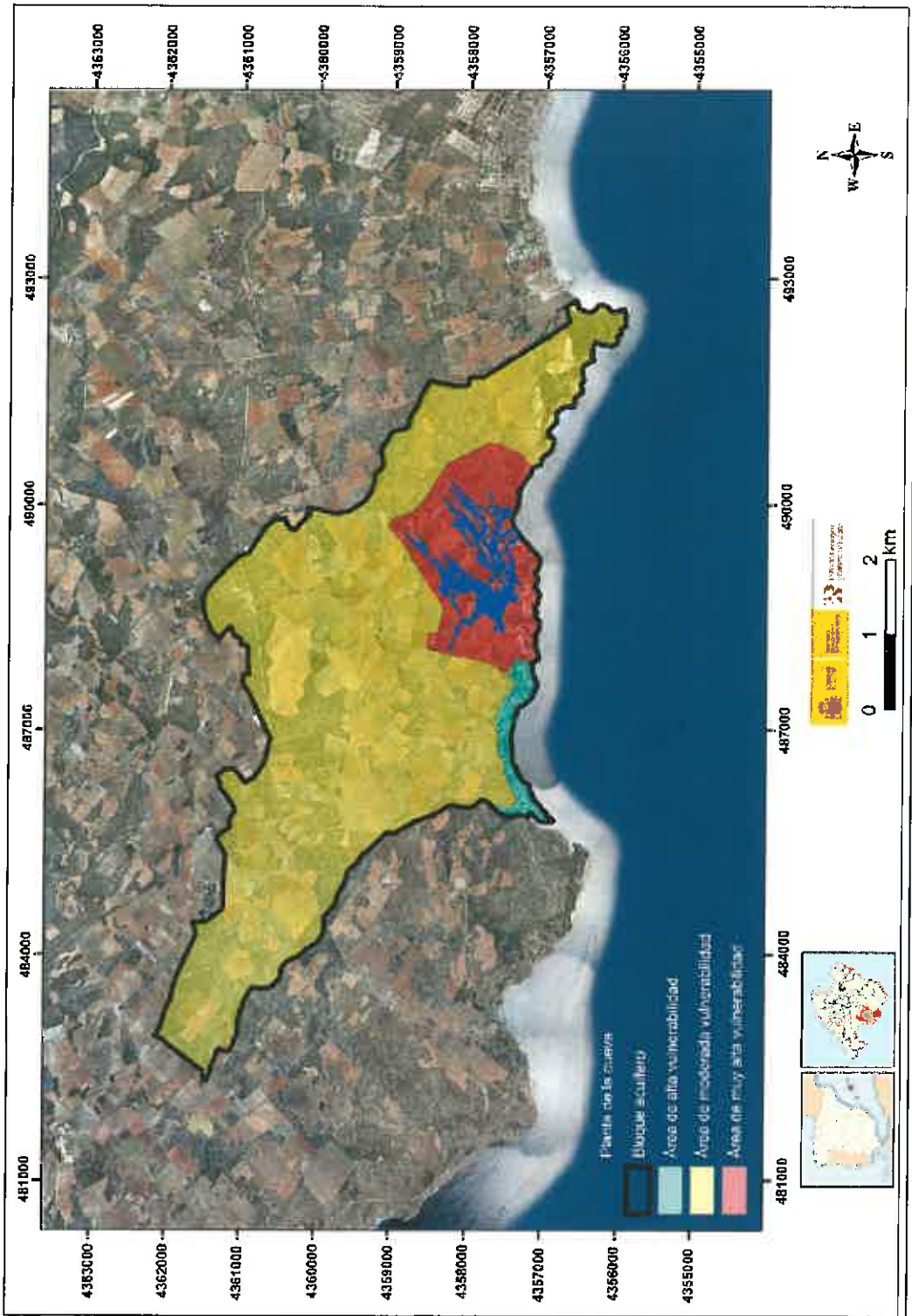
viabilidad, y que en su defecto se implemente fosas sépticas homologadas. En caso de querer realizar una construcción invasiva de la envergadura de un alcantarillado sobre las urbanizaciones, en cualquiera de sus tipologías, se debe constatar previamente con un estudio muy específico si es posible su viabilidad. Para ello, se recomienda realizar estudios geofísicos en 3D y sondeos poco profundos sobre todos los viales de las urbanizaciones de Cala Pi, Vallgornera y Es Pas, en los que se detecten anomalías. Con esto, se conocerá específicamente en cada zona el riesgo de colapso o hundimiento y se podrá valorar la posibilidad real de implantación o no. En preceptivo apuntar que en algunos de los viales estudiados una obra invasiva supone un alto riesgo de colapso.

2- Se recomienda que se clausuren todas fosas sépticas de las viviendas de cualquier tipo que conectan con la cavidad, algunas de las cuales se han detectado durante este trabajo. En su defecto, se recomienda que se implemente sistemas nuevos y modernos para las aguas fecales apuntados en las conclusiones de este informe con las modificaciones sugeridas.

3- Se recomienda un estudio específico sobre la calidad de las aguas subterráneas en la cueva y determinar el origen u orígenes de la contaminación microbiológica y, si cabe, de otros tipos de contaminantes, como una mayor concentración de cloruros ligado a bombeos intensivos que generen intrusión de agua marina en el acuífero, o altos contenidos en ion nitrato.

4- Se recomienda crear una comisión mixta entre el Ayuntamiento de Lluçmaior, la Administración Competente y otros organismos expertos de otras administraciones para evaluar las posibilidades de ejecución de

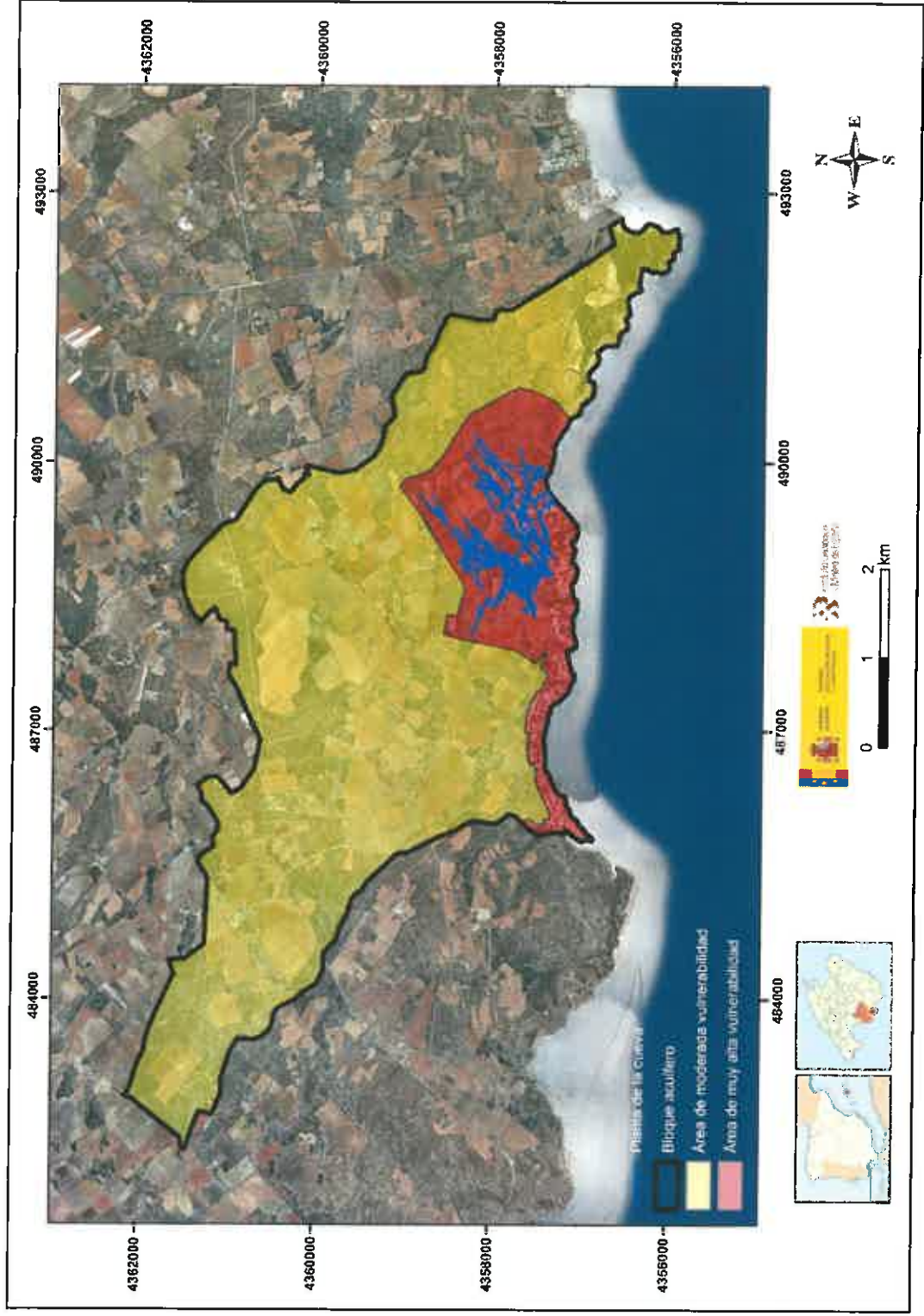
un proyecto de alcantarillado o de una alternativa viable a éste, que permita dotar de un instrumento para la gestión de las aguas residuales.



*WT*

Figura 35. Mapa de vulnerabilidad hidrogeológica a la contaminación con respecto a la Cova des Pas de Vallgornera.





*Handwritten signature*

Figura 36. Mapa de riesgo de colapso y hundimiento e con respecto a la Cova des Pas de Vallgornera.

## Referencias

- Análisis y Gestión del Subsuelo, S.L. 2004. Prospección geofísica mediante tomografía eléctrica para la detección de cavidades en la urbanización de Vallgona (Llucmajor, Mallorca). 14 p.
- Alvaro, M., Barnolas, A., Del Olmo, P., Ramírez Del Pozo, J. y Simó, A. 1984 a. El Neógeno de Mallorca: Caracterización sedimentológica y bioestratigráfica. *Boletín Geológico y Minero*. 98 (5). 3-25.
- Barón, A., y Pomar, L. 1985. Stratigraphic correlation tables: Neogene of the Mediterranean. En: Tethys and Paratethys, F.F. Steininger, J. Senes, K. Kleemann y F. Rog (eds). Institute of Paleontology. University of Vienna. 17 p.
- Boyer P., Valenzuela A., Guerra C., Rofes J., Alcover J.A., Ginés J., Fornós J.J., Cuenca-Bescós G. y Merino A., 2014. The Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca): an singular deposit containing an extraordinarily well preserved Early Pleistocene vertebrate fauna. *International Journal of Speleology*. 43 (2): 175-192.
- Butzer, K.W. y Cuenda, J. 1962. Costal stratigraphy of southern Mallorca and its implications for the Pleistocene chronology of the Mediterranean sea. *Journal of Geology*. (70) 4, 398-416.
- Colom, G. 1975. Geología de Mallorca. Diputación Provincial de Baleares. Instituto de estudios Balearicos. Vol 2, 519 p. Palma de Mallorca.



Cuerda, J. 1975. Geología de Mallorca. Diputación Provincial de Baleares. Instituto de Estudios Balearicos. 2 Vol. 519 p. Palma de Mallorca.

Davis D.G., Palmer M.V. y Palmer A.N., 1990 – Extraordinary subaqueous speleothems in Lechuguilla cave, New Mexico. *NSS Bulletin*, 52: 70-86.

Dorale J.A., Onac B.P., Fornós J.J., Ginés J., Ginés A., Tucumei P. y Peate D.W., 2010. Sea-level high stand 81,000 years ago in Mallorca. *Science*, 327: 860-863.

Esteban, M., Calvet, F., Dabrio, C., Barón, A., Giner, J., Pomar, L. y Salas, R. 1977. Messinian (Uppermost Miocene) reef in Spain: morphology, composition and depositional environments. *Third International Coral Reef Symposium*. (Abstracts), Miami, USA

Ford D.C. y Williams P.W., 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 562 p.

Fornós, J. y Pomar, L. 1985. Facies, ambientes y secuencias de plataforma carbonatada somera (Formación de Calizas de Santanyi) en el Mioceno Terminal de Mallorca. *Islas Baleares. Publicaciones de Geología*. Homenaje a Luis Sánchez de la Torre. 20, 319-339.

Fornós J.J., Pomar L. y Ramos Guerrero E. 2002. Balearic Islands. En: Gibbons W. y Moreno T. (Eds.). *The Geology of Spain*. London: the Geological Society: 327-334.

Gelbert, B. 1988. La estructura geológica de la mitad occidental de la Isla de Mallorca. *Instituto Tecnológico y Geominero de España*. 129 p. Madrid.

GEOEXPLORER.ES. 2010. Reconocimiento exploratorio mediante radar del solar municipal nº181 situado en la c/ Dalí nº 47 de la urb. de Vallgornera Nou para la detección de posibles cavidades y karstificaciones en el terreno. 20 p.

Gillieson D.S., 1996. Caves, Processes, development and management. Blackwell Publishers, Oxford, 324 p.

Gillieson, D.S. 1996. Caves: processes development and management. Cambridge, MA and Oxford: Blackwell. 324 p.

González-Donoso, J.M., Linares, A., Pascual, U. y Serrano, F. 1982. Datos sobre la edad de las secciones del Mioceno inferior del Port d'Es Canonge y Randa (Mallorca). Boletí de la Societat d'Història Natural de les Illes Balears. 26, 229-232.

Hodge E.J., 2004. Palaeoclimate of the Western Mediterranean region: results from speleothems. Unpublished PhD Thesis, University of Bristol, 246 p.

IGME, 2003. El estado actual de las aguas subterráneas en la isla de Mallorca, 2003 (informe técnico). 44 pp. y anexos.

IGME, 2006. Islas de Agua. Patrimonio Geológico e Hidrogeológico de las Islas Balears. Durán J.J. Coord. Instituto Geológico y Minero de España; Conselleria de Medi Ambient de les Illes Balears. 256 p.

IGME, 2013. Las Aguas subterráneas y la Red Natura 2000. Murillo J.M. (Ed.). Instituto Geológico y Minero de España. 416 p.

Lores, B., Robledo, P.A. y J.J. Durán. 2012. Algunos aspectos de interés de las relaciones entre el dominio público marítimo-terrestre y los acuíferos costeros. El caso de la isla de Mallorca, Baleares, España. En: J.A. López-Geta, M.

Fernández Mejuto, G., Ramos González, L., Rodríguez Hernández (Eds). Nuevas aportaciones al conocimiento de los acuíferos costeros. Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas nº 20. (2 vol.) 321-333.

López García, J.M., Mateos Ruiz, R. M<sup>a</sup>. y Ballester Rodríguez, A. 2004. Aportaciones del sondeo de investigación geotérmica Luis Moragues al modelo de funcionamiento hidrogeológico de las aguas termales de la plataforma de Lucmajor (Mallorca). Actas del VIII Simposio de Hidrogeología. Asociación Española de Hidrología. 379-388.

Merino A., 2000 – Nuevas extensiones de la Cova des Pas de Vallgornera (Lucmajor, Mallorca). Endins, 23: 7-21.

Plan Hidrológico de las Islas Baleares. 2015. Govern de les Illes Balears. Conselleria de Medi Ambient. 279 p. Palma de Mallorca.

Pons-Moyà, J. y Moyà-Sola, S. 1979. La fauna de Carnívoros del Pleistoceno medio (Mindel) de la Cova Victoria (Cargena, España). Acta Geol. Hisp. 2, 13.54-58. Barcelona.

Pomar, L. 1989. Espeleotemas freáticos. Karst litoral y oscilaciones del nivel del mar durante el Cuaternario en la Isla de Mallorca. En: J.J. Durán y J. López (eds). El karst en España. Sociedad Española de Geomorfología. Monografía 4, 265-275. Madrid.

Pomar, L. 1991. Reef geometries, erosion surfaces and high-frequency sea-level changes, Upper Miocene Reef Complex, Mallorca, Spain. Sedimentology, 38, 243-269.

Pomar, L. 1993. High-resolution Sequence Stratigraphy in Prograding Carbonates: Application to Seismic Interpretation. Capítulo 15. En Carbonate Sequence Stratigraphy: Recent Advances and Applications: B. Loucks and R. J. Sarg (eds). American Association Petroleum Geologist Memory. 57, 545.

Pomar, L. 2001. Types of carbonate Platforms. Basin Research, 13: 313-334.

Pomar L., Ginés A. y Ginés J. 1979. Morfología, estructura y origen de los espeleotemas epiacuáticos. Endins, 5-6: 3-17.

Pomar, L., Obrador, A. Fornós, J. y Rodríguez-Perea, A. (eds). 1983 b. El Tercario de las Baleares. Guía de las excursiones. X Congreso Nacional de Sedimentología. Menorca 83. Institut d'Estudis Balearics. Universidad de Palma de Mallorca. 177-206. Palma de Mallorca.

Pomar, L., Rodríguez-Perea, A., Fornós, J.J., Ginés, A., Ginés J., Font, A. y Mora, A. 1987. Phreatic speleothems in coastal caves: a new regional method to determine sea-level fluctuations. En: Zazo, C., (Ed). *Late Quaternary sea-level change in Spain. Museo Nacional de Ciencias Naturales. CSIC. Trabajos sobre el Neógeno-Cuaternario*. 10, 197-224. Madrid.

Pomar, L. y Ward, W.C. 1995. Sequence Stratigraphy and depositional response to eustatic, tectonic and climatic forcing: Klumer Academic Publishers. *Geology*. 87-112.

Ramos, E., Cabrera, L., Hageman, H.W., Pickel, W. y Zamareño, I. 2001. Paleogene lacustrine record in Mallorca (NW Mediterranean Spain): Depositional, paleogeographic and paleoclimatic implications for the ancient southeast Iberia margin. *Palaogeography, Palaoclimatology, Palaecoecology*. 172, 1-37.

Robledo, 2005. Los paleocollapsos kársticos de las plataformas carbonatadas del Mioceno superior de Mallorca. Modelo geográfico, genético, geológico y evolutivo. Tesis Doctoral. Universidad de las Islas Baleares. 366 p.

Robledo, P.A., Durán, J.J., Garay, P. y García, J., 2009 a. 8310. Cuevas no explotadas por el turismo. En: VV.AA. Bases Ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, 53 p.

Robledo P.A., Durán, J.J. y Mateos R.M., 2009 b. Las covas de Mallorca como parte del patrimonio geológico y natural de las Islas Baleares. Hacia una ordenación turística sostenible: En: López, J., Durán, J.J. y Robledo, P.A. (eds), Covas Turísticas, Covas Vivas. Asociación de Covas Turísticas Españolas, Madrid, 305-317.

Robledo P.A., Mateos, R.M y López, J.M., 2009 c. Thermal anomalies and cave structures: possible thermal origin of the Vallgornera Cave (Majorca, Spain). En: Medimond S.R.L. Thomson Reuters SCI Proceedings. 27th IAS Meeting of Sedimentology. Philadelphia (USA), 147-151.

Robledo, 2010. Informe sobre la instalación de una red sensores en la Cova des Pas de Vallgornera (T.M. Lluçmaior, Mallorca) para el control de los parámetros ambientales frente a la futura construcción de la red de alcantarillado en las urbanizaciones de es Pas y Vallgornera. Instituto Geológico y Minero de España. Informes Técnicos, 10 p.

Robledo, P.A., Durán, J.J. y Tienda, T. 2014. Análisis de espeleotemas mixtos y su relación con paleoniveles eustáticos en la Cova des Pas de Vallgornera,





Mallorca, España. Actas del 1er Congreso Iberoamericano y 5º Congreso Español sobre Cuevas Turísticas. Arcena, España (en prensa).

Robledo, 2014. Informe científico-técnico sobre los perímetros de protección en torno a la Cova des Pas y Vallgornera. Instituto Geológico y Minero de España. Informes Técnicos, 78 p.

Sabat, F. 1986. *Estructura geológica de les Serres de Llevant de Mallorca (Balears)*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona. 128 p. España.

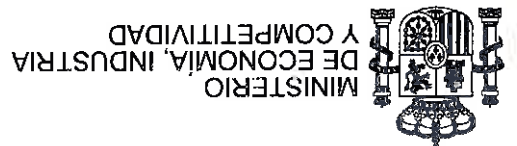
SGS Techno S.A. 2008. Estudio del impacto del proyecto de instalación de redes de saneamiento en la urbanización de Vallgornera en las galerías cartografiadas de la Cova des Pas de Vallgornera, en el T.M. de Llucmajor (Mallorca) 31 p.

Tucumei P., Ginés J., Delitola C., Ginés A., Gràcia F., Fornós J.J. y Taddeucci A., 2006. Last interglacial sea level changes in Mallorca island (Western Mediterranean). High precision Useries data from phreatic overgrowths on speleothems. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 50 (1): 1-21.

Tucumei P., Soligo M., Ginés J., Ginés A., Fornós J.J., Kramers J. y Villa I.M., 2010. Constraining Holocene sea levels using U-Th ages of phreatic overgrowths on speleothems from coastal caves in Mallorca (Western Mediterranean). *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (7): 782-790.

Wadsworth, W. J. y Adams, A. E. 1989. Miocene volcanic rocks from Mallorca. *Proceedings Geological Association*. 100, 107-112.

*[Handwritten signature]*



Jefe de la Unidad del IGME en las Islas Baleares



Pedro Agustín Robledo Ardila