

Gestión y valoración de datos hidrogeológicos de la isla de Menorca

TRABAJO FINAL PRESENTADO POR:

Margalida COMAS COLOM

DIRIGIDO POR:

Violeta VELASCO MANSILLA / Mar GARCÍA ALCARAZ

CO-DIRIGIDO POR:

M^aConcepción GONZÁLEZ CASASNOVAS

Barcelona, 3 de julio de 2015

MÁSTER PROFESIONAL EN HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA
3ª EDICIÓN 2014-2015
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
FUNDACIÓ CENTRE INTERNACIONAL DE HIDROLOGIA SUBTERRANEA

Los miembros del Tribunal de Calificación damos fe de haber leído el Trabajo
Final de Máster presentado por

Margalida COMAS COLOM

titulado

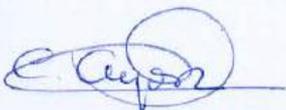
Gestión y valoración de datos hidrogeológicos de la Isla de Menorca

dirigido por Violeta VELASCO MANSILLA / Mar GARCÍA ALCARAZ

Y recomendamos su aceptación para el cumplimiento de los requisitos del

MÁSTER PROFESIONAL EN HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

con la calificación de *NOTABLE (8)*



Dr. Carlos Ayora Ibáñez



Dr. Daniel Fernández-García



Dr. Enric Vázquez-Suñé



Dra. Violeta Velasco Mansilla

3 de julio de 2015

AGRADECIMIENTOS

A las directoras del trabajo, Violeta Velasco Mansilla y Mar García Alcaráz, por el seguimiento del trabajo, por su interés y sus buenos consejos.

A Margarida Valverde por su atención y disposición.

A los que fueron el Jefe de Servicio y la Jefa de Sección, del *Servei d'Estudis i Planificació* (SEP) de la *Direcció General de Recursos Hídrics del Govern Balear*, hasta 2013, Alfredo Barón Périz y M^aConcepción González Casanovas, por su entusiasmo y hospitalidad. A Concha especialmente por su dedicación en la codirección del trabajo, y a Alfredo por la revisión de su modelo hidrogeológico.

A los vigilantes de explotación de Menorca del SEP, Pere Sáez, José Sales y Federico Moll, por el trabajo de campo realizado todos estos años. A mis compañeros del SEP en general por los ánimos, y en especial a Jordi Giménez por facilitarme el Balance Hídrico del PHIB.

A Txema López del Instituto Geológico y Minero de España, IGME Palma, por su atención y administración de datos.

A mis amigos, a mis padres, a mi hermana y a Laura, por ser siempre tan atentos. Y muy especialmente, a Pere, por su apoyo incondicional durante toda la realización del Máster.

RESUMEN

La disponibilidad de recursos hídricos naturales en la isla de Menorca se encuentra muy ligada al régimen pluviométrico mediterráneo, a la naturaleza geológica, a la insularidad y a la demanda y gestión del agua. Los recursos naturales disponibles proceden en su totalidad de las aguas subterráneas. Se plantea la necesidad de gestionar el recurso mediante herramientas que permitan, por una parte, la visualización de los principales procesos hidrogeológicos que se dan en los acuíferos de la isla, como son la intrusión salina, la contaminación difusa por nitratos, el descenso de niveles piezométricos o la variación de almacenamiento y, por otra parte, que permitan desarrollar y/o apoyar modelos conceptuales del funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos y permitan la elaboración de planes de gestión del recurso.

Se ha recopilado y almacenado información histórica de la isla en una Geodatabase (HYDOR). Se han utilizado las herramientas HEROS10, HEROS 3D, QUIMET e HYYH, basadas en un soporte de Sistema de Información Geográfica ArcMap 10.0., para la gestión de dicha información. Se ha obtenido una visualización y representación espacial y temporal de datos hidroquímicos e hidrogeológicos, y un modelo geológico del acuífero mioceno en 3D, que ha servido para mejorar el modelo conceptual a nivel regional. A nivel local, se ha hecho una aplicación de las herramientas a más detalle para el acuífero mioceno de la Masa de Agua Subterránea *Ciutadella*, consiguiendo resultados útiles para la realización de un plan de gestión y un modelo geológico en 3D, caracterizado con parámetros hidráulicos y balance hídrico, para un futuro modelo de flujo y/o transporte.

Palabras clave: acuífero mioceno, intrusión salina, nitratos, gestión, modelo geológico 3D.

ABSTRACT

The availability of natural water resources on the island of Menorca is closely linked to the Mediterranean rainfall regime, the geological nature, insularity, water demand and management. Natural resources come entirely from groundwater. It is necessary to manage resources through tools that allow, on the one hand, the visualization of the main hydrogeological processes occurring in the aquifers of the island, such as saltwater intrusion, diffuse nitrate pollution, declining piezometric levels or storage variation, and, moreover, develop and / or support the hydrogeological conceptual models of aquifers and allow the development of resource management plans.

Historical information has been collected in a Geodatabase (HYDOR). Tools based on a support of GIS ArcMap 10.0. (HEROS10, HEROS 3D, HYYH and QUIMET), has been used for the management of such information. It has obtained a visualization and spatial and temporal representation of hydrochemical and hydrogeological data, and a geological model 3D of Miocene aquifer, which has served to enhance the conceptual model at regional level. Locally, has done an application of the tools in more detail in the Miocene aquifer of the groundwater body *Ciutadella*, getting useful results for conducting a management plan and 3D geological model characterized by hydraulic parameters and water balance for a future model of flow and / or transport.

Keywords: Miocene aquifer, saline intrusion, nitrates, management, 3D geological model.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. MOTIVACIÓN	14
1.2. ANTECEDENTES	15
1.2.1. TRABAJOS REALIZADOS	15
1.2.2. INFORMACIÓN DISPONIBLE	16
1.2.2.1. DATOS	16
1.2.2.2. CARTOGRAFÍA	18
1.2.2.3. ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS	18
1.3. OBJETIVOS	19
1.3.1. OBJETIVO PRINCIPAL.....	19
1.3.2. OBJETIVO SECUNDARIO.....	19
1.4. METODOLOGÍA.....	20
1.4.1. INTRODUCCIÓN DE DATOS EN HYDOR.....	20
1.4.2. GESTIÓN DE DATOS CON LAS HERRAMIENTAS HEROS, QUIMET Y HYYH.....	22
1.5. SITUACIÓN GEOGRÁFICA DE MENORCA.....	23
2. MODELO CONCEPTUAL REGIONAL. ISLA DE MENORCA	24
2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO	24
2.1.1. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	24
2.1.2. MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA Y ANTIGUAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	27
2.1.3. CONSIDERACIONES SOBRE EL MODELO GEOLÓGICO EN 3D, REGIONAL Y LOCAL.....	28
2.1.4. UNIDADES Y SUBUNIDADES CONSIDERADAS PARA EL MODELO GEOLÓGICO EN 3D	29
2.2. MODELO CONCEPTUAL REGIONAL	32
2.2.1. LÍMITES Y GEOMETRÍA	32
2.2.2. ACUÍFEROS	33
2.2.3. PIEZOMETRIA Y FLUJO	34
2.2.4. CALIDAD.....	44
2.2.5. PARÁMETROS HIDRÁULICOS.....	49

2.2.6. BALANCE (RECARGAS-ENTRADAS, VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO, DESCARGAS-SALIDAS).....	52
2.3. MODELO GEOLÓGICO-HIDROGEOLÓGICO EN 3D DEL ACUÍFERO MIOCENO	56
3. MODELO CONCEPTUAL LOCAL. MIOCENO DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA CIUTADELLA	63
3.1. PARÁMETROS HIDRÁULICOS	63
3.2. BALANCE (RECARGAS-ENTRADAS, VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO, DESCARGAS-SALIDAS).....	65
3.3. MODELO GEOLÓGICO-HIDROGEOLÓGICO EN 3D DEL ACUIFERO MIOCENO DE LA MASA DE AGUA CIUTADELLA	72
3.4. PLAN DE GESTIÓN PARA EL MIOCENO DE LA MASA DE AGUA DE CIUTADELLA	79
4. CONCLUSIONES.....	81
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Visualización de los pozos registrados en <i>Illes Balears</i>	15
Figura 2. Red de control de aguas subterráneas del <i>Govern Balear</i> . Isla de Menorca.	17
Figura 3. Situación geográfica de la Isla de Menorca.	23
Figura 4. Mapa Geológico y red hidrogáfica básica de la Isla de Menorca.	25
Figura 5. Mapa de Masas de Agua Subterránea y antiguas Unidades Hidrogeológicas de la Isla de Menorca.	28
Figura 6. Relación del acuífero Mioceno y las Masas de Agua Subterránea y antiguas Unidades Hidrogeológicas de la Isla de Menorca.	29
Figura 7. Cotas del nivel del agua y piezometría interpretada.	35
Figura 8. Piezometría de las Masas de Agua Subterránea de la Isla de Menorca.	35
Figura 9. Direcciones de flujo y gradientes.	36
Figura 10. Corte conceptual Oeste-Este del acuífero mioceno.	37
Figura 11. Piezometría y gradientes, Masa de Agua Subterránea <i>Ciutadella</i>	38
Figura 12. Piezometría y gradientes, Masa de Agua Subterránea <i>Es Migjorn Gran</i>	38
Figura 13. Piezometría y gradientes, Masa de Agua Subterránea <i>Maó</i>	39
Figura 14. Piezometría y gradientes, Masa de Agua Subterránea <i>Sa Roca</i>	40
Figura 15. Piezometría y gradientes, Masas de Agua Subterránea <i>Tirant</i> y <i>Addaia</i>	41
Figura 16. Cotas mínimas históricas del nivel del agua, en los puntos de la red de control piezométrico.	43
Figura 17. Cotas máximas históricas del nivel del agua, en los puntos de la red de control piezométrico.	43
Figura 18. Diagrama de <i>Pipper</i> , puntos de la red de control cualitativo de Menorca.	44
Figura 19. Contenido máximo histórico en cloruros, en los puntos de la red de control de calidad.	46
Figura 20. Diagramas de <i>Stiff</i> para la isla de Menorca.	47
Figura 21. Contenido máximo histórico en nitratos, en los puntos de la red de control de calidad.	48

Figura 22. Corte conceptual Sur-Norte del acuífero mioceno. Permeabilidad en función de las facies.....	50
Figura 23. Valores de transmisividad en pozos particulares y de abastecimiento.	51
Figura 24. Pozos registrados en la DGRH, para el total de la isla de Menorca.	53
Figura 25. Extracciones medias en pozos de abastecimiento, en los puntos de la red de control cuantitativo.	54
Figura 26. Extracciones para abastecimiento por Masa de Agua Subterránea.	54
Figura 27. Superficies regadas en 2008-2009.	55
Figura 28. Esquema topográfico del zócalo de las formaciones miocenas de migjorn.	57
Figura 29. Cotas absolutas y batimetría del basamento Paleozoico-Mesozoico.....	57
Figura 30. Interpretación de la batimetría del basamento Paleozoico-Mesozoico.....	58
Figura 31. Cotas absolutas y batimetría del basamento Unidad Basal (T1-T2).....	59
Figura 32. Interpretación de la batimetría del basamento Unidad Basal (T1-T2).....	60
Figura 33. Vista 3D de las superficies de basamento y la superficie topográfica.....	61
Figura 34. Vista 3D de la superficie piezométrica y las superficies de basamento y topográfica.....	62
Figura 35. Valores y zonificación de permeabilidad en el mioceno de Ciutadella.	63
Figura 36. Salidas al mar en el mioceno de <i>Ciutadella</i>	69
Figura 37. Situación de los Perfiles Geológicos.	72
Figura 38. Corte conceptual Sur-Norte del Mioceno y Basamento Jurásico de Ciutadella.	73
Figura 39. Vista 3D del <i>Fence Diagram</i> del mioceno de Ciutadella sobre los basamentos posibles del acuífero mioceno.	75
Figura 40. Vista 3D del <i>Fence Diagram</i> del mioceno de Ciutadella con piezometría, superficie topográfica y los posibles basamentos para el acuífero mioceno.....	76
Figura 41. Cotas y Batimetría para la superficie Mesozoica y de la Unidad Basal Distal T2, en el mioceno de ciutadella.	77
Figura 42. Vista 3D del <i>Fence Diagram</i> del mioceno de Ciutadella con piezometría, superficie topográfica y basamento Mesozoico-Unidad Basal Distal T2.	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos disponibles y datos introducidos en HYDOR.....	21
Tabla 2. Relación entre Masas de Agua Subterránea y Unidades Hidrogeológicas de la isla de Menorca.....	27
Tabla 3. Identificación y relación entre formaciones geológicas existentes, acuíferos, masas de agua, <i>Units</i> , <i>Subunits</i> y modelo geológico en 3d.	31
Tabla 4. Valores bibliográficos de parámetros hidráulicos del acuífero mioceno.	49
Tabla 5. Valores de transmisividad disponibles para las Masas de Agua Subterránea de Menorca y Subunidades del Mioceno.	51
Tabla 6. Balance Hídrico de las Masas de Agua Subterránea de Menorca.....	52
Tabla 7. Valores de transmisividad (T) y conductividad hidráulica (K) estimados para las Subunidades del Mioceno de Ciutadella.	64
Tabla 8. Estimaciones de valores de % de Infiltración en Ciutadella.	66
Tabla 9. Características del suelo de <i>Migjorn</i> de Menorca.	66
Tabla 10. Valores de recarga anual según cálculo con EASY BAL.	66
Tabla 11. Estimación de volumen anual infiltrado con EASY BAL.	67
Tabla 12. Valores de infiltración estimados a partir de la litología en superficie.....	67
Tabla 13. Valores estimados de caudal de salida al mar	69
Tabla 14. Valores estimados de almacenamiento	70
Tabla 15. Balance hídrico del Mioceno de Ciutadella para el año 2014.....	71
Tabla 16. Relación entre Subunidades y modelo Geológico en 3D para el mioceno regional y el mioceno de Ciutadella.	74

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA	87
ANEXO 2. MAPAS DE SITUACIÓN DE SONDEOS (BOREHOLE) Y PUNTOS DE CONTROL (DB_POINTS).....	92
ANEXO 3. RESULTADOS HYYH	102
ANEXO 4. RESULTADOS QUIMET	114
ANEXO 5. RESULTADOS HEROS.....	135
ANEXO 6. BALANCE HÍDRICO DE LA MASA DE AGUA CIUTADELLA	153

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

En las *Illes Balears* el recurso hídrico más aprovechado es el agua subterránea. Históricamente las demandas de agua se han solucionado mediante el aprovechamiento de fuentes canalizadas, la captación en algunos acuíferos mediante pequeños *qanats* y/o minas, más adelante por extracción de agua en pozos de gran diámetro (molinos y *sínias*), y finalmente, por la extracción mediante sondeos de perforación.

El agua subterránea representa el mayor recurso hídrico usado y disponible (el 97% del natural, y el 75% del total), aunque en la actualidad y en las últimas décadas no ha sido suficiente, siendo necesaria la utilización conjunta para satisfacer los abastecimientos urbanos con agua superficial procedente de dos embalses, en la isla de *Mallorca*, y con agua desalada en las islas de *Eivissa*, *Formentera* y *Mallorca*. Para satisfacer los regadíos se ha implantado la reutilización de agua depurada en algunos lugares concretos como el *Pla de Palma* en *Mallorca*.

En la isla de *Menorca*, aun existiendo a día de hoy una desalinizadora construida, el único recurso hídrico explotado es el agua subterránea. El hecho de no utilizar la desaladora se debe a su desconexión física con la red de distribución de agua. Existen proyectos de reutilización de aguas regeneradas para riego todavía no llevados a cabo debido a la alta salinidad del efluente (dada la intrusión salina existente en los acuíferos).

Los primeros estudios hidrogeológicos realizados en las islas fueron los promovidos en los años 70 por el *Servicio Geológico del Ministerio de Obras Públicas (FAYAS&BAYÓ, 1973)*.

En esa época se empezó a investigar en todas las islas mediante la realización de sondeos geológicos con testificación (en la actualidad se dispone de hasta 500 registros de sondeos o piezómetros, aunque al menos 100 de ellos se encuentran hoy en día inhabilitados o destruidos) y mediante el inventariado de captaciones de agua para su posterior medición y análisis.

Así nació la red de control de aguas subterráneas, que hasta la actualidad fue creciendo y adaptándose a las necesidades de explotación de cada acuífero y últimamente a las exigencias de la Directiva Marco del Agua (DMA, 2000).

Las frecuencias de medición y muestreo se han mantenido constantes a lo largo de la historia, hasta la actualidad, que se encuentra en estado de reorganización y optimización por falta de medios. Existe una grandísima cantidad de datos generados y no se dispone de una herramienta de gestión hidrogeológica para su interpretación y valoración.

En las *Illes Balears* todavía actualmente se acude únicamente a los *zahorís* para la situación de captaciones de agua subterránea. Es destacable la gran cantidad de pozos que existen en las islas, en el registro de captaciones de aguas subterráneas del *Govern Balear* se encuentran hasta 60.000 registros, hecho que pone en evidencia su amplio uso. En la *Figura 1* se muestra una imagen de los pozos registrados y georeferenciados en las islas:

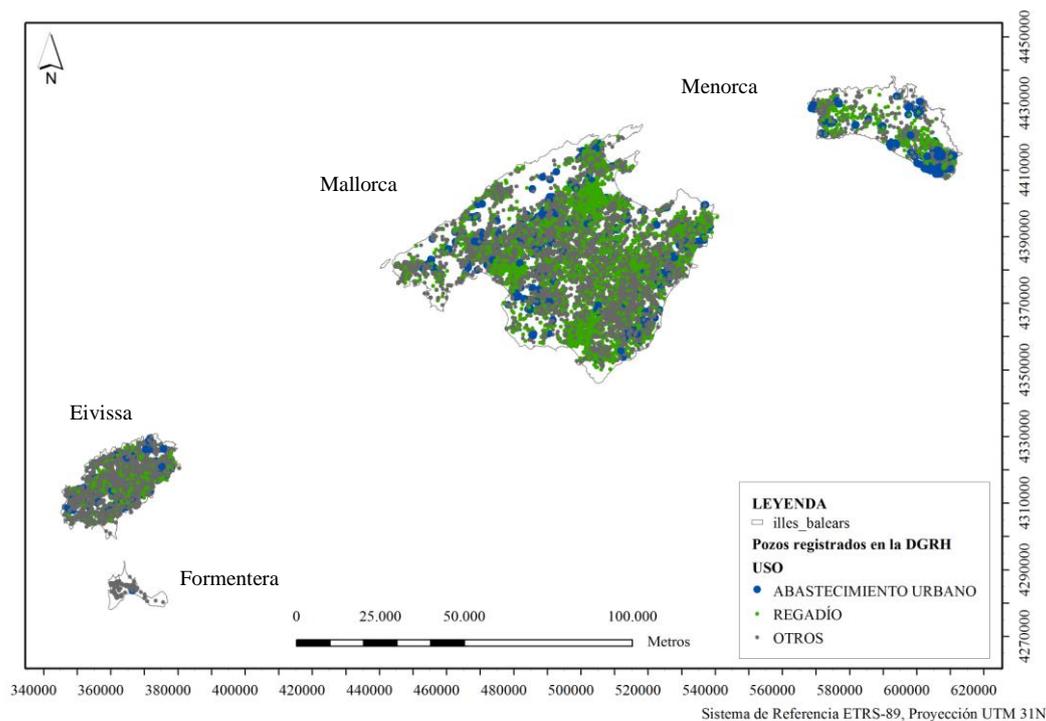


Figura 1. Visualización de los pozos registrados en Illes Balears.
 Registro de Aguas Subterráneas, *Direcció General de Recursos Hídrics, Govern Balear (CAS).*

Es deber de los profesionales el promover la comunicación y trasmisión de información a la población en general y a los dirigentes políticos, con la finalidad de dar a conocer las aguas subterráneas y garantizar así la concienciación para su protección.

Todas estas cuestiones plantean la necesidad de disponer de una herramienta de gestión que facilite: la visualización de datos y su difusión pública, su interpretación y la gestión del recurso.

En este trabajo se plantea a nivel regional, la aplicación de la base de datos hidrogeológica HYDOR (Velasco, 2013) y de las herramientas para ArcGis10: HEROS10 (Velasco et al., 2012), HYYH (Velasco et al., 2013), QUIMET (Velasco et al., 2014) y HEROS-3D (ALCARAZ et al., 2015), desarrolladas por el grupo de Hidrología Subterránea del IDAEA (CSIC)-UPC, para la gestión de un Sistema de Explotación (una isla, *Menorca*), y a nivel local, se plantea su aplicación directa en una Masa de Agua Subterránea (*Ciutadella*) con el objetivo de realizar un Plan de Gestión de la misma.

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. TRABAJOS REALIZADOS

Ha quedado demostrado que el uso de bases de datos hidrogeológicas implementadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) suponen una potente herramienta de gestión,

visualización e interpretación de datos hidrológicos, suponiendo en definitiva un correcto y adecuado Marco de Gestión de Recursos Hídricos para las administraciones competentes en materia de recursos hídricos. Ejemplo de ello es el estudio de GOGU et al., 2001, en la zona de *Walloon (Belgica)* o CHESNAUX et al., 2011, en la región de *Saguenay-Lac-St.-Jean (Canada)*.

Actualmente en el ámbito de la administración de recursos hídricos tanto nacionales como internacionales, se han aplicado con éxito herramientas de explotación y gestión que nos permiten visualizar y analizar los datos de una manera conjunta haciendo uso de los SIG, tal es el caso de la *Agencia Catalana de l'Aigua (ACA)* en *Catalunya* como la *Junta de Andalucía (JA)*.

1.2.2. INFORMACIÓN DISPONIBLE

La información disponible se ha diferenciado en Datos, Cartografía y Estudios Hidrogeológicos. A continuación se detalla la información disponible para la elaboración del presente trabajo.

1.2.2.1. DATOS

Los datos geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos que se han introducido en la base de datos HYDOR proceden principalmente de la red de control de Aguas Subterráneas del *Servei d'Estudis i Planificació (SEP)* de la *Direcció General de Recursos Hídrics* del Govern Balear, que en gran parte se encuentran publicados en el *Portal de l'Aigua de la Caib (XCAS-PAIB, DCA-PAIB, MAS-PAIB)*, y del Instituto Geológico y Minero de España (Palma), IGME, que se encuentran publicados en su página web (BDAGuas).

La información recopilada se encontraba en diferentes formatos (*Excel, Access* y en papel).

En cuanto a los puntos de control de piezometría, calidad y extracciones, se ha utilizado el inventario de puntos de agua y red de control de aguas subterráneas del SEP, que consiste en una tabla *Access* con gran cantidad de campos que crecen en función de necesidades específicas. Contiene básicamente información sobre la situación de los puntos (coordenadas UTM ETRS89), tipo (piezómetro, pozo), uso (abastecimiento, regadío), cota (con indicación de cómo se ha obtenido si mediante modelo digital del terreno o mediante nivelación topográfica), referencias de contacto, acceso, estado del punto, toponímicas y de codificaciones de otras administraciones como las del inventario de puntos de agua del *Instituto Geológico y Minero de España IGME (BDAGuas, 2015)*, el registro de pozos de abastecimiento urbano del *Servei de Salut Ambiental* de la *Direcció General de Salut Pública i Consum del Govern Balear* o la del censo de aguas subterráneas de la *Direcció General de Recursos Hídrics del Govern Balear (CAS, 2015)*.

Para la isla de Menorca se han contabilizado 513 registros correspondientes a puntos de agua, de los cuales, 138 son piezómetros, 251 pozos de abastecimiento y 124 pozos particulares de usos regadío y/o doméstico. Actualmente los puntos de la red de control activos son 96 de calidad (pozos de abastecimiento y particulares), 239 de piezometría (piezómetros y algunos pozos de abastecimiento) y 141 de extracciones (pozos de abastecimiento). La Figura 2

muestra la red de control del *Govern Balear*, de dónde procede la mayoría de la información utilizada.

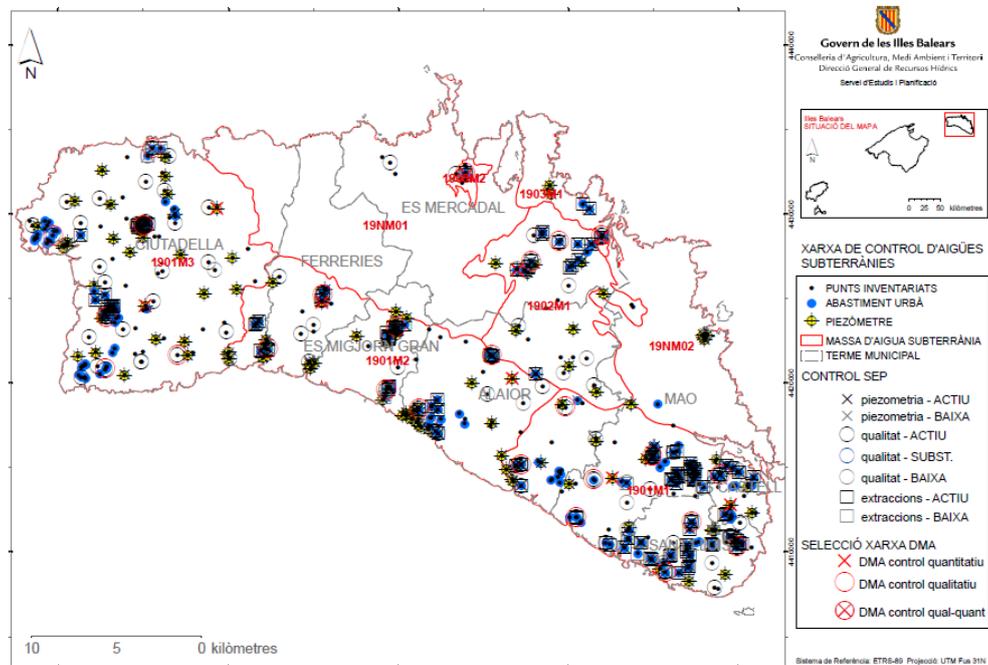


Figura 2. Red de control de aguas subterráneas del *Govern Balear*. Isla de Menorca. (XAS-PAIB)

De estos controles y de los históricos en total se dispone de la siguiente información:

Niveles mensuales históricos de la mayoría de los piezómetros. Disponible en una tabla formato *Access*, actualizado a diciembre de 2014.

Analíticas anuales de pH, conductividad y componentes mayoritarios del agua (NO_3 , Cl^- , CO_3 , CO_3H , Br, F, SO_4 , NO_2 , PO_4 , Na, K, Ca, Mg, NH_4) y mensuales de cloruros nitratos y de pH de todos los puntos pertenecientes al control de calidad, que son una selección de pozos de abastecimiento y particulares, correspondiendo cada registro a una muestra de agua y a un análisis concreto. Desde la aplicación de la Directiva Europea Marco del Agua (DMA, 2000), en una selección de puntos de control de calidad, se dispone de analíticas trimestrales o semestrales de ph, conductividad y componentes mayoritarios y una campaña de analíticas sexenales de sustancias prioritarias (DMA, 2000). Disponible en una tabla formato *Access*, actualizado a diciembre de 2014, y formato *Excel* respectivamente.

Extracciones mensuales de la mayoría de pozos de abastecimiento. Disponible en una tabla formato *Excel*, actualizado a diciembre de 2014.

Testificación geológica de 138 piezómetros. Disponible una parte en una publicación en formato papel (SGOP, 1991), con descripción geológica y interpretación de formaciones geológicas, y el resto disponible en formato papel (BARÓN, 2006), con descripciones geológicas.

Ensayos de bombeo realizados en 30 pozos de abastecimiento y uso doméstico en formato papel de la DGRH, con interpretación de parámetros hidráulicos en algunas ocasiones, y 98 resultados de interpretación de parámetros hidráulicos (transmisividad) de Ensayos de Bombeo realizados por el IGME (BDAguas).

Los datos utilizados finalmente e introducidos en la base de datos HYDOR, se detallan en una tabla, junto a los disponibles, *Tabla 1* en el apartado de metodología *1.4.1. INTRODUCCIÓN DE DATOS EN HYDOR*.

1.2.2.2. CARTOGRAFÍA

La cartografía utilizada como base en este trabajo procede principalmente del *Servei d'Estudis i Planificació (SEP)* de la *Direcció General de Recursos Hídrics (DGRH)* y de SITIBSA, del *Govern Balear*. La mayoría de la cartografía puede consultarse en el visualizador de mapas de SITIBSA (IDEIB).

Se ha utilizado la siguiente cartografía:

- ⇒ Geología
- ⇒ Inventario de puntos de agua y de control de aguas subterráneas
- ⇒ Pozos de abastecimiento
- ⇒ Red fluvial
- ⇒ Masas de Agua Subterránea
- ⇒ Zonas regadas 2008-2009
- ⇒ Curvas de nivel topográfico
- ⇒ Fotografía aérea
- ⇒ Mapa digital de elevación del terreno

1.2.2.3. ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS

Los primeros estudios hidrogeológicos de Menorca se remontan a los del Servicio Geológico de Obras Públicas y del Servicio Hidráulico de Baleares en los años 70, cuando se iniciaron numerosos sondeos de reconocimiento y seguimiento de múltiples perforaciones particulares para captación de agua. En los años próximos se publicaron algunos estudios y descripciones de sondeos y se establecieron modelos hidrogeológicos (FAYAS, 1972; FAYAS&BAYÓ, 1972; FAYAS&BAYÓ, 1978; BARÓN et.al., 1979; BARÓN et.al.,1983; BARÓN, 1989; SGOP, 1991). Para la elaboración del Plan Hidrológico de les Illes Balears (PHIB, 2002) se hizo una síntesis de dichos trabajos.

En el presente trabajo se han tenido en cuenta los trabajos mencionados anteriormente por su enfoque hidrogeológico, aunque existen otros estudios de carácter estratigráfico y sedimentológico. OBRADOR&POMAR, 2004, hacen una síntesis de publicaciones hasta ese momento.

Por ello se ha partido del trabajo existente de síntesis de modelo sedimentológico (*Universitat de les Illes Balears*) y modelo hidrogeológico (*Servicio Geológico de Obras Públicas*)

(BARÓN&GONZÁLEZ, 1991), y se ha adaptado a las posibilidades de interpretación de las descripciones de sondeos disponibles (SGOP, 1991 y BARÓN, 2006).

Tal como se detalla en el apartado 2.1.3. *CONSIDERACIONES SOBRE EL MODELO GEOLÓGICO EN 3D, REGIONAL Y LOCAL*, el presente trabajo se ha enfocado al Acuífero Mioceno de Menorca para la realización del modelo geológico 3D. En dicho apartado se explican las modificaciones o adaptaciones realizadas.

A modo de introducción y resumen, se diferencian para el Mioceno tres formaciones: La Unidad Basal (Proximal y Distal), La Unidad de Barras y el Complejo Arrecifal. El modelo sedimentológico distingue en el Complejo Arrecifal tres subunidades (Arrecife, Talud y Plataforma) que en el presente trabajo se interpretan como una única subunidad (M2). El modelo hidrogeológico distingue en la Unidad de Barras una zona karstificada (M11) y la otra no (M12). En el presente trabajo se ha definido en los sondeos la Subunidad M11 pero para su interpretación en perfiles se ha descartado y se ha representado como Unidad de Barras (M12). Finalmente, la Unidad Basal, está conformada por dos Subunidades (Proximal T1 y Distal T2), que en ambos modelos y para el presente trabajo se han representado, tanto en sondeos como en perfiles.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal del presente estudio es desarrollar un marco de gestión de los recursos hídricos para la isla de Menorca.

El marco de gestión debe permitir al técnico profesional la valoración de datos hidroquímicos e hidrogeológicos de una manera práctica y la consecuente resolución de problemas derivados del uso del agua subterránea. En especial para el caso de Menorca debería permitir una rápida visualización del estado y evolución de la intrusión marina; del descenso de niveles piezométricos y sobretodo la evolución de los conos de bombeo cerca de la costa; del estado y evolución de las concentraciones de nitratos y en especial en los perímetros de protección de pozos de abastecimiento. En general debe permitir obtener un modelo conceptual a escala regional de la zona de estudio.

Se pretende disponer de una Geodatabase actualizada para obtener la fácil visualización espacio temporal de datos mediante un sistema de información geográfica: mapas de inventario de puntos de agua, de piezometría, de parámetros químicos, parámetros hidráulicos, así como gráficos de evolución de niveles, de parámetros químicos, extracciones y sus tendencias, o diagramas de composición química y de calidad. También para estandarizar, armonizar y gestionar toda la información disponible.

1.3.2. OBJETIVO SECUNDARIO

Como objetivo secundario se plantea la aplicación directa de las herramientas de gestión geológica (HEROS10 y HEROS 3D), hidrogeológica (HYYH) y hidroquímica (QUIMET), para la realización de un Plan de Gestión de la Masa de Agua Subterránea Ciudadella.

Ello implica que la aplicación directa de las herramientas deberá ser de apoyo para el diseño del Modelo Conceptual de la Masa y deberá permitir la preparación de los datos necesarios para la realización de un modelo numérico de flujo y/o transporte.

El Plan de Gestión deberá incluir un análisis del uso del agua y su estado, así como medidas de buena gestión y prevención del deterioro de las aguas subterráneas.

Una de las herramientas para garantizar una buena gestión es la realización de un modelo numérico de flujo y/o transporte. Las herramientas que se pretenden utilizar en este estudio permitirán la adecuada organización y preparación de los datos hidrogeológicos para una futura modelación. Se deberá disponer de un balance de entradas y salidas, de valores de parámetros hidráulicos representativos del acuífero y de un modelo geológico en 3D.

En resumen, con las herramientas se define el modelo conceptual, que es el primer paso para la realización de un modelo numérico.

1.4. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para conseguir los objetivos planteados en el presente estudio se describe a continuación en dos apartados principales: INTRODUCCIÓN (apartado 1.4.1) y GESTIÓN DE DATOS (apartado 1.4.2.).

Toda la información disponible se ha introducido en la base de datos HYDOR, una base de datos hidrogeológica desarrollada por el grupo de Hidrología Subterránea del IDAEA (CSIC)-UPC para almacenar y gestionar los datos hidrogeológicos.

Para la correcta visualización e interpretación de estos datos, y para la creación de un modelo conceptual se ha contado con las herramientas para ArcGis10: HEROS10 y HEROS3D, desarrolladas para la gestión de datos geológicos, QUIMET, desarrollada para la gestión de datos hidroquímicos y HYYH desarrollada para la gestión de datos hidrogeológicos.

Para la representación de datos en ArcMap y ArcScene se han utilizado también las herramientas de dichos programas que permiten el tratamiento espacial de datos propios de representación, edición, geoprocésamiento, georeferenciación, cálculo, etc.

1.4.1. INTRODUCCIÓN DE DATOS EN HYDOR

Para la introducción de datos en la base de datos HYDOR se ha hecho en primer lugar una revisión y en segundo lugar una selección de los datos disponibles (enumerados en el apartado de información disponible: *1.2.2.1. DATOS*).

Se han elegido los datos a introducir y se han adaptado a los formatos requeridos por la estructura de la base de datos HYDOR. Éstos son:

- ⇒ Referencias de información disponible.
- ⇒ Referencias de las campañas de muestreo y analíticas de agua, y ensayos de bombeo.
- ⇒ Introducción de datos químicos e hidrogeológicos (niveles de entre los años 1984 y 2014, extracciones de entre los años 2004 y 2014, parámetros químicos de analíticas entre los años 1997 y 2014, y parámetros hidráulicos (T) en 96 puntos.
- ⇒ Inventario de 512 puntos de agua del sistema de explotación, *DB_Points* (puntos de control de calidad, piezometría, extracciones, ensayos de bombeo). De los 512 puntos, 96 pertenecen a la red de control del IGME (DBAguas) y solo se dispone de datos de ensayo de bombeo, en el resto de puntos, 416, que pertenecen a la red de control de la DGRH (XAS-PAIB), o bien se dispone de valores de extracción, piezometría y/o calidad, o todos ellos.
- ⇒ Inventario de 107 puntos para la definición de la geología, *Borehole* (piezómetros con testificación geológica). De los 107 puntos, 14 son perimetrales al área del modelo, inventados para poder cuadrar la longitud de los perfiles geológicos más allá del límite de costa o de masa (requerimiento de la herramienta HEROS). El resto, 93, corresponden a piezómetros con testificación geológica.
- ⇒ Identificación y codificación de formaciones geológicas y de acuíferos (*Units* y *Subunits*).

La tabla siguiente muestra una relación de los datos disponibles y los datos introducidos en las tablas de la Geodatabase HYDOR:

Total puntos	Inventario SEP		Inventario IGME		Presente Trabajo				
	número	formato	número	formato	Tabla HYDOR	número			
	513	<i>Acces</i>	96	<i>Excel</i>	<i>Point</i>	512 (416 SEP+ 96 IGME)			
					<i>Borehole</i>	107 (14 perimetrales, 93 sondeos)			
	Inventario SEP		Inventario IGME		Rango de Tiempo	Formato	Presente Trabajo		
<i>Con información de:</i>	puntos	registros	puntos	registros			Tabla HYDOR	puntos	registros
Piezometría	145	27774	-		1984-2014	<i>Acces</i>	<i>PiezoMeasurements</i>	145	27774
Calidad (componentes mayoritarios)	108	4508			1997-2014	<i>Acces</i>	<i>Samples</i>	108	4496
							<i>ChemMeasurements</i>		27422
Calidad (sustancias prioritarias)	21	21			2013	<i>Excel</i>	-	-	-
Extracciones (anuales)	172	1557			2004-2014	<i>Excel</i>	<i>WellAbstraction</i>	172	1557
Geología	138	138	-	<i>Papel, Word</i>	<i>Lito, Subunits, Units</i>	93	93		
Ensayos de Bombeo	-		96	96	-	<i>Excel</i>	<i>PumpingTestInterpretations</i>	96	96

Tabla 1. Datos disponibles y datos introducidos en HYDOR.

1.4.2. GESTIÓN DE DATOS CON LAS HERRAMIENTAS HEROS, QUIMET Y HYYH.

Para la gestión de los datos introducidos en la Geodatabase HYDOR se ha hecho uso de las herramientas HEROS10 y HEROS3D, QUIMET y HYYH, nombradas anteriormente, para su representación espacio temporal, así como de las herramientas de Geoprocesamiento de ArcGis10.

Se ha representado gráficamente toda la información básica para una caracterización hidrogeológica de la isla, y en especial, toda la información necesaria para la definición de un modelo conceptual de la Masa de Agua Ciutadella. Estas representaciones son principalmente:

- ⇒ Diagramas, gráficos de evolución y mapas de interés hidrogeoquímico con la herramienta QUIMET: diagramas de *Stiff*, de *Shoeller-Berkaloff*, gráficos de evolución temporal de cloruros y nitratos, mapas de diagramas de *Pipper* y de valores máximos de cloruros y nitratos. Se han elegido, evolución temporal para todo el período de datos (1984 a 2014) y representación puntual de mapas para los datos de octubre de 2014, coincidente con campaña de muestreo completa.
- ⇒ Gráficos de evolución y mapas de interés hidrogeológico con la herramienta HYYH: Gráficos de evolución de la cota piezométrica por Masa de Agua Subterránea, mapas de cotas de agua y piezometría para octubre de 2014, mapas de valores máximos y mínimos históricos para el período 1984 - 2014, mapas de parámetros hidráulicos (transmisividades).
- ⇒ Esquemas de sondeos y perfiles geológicos en 2 y 3 dimensiones, con las herramientas HEROS10 y HEROS3D respectivamente. Superficies batimétricas de basamento y superficie del terreno con las herramientas de Geoprocesamiento en ArcGIS.

Para ello se dispone de los apuntes de clase de la asignatura *Gestión de bases de datos y herramientas SIG en Hidrogeología* de la 3ª Edición del Máster de Hidrología Subterránea, y de las guías metodológicas elaboradas por el grupo de Hidrología Subterránea del IDAEA (CSIC)-UPC para la integración de datos en la Geodatabase (HYDOR) y para cada una de las herramientas de gestión (HEROS10 y HEROS3D, QUIMET (GHS,2014) y HYYH).

Los resultados de dichos análisis de datos se explican con detalle en los apartados referentes a modelo conceptual, tanto regional como local (éstos son: 2.2. *MODELO CONCEPTUAL REGIONAL* y 3. *MODELO CONCEPTUAL LOCAL. MIOCENO DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA CIUTADELLA*).

1.5. SITUACIÓN GEOGRÁFICA DE MENORCA

La isla de Menorca forma parte del Archipiélago Balear, Comunidad Autónoma *Illes Balears*, de España. Las *Illes Balears* se encuentran en el Mar Mediterráneo y conforman el extremo más oriental del Sistema Bético, el llamado Promontorio Balear.

Menorca, con una extensión de unos 716 km², es la segunda isla mayor del Archipiélago, siendo la mayor Mallorca. En cuanto a su posición se sitúa en el extremo Noreste y tiene una forma alargada rectangular con orientación Noroeste-Sureste, de dimensiones 48x20km aproximadamente. La altura máxima de la isla corresponde al Monte Toro, de 358 msnm.

En la figura siguiente se muestra su situación en el contexto europeo y mediterráneo:

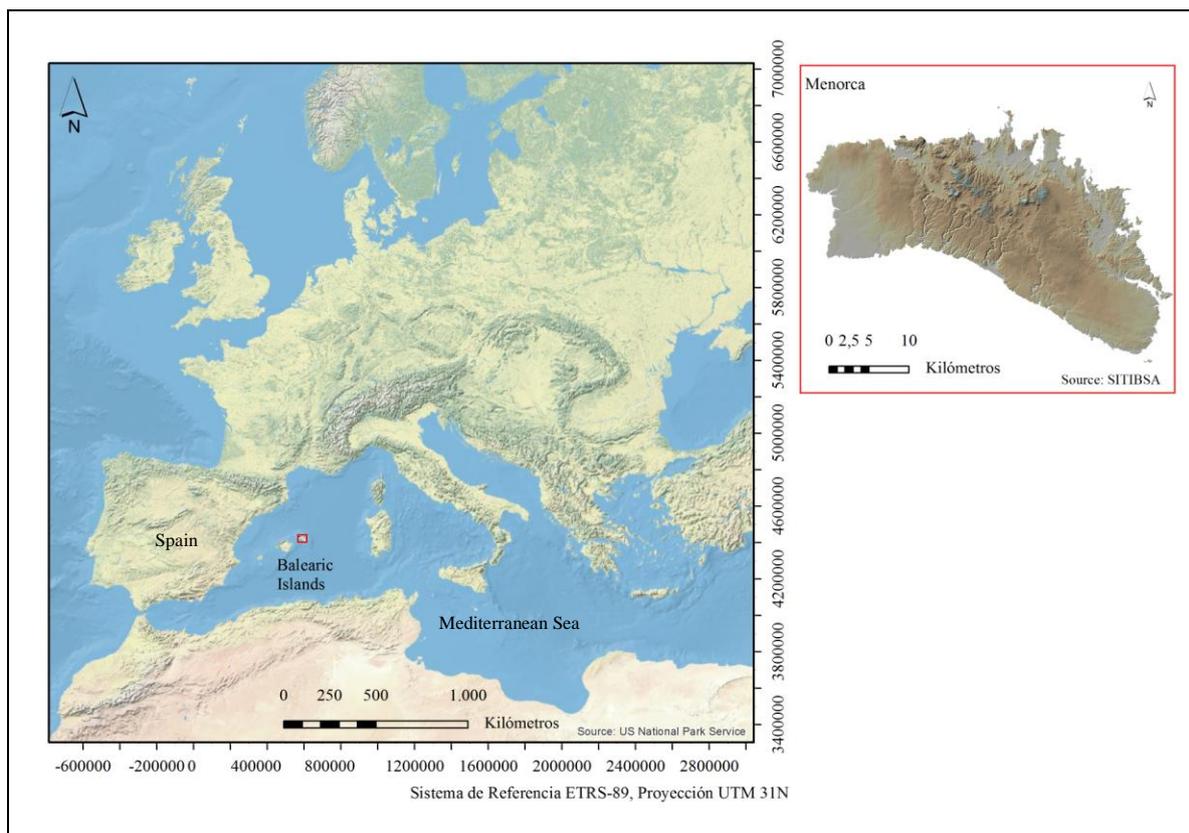


Figura 3. Situación geográfica de la Isla de Menorca.

http://services.arcgisonline.com/ArcGIS/services/World_Physical_Map/MapServer?wsdl

Servei d'Informació Territorial de les Illes Balears, SITIBSA.

Presenta un clima mediterráneo, templado, estacional en cuanto a las precipitaciones y más moderado en cuanto a las temperaturas, con inviernos suaves, y veranos calurosos y secos, con esporádicos diluvios. La temperatura media anual es de 17°C, observándose una gradación E-W (entre 18°C de Ciutadella a 16.5°C *Maó*). La pluviometría media anual es de entre 550mm/a al Sur hasta 700mm/a al Norte (PONS&GÓMEZ, 2003).

Los cursos de agua son de régimen torrencial, secos en la mayor parte del año, habiendo excavado profundos barrancos principalmente en la región central de *Migjorn*; muy destacables en un modelo digital del terreno (ver *Figura 1*). Los principales son los de *Algendar*, *Trebalúger*, *Son Buté* y *Cala En Porter*.

2. MODELO CONCEPTUAL REGIONAL. ISLA DE MENORCA

Se pretende verificar y mejorar, el modelo conceptual de funcionamiento hidráulico a nivel regional para la isla de Menorca, y a nivel local y más detallado, para la Masa de Agua Subterránea de Ciutadella, mediante la interpretación de la representación de datos geológicos, hidroquímicos, hidrogeológicos, meteorológicos, etc.. obtenida con la gestión de datos.

Para ello se describen de manera general los resultados obtenidos para toda la isla en el presente apartado, y algunos aspectos más detallados para el caso de *Ciutadella*, en el apartado siguiente (3).

A continuación se resume y describe la hidrogeología de la isla de Menorca de acuerdo al *Pla Hidrològic de les Illes Balears* (EPTISA, 1999); el modelo geológico-hidrogeológico propuesto para este trabajo y para el acuífero mioceno, basado en el trabajo del extinto *Servicio Geológico de Obras Públicas, SGOP* (BARÓN&BAYÓ, 1979) y (BARÓN&BAYÓ, 1983) (apartado 2.1.) y el modelo conceptual regional del funcionamiento hidráulico de los principales acuíferos de la isla, de acuerdo a al PHIB y la interpretación de los resultados obtenidos de la representación de datos en el presente trabajo (apartado 2.2.).

2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

2.1.1. CONTEXTO GEOLÓGICO

En Menorca existen dos zonas claramente diferenciadas, por su morfología, condicionada a su vez por la geología.

Menorca está dividida morfoestructuralmente en dos grandes unidades por su eje longitudinal: la mitad norte de la isla o zona de *Tramuntana*, de 267 km² de extensión, y la mitad sur o zona de *Migjorn*, con una superficie de 435 km²; aproximadamente marcando una línea desde el puerto de *Maó* hasta *Cala Algaiarens*, en el NO de la isla.

La isla de Menorca, la más oriental del archipiélago balear, constituye también el extremo más oriental del denominado Promontorio Balear, que finaliza en la plataforma periinsular de Menorca.

Dicha posición, y su pequeña extensión condicionan el carácter fragmentario de las series.

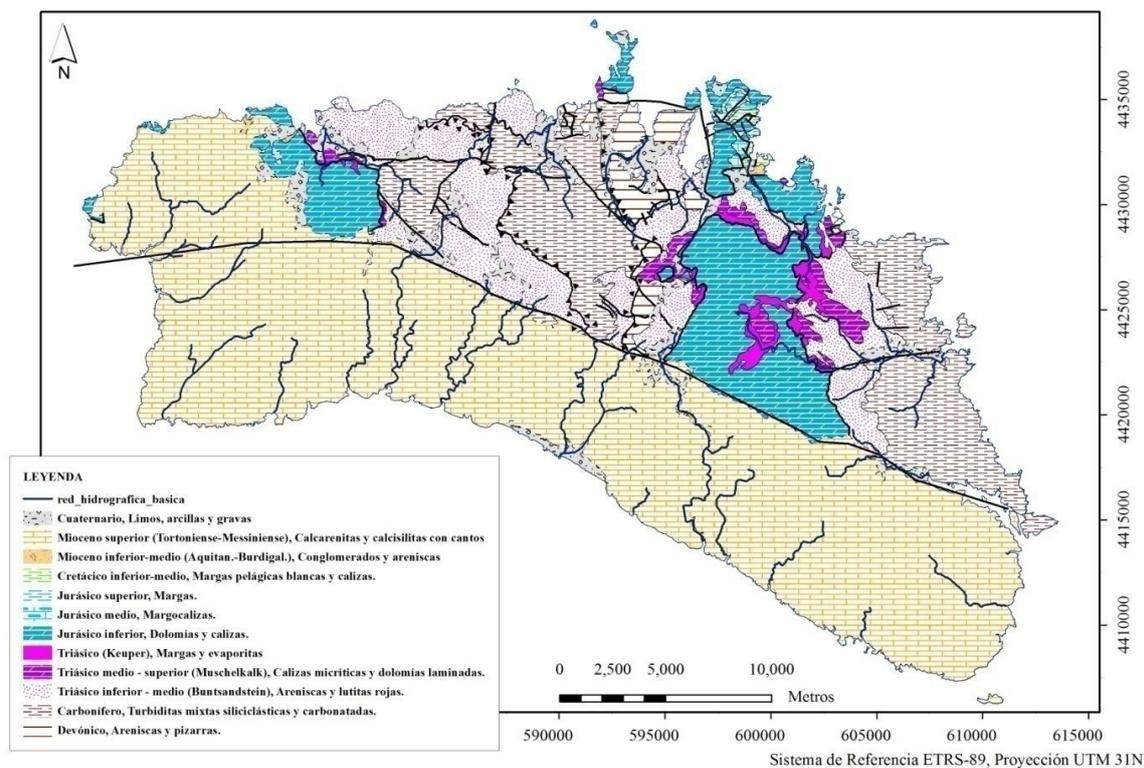


Figura 4. Mapa Geológico y red hidrogáfica básica de la Isla de Menorca.
Cartografía hidrogeológica, EPTISA (1999).

La zona de *Tramuntana* ocupa la mitad norte de la isla, en ella afloran los materiales más antiguos y tectonizados y es en la que se encuentran los únicos relieves de la isla (*Monte Toro*, 358m). Está formada por un basamento paleozoico (Hercínico) y una cobertera mesozoico-cenozoica (alpina). El Paleozoico aflora ampliamente en la isla de Menorca y, exceptuando un afloramiento muy local en la región de *Tramuntana* de Mallorca, no aflora en el resto de las islas Baleares.

La zona de *Migjorn*, constituida por una plataforma de relieve tabular, con pendiente suave hacia el mar, ocupa la mitad sur de la isla y está compuesta por materiales más recientes (Mioceno) que los de la región de *Tramuntana*, no afectados por la tectónica.

El **Paleozoico** está conformado prácticamente en su totalidad por sedimentos terrígenos profundos (turbiditas), y por calizas, pizarras, conglomerados, areniscas, radiolaritas y rocas volcánicas. La serie abarca desde el Devónico inferior (quizá desde el Silúrico superior) hasta el Carbonífero inferior, existiendo una laguna estratigráfica en el Devónico medio. El Devónico superior y el Carbonífero basal se hallan en forma resedimentada (olistostrómica).

Sobre el Paleozoico plegado y en franca discordancia angular, descansa una serie terrígena roja, conformada por areniscas y pelitas, que abarca el **Pérmico superior y el Triásico inferior** (facies *Buntsandstein*) separados por contacto discordante. El **Triásico medio** es carbonatado (facies *Muschelkalk*) y el Triásico superior lo conforman arcillas con yesos de facies *Keuper*.

Por encima del Triásico se halla el **Jurásico** dolomítico, el cual aflora extensamente en la zona norte de la isla. El **Cretácico**, formado por calizas y margas, aflora muy localmente, también en la región de *Tramuntana*. Existe una laguna estratigráfica que abarca desde la base del Cretácico superior a la base del Mioceno.

Los materiales del **Mioceno superior** alcanzan un gran desarrollo en la **zona de Migjorn**, disponiéndose en forma de "*onlap*" sobre los materiales mesozoicos y paleozoicos de la región de *Tramuntana*. Localmente, están constituidos por conglomerados asociados a pequeñas fosas de distensión; más extensamente afloran los materiales del Mioceno superior, constituyendo una plataforma carbonatada (Plataforma de *Migjorn*), tabular, desarrollada a partir del límite con la zona de *Tramuntana*; posiblemente, este límite es estructural, constituido por un escalonamiento de fallas directas, que hundan el bloque S. (PHIB,2002).

La plataforma carbonatada de *Migjorn* es postorogénica, y está afectada por un anticlinal muy abierto, N-S, provocado probablemente por una fractura extensiva miocena en esa dirección. La plataforma presenta dos sistemas de fracturas extensivas, con orientación general NW-SE y N-S. Su litología carbonatada, su fracturación y exposición a cambios sucesivos del nivel del mar ha condicionado a la existencia de un karst desarrollado a favor de dichas discontinuidades. Este hecho va a condicionar mucho las características hidrogeológicas del acuífero que conforman dichos materiales (FORNÓS, 2004).

Se hace referencia a esta plataforma carbonatada miocena como el ***Mioceno Superior***, la ***plataforma carbonatada miocena o de Migjorn***, el ***Mioceno de Migjorn o el Acuífero Mioceno***, *indistintamente*. El Acuífero de Migjorn incluiría las calizas jurásicas del Norte de Ciutadella, así que no deben confundirse los términos. En el ***Mioceno de Migjorn*** se distinguen **tres formaciones o unidades geológicas: La Unidad Basal, La Unidad de Barras y el Complejo Arrecifal:**

La Unidad Basal, está conformada por dos Subunidades (Proximal T1 y Distal T2), contempladas tanto en el modelo sedimentológico como en el modelo hidrogeológico del Mioceno de *Migjorn*, en el presente trabajo se han representado ambas, tanto en sondeos como en perfiles. La T1 está formada principalmente por conglomerados y areniscas terrígenas de colores rojizos y grises, la T2, está formada por limolitas calcáreas grises y negras. La T1 y la T2 se encuentran indentadas, dando lugar a una gradación de los materiales de la T1 a los de la T2 en la horizontal y una alternancia entre ambas en la vertical.

La Unidad de Barras está constituida por calcarenitas y calcisiltitas, con cementación y karstificación local. El modelo hidrogeológico distingue una zona karstificada (M11) y la otra no (M12). En el presente trabajo se ha definido en los sondeos la Subunidad M11 pero para su interpretación en perfiles se ha descartado y se ha representado todo únicamente como Unidad de Barras (M12).

Finalmente, el modelo sedimentológico distingue en el Complejo Arrecifal tres subunidades (Arrecife, Talud y Plataforma) que en el presente trabajo se interpretan como una única subunidad (M2). El Arrecife se corresponde con las partes bioconstruidas (biocalcarenitas y biolititas coralinas), con karstificación. En el Talud se encuentran biocalcarenitas con restos de corales y algas, y en la Plataforma se encuentran biocalcarenitas con rodolitos, briozoos y abundante heterostegina.

En el **ANEXO 1. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA**, se describen las litologías más detalladamente para cada una de las zonas.

2.1.2. MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA Y ANTIGUAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

La distribución de las antiguas unidades hidrogeológicas, actualmente subdivididas en Masas de Agua Subterránea, de acuerdo a la Directiva Marco del Agua (DMA, 2000), en la isla de Menorca se halla estrechamente relacionada con la existencia de las dos regiones claramente diferenciadas citadas anteriormente, *Tramuntana* y *Migjorn*; esta última, por su composición litológica y estructura constituía en sí una unidad, siendo el principal acuífero de la isla. En la región de *Tramuntana*, los afloramientos permeables de materiales mesozoicos constituían una unidad hidrogeológica individualizada (*Albaida*), quedando el resto de la región septentrional, con acuíferos de menor importancia, englobado en una única unidad (*Fornells*).

La división de las Unidades Hidrogeológicas (PHIB, 2002) en Masas de Agua Subterránea (PHIB, 2013) fue una oportunidad de adecuar hidrogeológicamente los límites. Así pues, la relación entre las antiguas unidades hidrogeológicas y las actuales Masas de Agua Subterránea en la isla de Menorca es la siguiente:

Unidades Hidrogeológicas (PHIB, 2002)	Masas de Agua Subterránea (PHIB, 2013)
1901 <i>Migjorn</i>	1901M1 <i>Maó</i>
	1901M2 <i>Es Migjorn Gran</i>
	1901M3 <i>Ciutadella</i>
1902 <i>Albaida</i>	1902M1 <i>Sa Roca</i>
1903 <i>Fornells</i>	1903M1 <i>Addaia</i>
	1903M2 <i>Tirant</i>
	<i>Dos zonas sin MAS definida</i>

Tabla 2. Relación entre Masas de Agua Subterránea y Unidades Hidrogeológicas de la isla de Menorca.

Cabe citar que la Unidad Hidrogeológica de *Fornells* se subdividió en dos Masas de Agua Subterránea (*Addaia* 1903M1 y *Tirant* 1903M2), que conforman los materiales mesozoicos y cuaternarios. En cuanto al resto de materiales (paleozoico y triásico) no se definieron como Masa de Agua Subterránea dada su poca permeabilidad y escaso uso como acuíferos. En el Plan Hidrológico de las *Illes Balears* aparecen clasificadas como áreas de *NO MASA*, codificadas como 19NM01 y 19NM02 (ver *Figura 5. Mapa de Masas de Agua Subterránea y antiguas Unidades Hidrogeológicas de la Isla de Menorca.*).

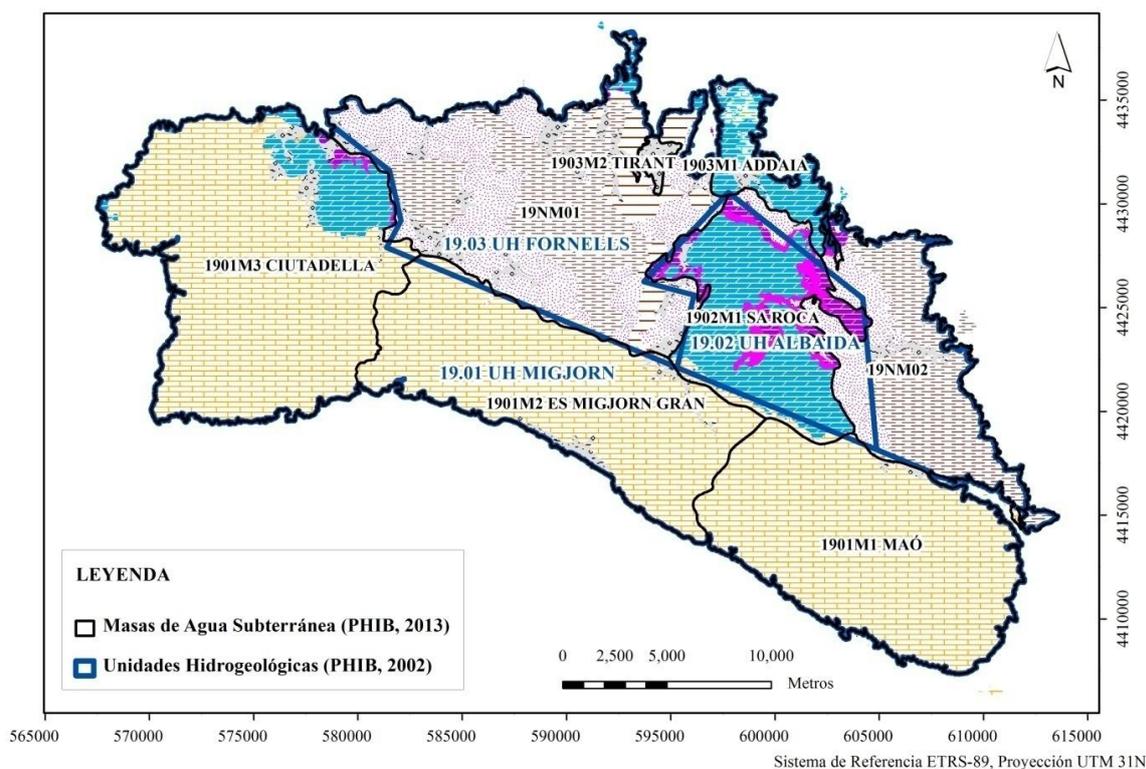


Figura 5. Mapa de Masas de Agua Subterránea y antiguas Unidades Hidrogeológicas de la Isla de Menorca.

Plan Hidrológico de les Illes Balears. PHIB, 2002 y PHIB, 2013.

2.1.3. CONSIDERACIONES SOBRE EL MODELO GEOLÓGICO EN 3D, REGIONAL Y LOCAL

De acuerdo a las extensiones, usos de cada uno de los acuíferos, datos disponibles y de acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, que se explican en el apartado siguiente referentes al modelo conceptual regional (*apartado 2.2. MODELO CONCEPTUAL REGIONAL*), se pone de manifiesto que la zona de *Migjorn*, en concreto el acuífero Mioceno y en especial la parte de *Ciutadella*, es una zona importante a considerar en todo el marco regional en cuanto a su importancia como fuente de suministro y al mal estado cualitativo y cuantitativo que presenta. Por ello se ha elegido como zona ideal para la aplicación a nivel local de las herramientas HYYH, QUIMET y HEROS, así como para proponer un Plan de Gestión con el objetivo de alcanzar un buen estado cualitativo y cuantitativo.

La zona del *Migjorn* se encuentra actualmente subdividida en tres masas de agua subterránea: *Ciutadella* 1901M3, *Es Migjorn Gran* 1901M2 y *Maó* 1901M1 (PHIB, 2013). A excepción de las calizas del Jurásico que se encuentran al norte de la Masa de Agua de *Ciutadella* (*Figura 4. Mapa Geológico y red hidrogáfica básica de la Isla de Menorca.*) toda la zona del *Migjorn* abarca un único acuífero del Mioceno, el cual, es el más extenso y más explotado de la isla, con una extensión de 366,1 km² y un perímetro de 175,6 km. En la *Figura 6. Relación del acuífero Mioceno y las Masas de Agua Subterránea y antiguas Unidades Hidrogeológicas de la Isla de*

Menorca, se puede observar la relación entre el Acuífero Mioceno, las antiguas Unidades Hidrogeológicas y las actuales Masas de Agua Subterránea.

Para la realización de un modelo geológico en 3D, se ha elegido a nivel regional el Mioceno de *Migjorn* y a nivel local el Mioceno de la Masa de Agua *Ciutadella*, por la mayor disponibilidad de datos geológicos e hidrogeológicos, por su mayor cantidad de recurso, uso y explotación, por su extensión en relación a la isla (un 50% del territorio y un 80% del territorio permeable) y por constituir un único acuífero con diferentes subunidades.

En el *apartado 2.3.* se describe el modelo geológico e hidrogeológico propuesto en este trabajo para el acuífero de migjorn y se muestran los resultados del modelo en 3D para el acuífero mioceno. En el *apartado 3.3.* se muestran los resultados del modelo 3D más detallados para la masa de Agua Subterránea *Ciutadella*.

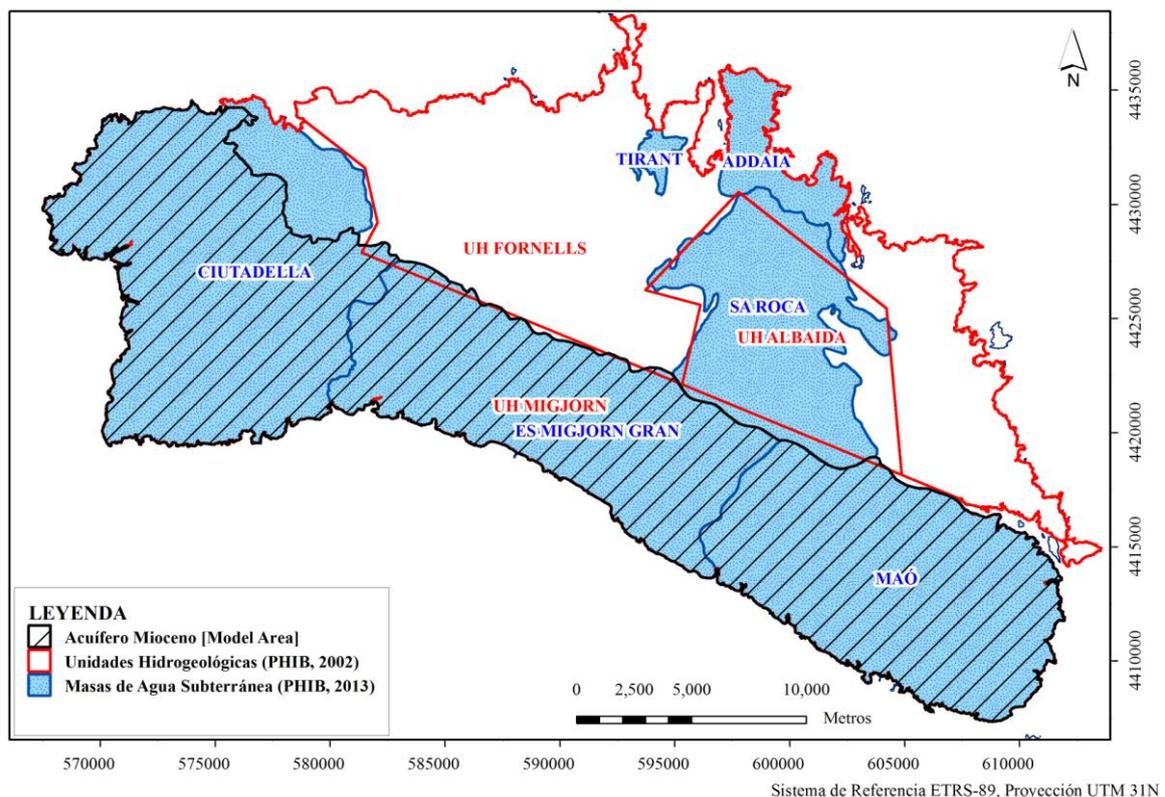


Figura 6. Relación del acuífero Mioceno y las Masas de Agua Subterránea y antiguas Unidades Hidrogeológicas de la Isla de Menorca
Plan Hidrológico de les Illes Balears. PHIB, 2002 y PHIB, 2013.

2.1.4. UNIDADES Y SUBUNIDADES CONSIDERADAS PARA EL MODELO GEOLÓGICO EN 3D

La información disponible para identificar las formaciones geológicas en los sondeos y para su introducción en la base de datos hidrogeológica HYDOR (Unidades (*Units*) y Subunidades (*Subunits*)), proviene por una parte del Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP, 1991)

donde se recogen descripciones de varios de los sondeos utilizados para este trabajo con la identificación de formaciones y por otra, y para el resto de sondeos, se han utilizado las descripciones de campo realizadas por la Dirección General de Recursos Hídricos (BARÓN, A. 2006), a las que se les ha atribuido la clasificación de subunidades en función de la litología.

Cabe decir que en los dos casos las descripciones de los sondeos reflejan el alto porcentaje de pérdida de testigo, que en algunos tramos es de más del 60%. Por ello se ha optado por definir la litología de los sondeos como litología tipo por subunidad en función de las descripciones generales atribuibles a cada una. Esto es observable en los *Borehole Diagram* generados para cada uno de los sondeos, la litología para cada Subunidad se muestra homogénea. En el *ANEXO 5. RESULTADOS HEROS* se muestra una selección de la representación de Sondeos de la Masa de Agua *Ciudadella*.

Es importante destacar también que la observación directa en testigos de los tramos correspondientes a Complejo Arrecifal (M2) no permite definir las partes de rampa, talud o arrecife (explicadas en el *ANEXO 1. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA*), en cambio, en los afloramientos en acantilados sí se pueden identificar, según el autor de las descripciones (BARÓN, A. 2006). Por ello se ha optado por identificar en las descripciones de sondeos una Subunidad única referente al Complejo Arrecifal indiferenciado (M2), siguiendo el ejemplo del SGOP (SGOP, 1991).

Por último se ha intentado diferenciar una parte carstificada de la Unidad de Barras, claramente identificable en algunos tramos de los testigos, dividiendo así la formación geológica (M1) en dos Subunidades (*Subunits* M11 y M12). El objetivo inicial de diferenciarlas era obtener dos zonas de diferentes permeabilidades, siendo mucho mayor la de la parte karstificada. Se han identificado los tramos karstificados en algunos sondeos pero a la hora de la realización de los perfiles, se ha descartado representar la parte karstificada (M11) como diferenciada de la otra (M12), debido a la dificultad de interpretación del perfil sin el apoyo de una cartografía de superficie específica y debido a su poca representatividad volumétrica. Así que en los perfiles aparecen todos los materiales de la Unidad de Barras como M12. Existen trabajos geomorfológicos que identifican dolinas y otras estructuras de karst en superficie pero no siempre son correlacionables con las identificaciones en sondeos.

Para la realización de los perfiles (*Borehole Cros Section*) se han tenido en cuenta los límites entre Subunidades observables en los sondeos, con una proyección en el perfil de hasta 1000m a cada lado. Para la interpretación definitiva se ha dado prioridad a las superficies TIN generadas para el trabajo y proyectadas en el perfil (superficie topográfica, superficie de basamento paleozoico-mesozoico y superficie subunidades T1 y T2) (explicadas en el apartado 2.3. *MODELO GEOLÓGICO-HIDROGOLÓGICO EN 3D DEL ACUFERO MIOCENO*). Así, algunos contactos entre Subunidades descritos en los sondeos no se respetan con precisión en la interpretación de los perfiles (p.ej. ver *Profile_1* en *ANEXO 5. RESULTADOS HEROS*).

En la página siguiente se muestra una tabla elaborada con la relación entre formaciones geológicas existentes, acuíferos, masas de agua subterránea, antiguas unidades hidrogeológicas y su relación con la clasificación hecha para este trabajo en cuanto a Unidades y Subunidades, y su relación en cuanto al Modelo Geológico en 3D (explicado en los apartados 2.3. y 3.3.).

Cronología				Descripción Geológica (PHIB, 2002). Formaciones existentes en la isla de Menorca.	Unidad Hidrogeológica (PHIB, 2002):						Identificaciones en el presente trabajo										
Era	Periodo	Época			Edad	Espeor	Masa de Agua Subterránea (PHIB, 2013):						HYDOR, clasificación en sondeos (Borehole)		HEROS						
		Miogen	Albaida				Fornells	Units	Subunits	codigo	Profiles y Modelo geológico 3D										
						Mao	Es Miglom Gran	Ciudadella	Sa Roca	Addaita	Tirant	zona sin M.A.S.									
Cenozoico	Terciario	Cuaternario																			
					D1 a D5. Calcarenitias eólicas y bioclásticas, y limos aluviales y coluviales.																
		Neógeno	Plioceno	Sup.		P1. Biocalcarenitias con rodofíceas y macrofauna.															
				Inferior		-															
			Mioceno	Superior	Tortonense_Mesimense		M2. Complejo Arrecifal (1,2,3):1.Nivel Bioconstruido. Biocalcarenitias con mucho cemento calcáreo y biolititas coralinas.	10 a 50								Complejo Arrecifal Indiferenciado	M2	M2			
							2.Nivel de Talud arrecifal: Biocalcarenitias con restos de corales y algas.														
							3.Nivel de Plataforma Carbonatada: Biocalcarenitias con rodolitos, briozoos y abundantes Heterostegina.														
					Tortonense		M1. Unidad Inferior de Barras. Calcarenitias y calcisilitas.	200													
							T2. Unidad Basal distal. Limolitas calcáreas gris azuladas y negruzcas.	200													
							T1. Unidad Basal proximal. Conglomerados y areniscas de colores rojizos o grises.	100													
Medio Inferior		Aquit-Burdig.		Conglomerados y areniscas.																	
Mesozoico	Secundario	Paleógeno			-																
					-																
		Cretácico	Superior																		
			Inferior			Calizas micríticas u oolíticas, con niveles intercalados poco potentes de margas.															
		Jurásico	Superior	Malm		Margas.															
			Medio	Dogger		Margas y margocalizas.															
			Inferior	Lias		Calizas y Dolomías.	450														
		Triásico	Superior			Facies Keuper-Rethiense. Margas y arcillas versicolores, con evaporitas.															
			Medio			Facies Muschelkalk. Calizas micríticas y dolomías, separadas por un nivel terrígeno intermedio.															
			Inferior			Facies Buntsandstein. Areniscas y pelitas fluviales de color rojo.															
Paleozoico	Pérmico																				
					Intercalaciones de conglomerados, areniscas y pelitas.																
					Turbiditas mixtas, siliciclásticas y carbonáticas (F.Culm).																
	Carbonífero				Turbiditas y pizarras negras con Graptolites.																
					-																
					-																
			-																		

Acuífero	permeable - no saturado
	permeable - saturado
	permeable - saturado sin conexión con el mar
	semipermeable
	impermeable

Tabla 3. Identificación y relación entre formaciones geológicas existentes, acuíferos, masas de agua, Units, Subunits y modelo geológico en 3d.

2.2. MODELO CONCEPTUAL REGIONAL

En este apartado se describe de manera general el modelo conceptual para cada una de las antiguas unidades hidrogeológicas de la isla de Menorca, haciendo referencia a ellas como zonas y con el mismo nombre: **Zona de Migjorn, zona de Albaida y zona de Fornells**, y citando de manera puntual cada masa de agua subterránea a la que se refieren los datos. Así en la zona de *Migjorn* se habla puntualmente de las Masas de Agua *Maó, Es Migjorn Gran* o *Ciutadella*, para la zona de *Albaida* se habla siempre de la única Masa de Agua *Sa Roca*, y para la zona de *Fornells*, se habla de la masas de agua *Tirant* o *Addaia* (ver *Figura 5* y *Figura 6* para visualizar la relación entre ellas).

2.2.1. LÍMITES Y GEOMETRÍA

La zona de *Migjorn* ocupa toda la mitad meridional y extremo occidental de la Isla de Menorca. Su extensión total es de 391 km², de los cuales 375 son de afloramientos permeables. Limita al S, E, y O con el mar, y al N con la región de *Tramuntana*, la cual engloba las zonas de *Albaida* y *Fornells*.

Los límites con la zona de *Fornells* son impermeables; con la zona de *Albaida* son permeables, existiendo cierta conexión entre las calcarenitas miocenas de *Migjorn* y las calizas triásicas y dolomías jurásicas de *Albaida* (según el PHIB existe conexión hidráulica). Los límites con el mar son permeables.

Se encuentra actualmente subdividida en tres masas de agua subterránea, que de oeste a este son: *Ciutadella 1901M3, Es Migjorn Gran 1901M2* y *Maó 1901M1*. Entre una y otra existe conexión hidráulica, conformando de hecho un solo acuífero.

La Masa de Agua *Ciutadella* tiene sus límites Norte, Oeste y Sur permeables, con conexión hidráulica con el mar. Su límite Este, con la Masa de Agua *Es Migjorn Gran*, viene dado por el *Barranc de Santa Anna*, el cuál delimita en el mismo acuífero mioceno dos zonas con permeabilidades diferentes (ver explicaciones en apartado 2.2.5 *PARÁMETROS HIDRÁULICOS*). Tiene una extensión de 157,47 km², de los cuales 137,70 corresponden al acuífero mioceno. En el extremo Nor-Este de la Masa de Agua afloran calizas jurásicas, las cuales por una parte conectan con las calcarenitas miocenas en su parte sur; en su parte Nor-Este se disponen por contacto mecánico con los materiales impermeables del Paleozoico y al Norte limitan con el mar; conforman un acuífero conectado hidráulicamente con el acuífero mioceno y con el mar.

La masa de agua *Es Migjorn Gran* corresponde a la parte central del acuífero mioceno, ocupando una extensión de 111,09km² tiene su límite Sur permeable con el mar, y sus límites Oeste y Este permeables con las otras dos Masas de Agua del mismo acuífero (ver *Figura 5*). La zona norte puede considerarse un límite impermeable, por los materiales más impermeables de la base del Mioceno (Unidad Basal, T1) y además en el extremo Oeste por contacto con los materiales impermeables del Paleozoico sobre los cuales se dispone la cuenca miocena. En el extremo Nor-Este de la Masa, su límite está en contacto con las calizas jurásicas de la zona de *Albaida*, pudiéndose considerar como impermeable en un sector y

permeable en otro, según observación de la piezometría (*ver apartado 2.2.3. PIEZOMETRÍA Y FLUJO*).

La masa de agua *Maó* es la que ocupa la parte más oriental del mioceno de *Migjorn*. Su límite con la Masa de Agua *Es Migjorn Gran* es de tipo permeable y su divisoria responde a diferencia de permeabilidad entre ambas. Sus límites Sur y Este son permeables y con conexión hidráulica con el mar. En su extremo Norte se diferencian tres contactos diferentes, que de Oeste a Este son: permeable con las calizas jurásicas de la zona de *Albaida*, impermeable con los materiales paleozoicos de la zona de *Fornells* y permeable con el mar (Puerto de *Maó*). Abarca una extensión de 117,15 km².

La zona de *Albaida* o Masa de Agua Subterránea *Sa Roca*, se sitúa al Norte de la isla y en sus extremos Norte, Este y Oeste limita con los macizos paleozoicos y mesozoicos de toda la zona de *Fornells*, considerándose impermeables. En su límite Sur, se encuentra semiconfinado por el acuífero Mioceno de *Migjorn*, límite explicado anteriormente para las Masas de Agua correspondientes al acuífero Mioceno. Según el PHIB existe drenaje hacia el acuífero Mioceno y el límite entre ambos es permeable. La extensión de esta zona es de 69,44km², 41 de los cuales son afloramientos permeables.

Finalmente la zona de *Fornells* es la más pobre en cuanto a acuíferos. Los únicos acuíferos se sitúan al Norte de *Albaida* o *Sa Roca*. Toda la zona de *Fornells* ocupa 235km², aunque los acuíferos tan solo 3,06km² (Masa de Agua *Tirant*) y 18,94km² (Masa de Agua *Addaia*). Ambos limitan al Norte con el mar, y los demás extremos con materiales impermeables.

2.2.2. ACUÍFEROS

Los materiales geológicos que conforman los principales acuíferos son los conglomerados y las areniscas del Mioceno (Subunidades T2, M11-M12 y M2) y las calizas del Jurásico (en *Migjorn*, *Albaida* y *Fornells*). Existen dos acuíferos conformados por materiales del cuaternario (depósitos aluviales y eólicos), aunque de menor importancia en las Masas de Agua *Addaia* y *Tirant* (zona de *Fornells*). En la *Tabla 3*, se muestra la relación de materiales que conforman acuífero en la isla de Menorca, en concreto se muestra su permeabilidad y saturación, considerando en la clasificación como **impermeables** aquellos que no conforman acuífero o que son muy poco permeables (*T2*, *Paleozoico*), como **semimpermeables** los que presentan alternancias permeables e impermeables (identaciones de *T1* con *T2*), y como **permeables saturados** (M12, M2, Jurásico) o **no saturados**, e incluso **permeables saturados sin conexión al mar** (Jurásico de *Albaida*).

En la zona de *Migjorn*, el principal acuífero tal como se ha ido comentando en los apartados anteriores, es el constituido por los conglomerados, areniscas terrígenas y calcarenitas miocenas (T2, M11-M12, M2). Se trata de un acuífero libre, de permeabilidades algo diferentes en función de las diferentes formaciones geológicas, referidas como Subunidades en este trabajo. Las formaciones más permeables son las arrecifales bioconstruidas (M2), y las calcarenitas con porosidad primaria o secundaria bien desarrollada, y con poca matriz limosa (M2 o T1). Las limolitas o calcarenitas de grano muy fino constituyen acuíferos más pobres, o incluso acuitardos (T2 o identaciones de T1 con T2).

En el extremo Nor-Este de Ciutadella, las calizas del Jurásico, constituyen un segundo acuífero, de tipo libre, tanto si afloran como si se hallan bajo el Mioceno permeable. Se trata de un acuífero menos explotado que el del Mioceno de Ciutadella.

Las calcarenitas miopliocenas también constituyen un acuífero libre, de características algo diferentes dependiendo de las distintas facies. En este trabajo no se han considerado el Plioceno, primero por no estar identificadas en los sondeos y segundo, por su afloramiento escaso en el Sur de *Maó* que probablemente se encuentre no saturado.

La potencia de las formaciones acuíferas del mioceno tiende a aumentar hacia el S, siguiendo el paleorelieve de la cuenca miocena. Según los datos de los sondeos oscila entre 60-70 m al N y 150 al S. Si consideramos todo el Mioceno incluyendo al Subunidad T2, se llega a espesores de 300 a 400 metros al Sur, en la zona central.

En la zona de *Albaida*, o la Masa de Agua Subterránea *Sa Roca*, se encuentra la serie mesozoica con los tramos permeables típicos en las *Illes Balears*. Por una parte las calizas dolomíticas tableadas del *Muschelkalk* con una potencia inferior a 100m (según el PHIB, 2002) y por otra parte y constituyendo el mayor reservorio las dolomías brechoides y microcristalinas del Jurásico Inferior (Lías), que localmente llegan a 200m de potencia.

Los materiales del *Mushelkalk* constituyen un acuífero libre en las escasas zonas de afloramiento y confinado el resto por el *Keuper*. Los materiales del Jurásico constituyen un acuífero libre, sin conexión hidráulica con el mar, colgado y localmente confinado por el Mioceno en la zona central de *Migjorn*. Así lo demuestra la piezometría realizada ver *Apartado 2.2.3. PIEZOMETRIA Y FLUJO*.

La zona de *Fornells* es la zona con mayor cantidad de materiales impermeables, tanto es así que solo se delimitaron dos Masas de Agua Subterránea en su extremo Norte (PHIB, 2013), quedando la mayor parte de su extensión sin clasificar como tal. Los principales acuíferos en esta zona son los dos que constituyen los materiales cuaternarios (gravas, arenas y limos) de origen aluvial que llegan a una potencia máxima de 20m, y que rellenan el fondo de los valles (*Cala Tirant*, *Cala de Binimel.là*, valle al N de *Maó* (*Colàrsega*). Conforman acuíferos detríticos libres, con permeabilidad por porosidad y con contacto hidráulico con el mar.

En cuanto al resto de materiales únicamente las calizas y dolomías jurásicas que afloran en los cabos de la costa norte (*Cavalleria*, *Cap de Fornells*, *Mola de Fornells*, *Punta Grossa*) conforman acuífero, en concreto los tramos dolomíticos y calizos carstificados. Solo son aprovechables al Sur de *Punta Grossa* (Masa de Agua *Addaia*). Los otros afloramientos se encuentran muy próximos al mar y no son explotables para consumo humano debido a la salinidad. La potencia llega a superar los 200m (PHIB,2002). Dichos acuíferos son de tipo libre, con un zócalo formado por los materiales margosos de la base del Jurásico o Triásico impermeable. Presentan permeabilidad por fisuración y carstificación.

2.2.3. PIEZOMETRIA Y FLUJO

Para la caracterización de la piezometría y el flujo se ha realizado una piezometría para todas las Masas de Agua Subterránea, con fecha octubre de 2014. Se ha comparado con gráficos de evolución (1984-2014) en algunos puntos estratégicos. Las figuras siguientes muestran por una parte las cotas en cada uno de los puntos con información en octubre de 2014 y por la otra se muestran las isopiezas interpretadas manualmente a partir de dichas cotas.

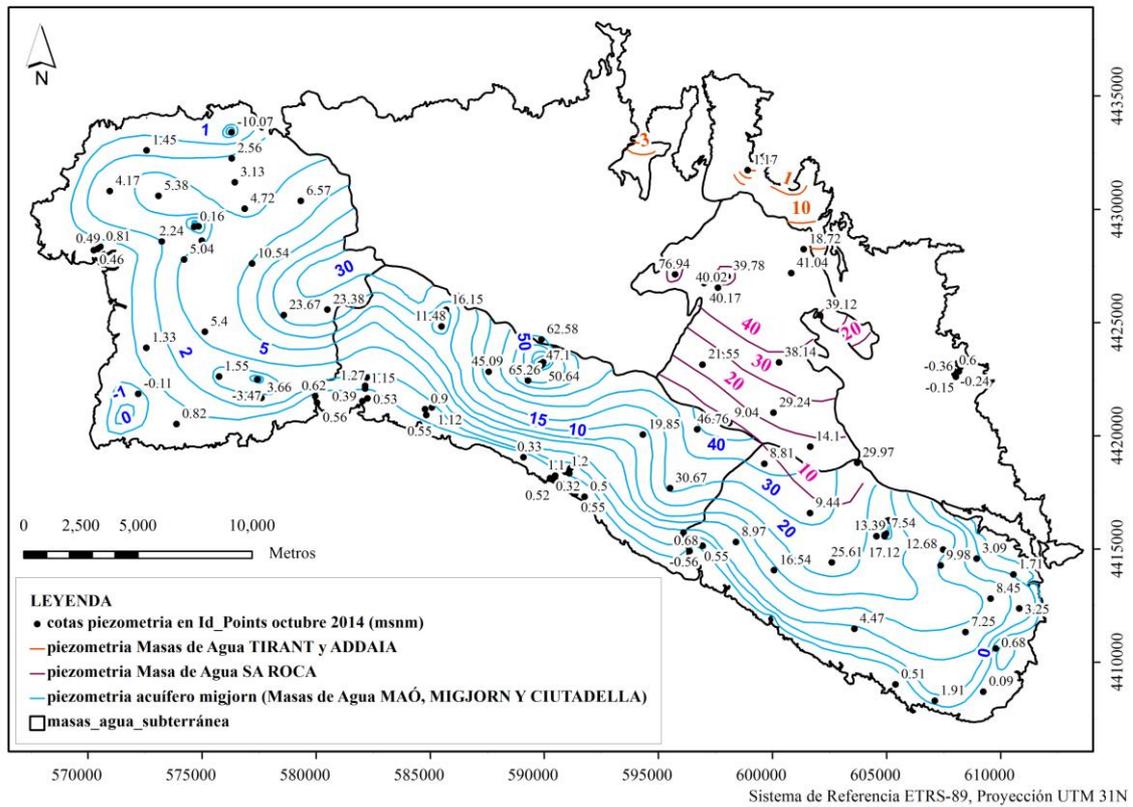


Figura 7. Cotas del nivel del agua y piezometria interpretada.
 Mapa generado con la herramienta HYYH, con datos de octubre de 2014.

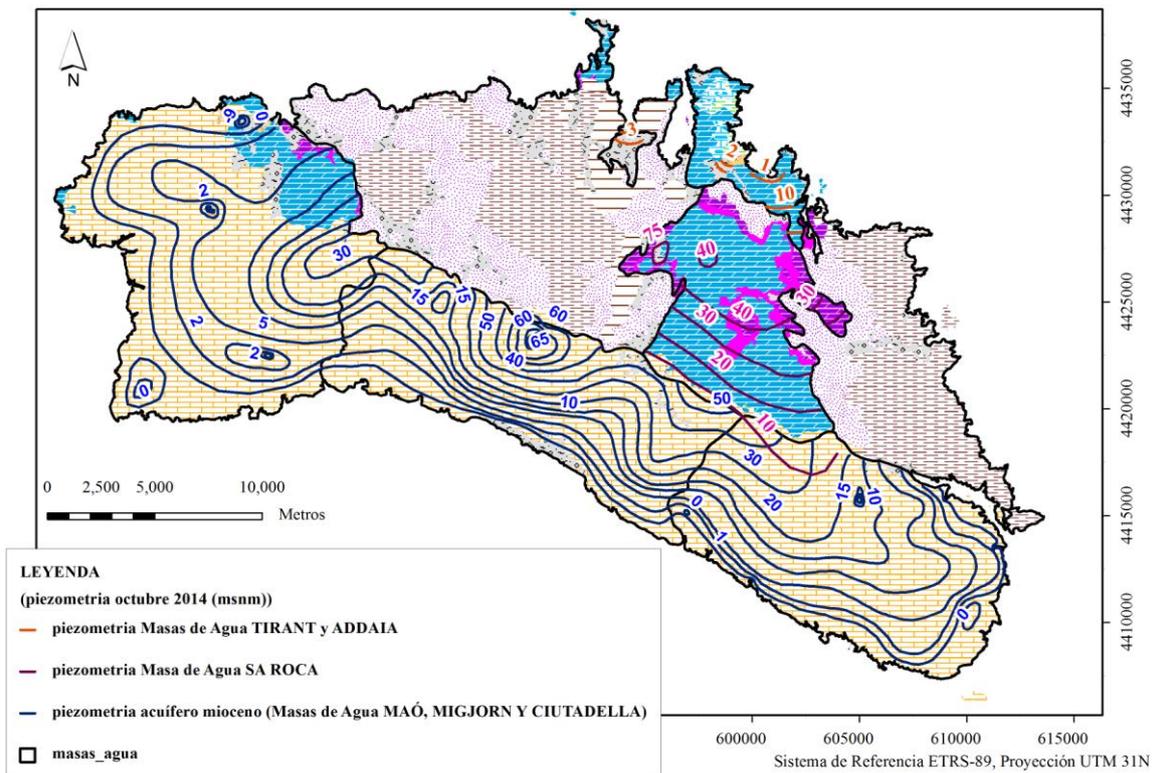


Figura 8. Piezometria de las Masas de Agua Subterranea de la Isla de Menorca.
 Isopezas digitalizadas, a partir de datos de piezometria de octubre de 2014 (m.s.n.m).

De acuerdo a la piezometría realizada, se observa como en el acuífero mioceno y jurásico (de *Ciudadella*) de *Migjorn* se da de forma generalizada una dirección de flujo radial con dirección al mar y siempre desde las partes interiores correspondientes al límite interior de la cuenca miocena. La existencia de barrancos profundos en la zona central de *Migjorn* condiciona el flujo, son drenantes del acuífero, de hecho, existen numerosos manantiales en esta zona. Los gradientes observados son altos en la zona central (0,018) y mas bien bajos o suaves en el extremo occidental, *Ciudadella* (0,002). La zona más oriental, *Maó*, presenta un gradiente suave en el interior que aumenta a favor de la costa sur (0,007). Se han calculado los gradientes en base a la piezometria de octubre 2014, ver *Figura 9*.

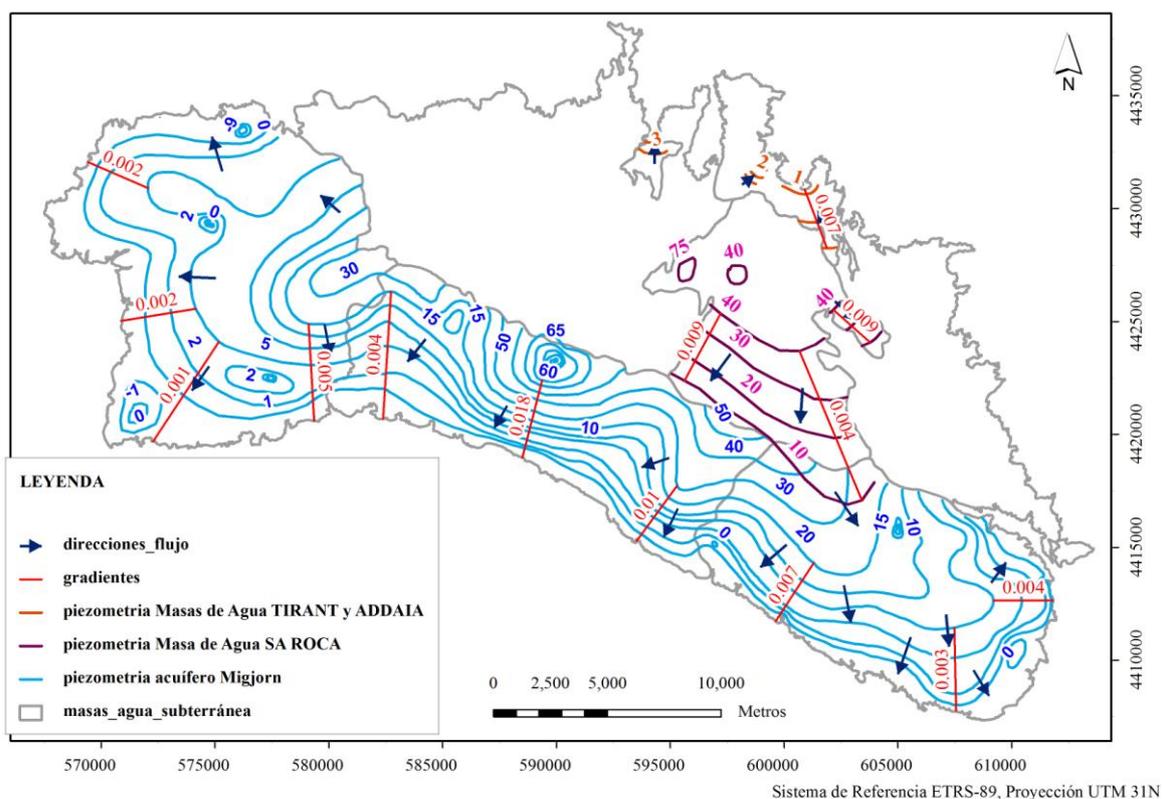


Figura 9. Direcciones de flujo y gradientes.

Datos de piezometria de octubre de 2014 (m.s.n.m).

Gradientes calculados con la calculadora de ArcGis (Field Calculator) a partir de la altura del nivel piezométrico en el extremo del trazado y la longitud del trazado (en rojo).

El origen de las diferencias de gradiente en el mismo acuífero mioceno se asocia en parte a las diferentes permeabilidades que presentan las distintas formaciones geológicas o facies saturadas (T1, M11-M12 o M2) (PHIB, 2002). Observando el corte conceptual Oeste-Este de distribución de facies en el acuífero mioceno (*Figura 10*) y el corte conceptual Sur-Norte con la distribución de permabilidades asociada a cada una (*Figura 22*), realizados ambos por BARÓN, et. al., 1983, y teniendo en cuenta la existencia de un anticlinal suave en la plataforma carbonatada de eje N-S, se pone de manifiesto que las facies saturadas en cada una de las masas de agua subterránea son diferentes, en función de la altura a la que se encuentren éstas respecto de la superficie piezométrica.

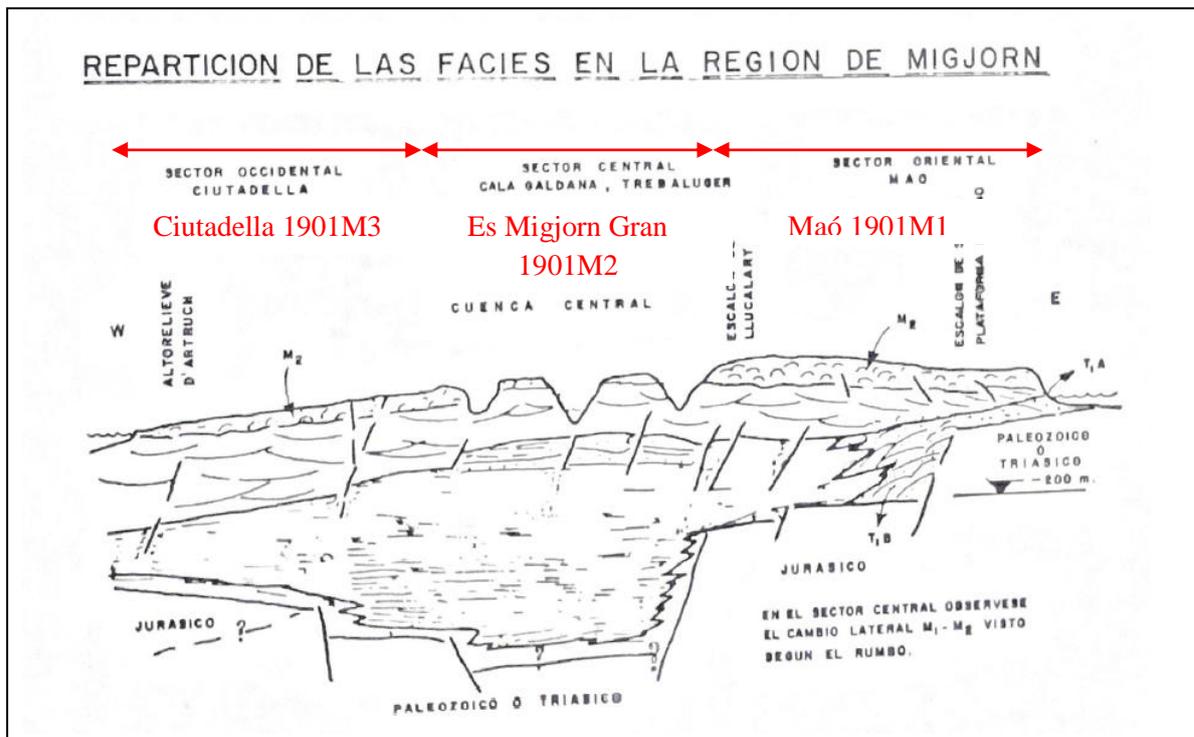


Figura 10. Corte conceptual Oeste-Este del acuífero mioceno.
(BARÓN *et al.*,1983).

Las herramientas utilizadas en este trabajo, que han permitido la creación de superficies tridimensionales (HEROS10, HEROS3D, HYYH, y Geoprocesamiento en ArcGis, detalladas en el apartado 2.3.), han permitido a su vez visualizar la piezometría con sus diferentes gradientes, junto a los valores de transmisividad y permeabilidad y en 3D junto a las intersecciones con las diferentes superficies de subunidades. Para el caso regional se ha podido comparar con la superficie de las subunidades T1 y T2 (ver Figura 34 y ANEXO 5 (VISTAS 3D), mientras que para el caso local, Ciudadella, se han podido comparar con cada una de las subunidades del Mioceno (ver Figura 40). Dicha comparación ha demostrado la relación entre permeabilidad y gradiente con el cambio de facies saturada.

En el sector Suroccidental de *Ciudadella*, se encuentran mayormente saturados los materiales del Complejo Arrecifal (M2) de permeabilidades del orden de 12 m/d, en el sector central los materiales menos permeables de la Unidad Basal (T1) de permeabilidades 0,4 m/d, y en la zona más occidental parece que pueda estar más saturada la Unidad de Barras (M12) con permeabilidades de 6m/d, según datos estimados más adelante (ver Tabla 5. *Valores de transmisividad disponibles para las Masas de Agua Subterránea de Menorca y Subunidades del Mioceno.* y Figura 23. *Valores de transmisividad en pozos particulares y de abastecimiento.* Tabla 7. *Valores de transmisividad (T) y conductividad hidráulica (K) estimados para las Subunidades del Mioceno de Ciudadella.*).

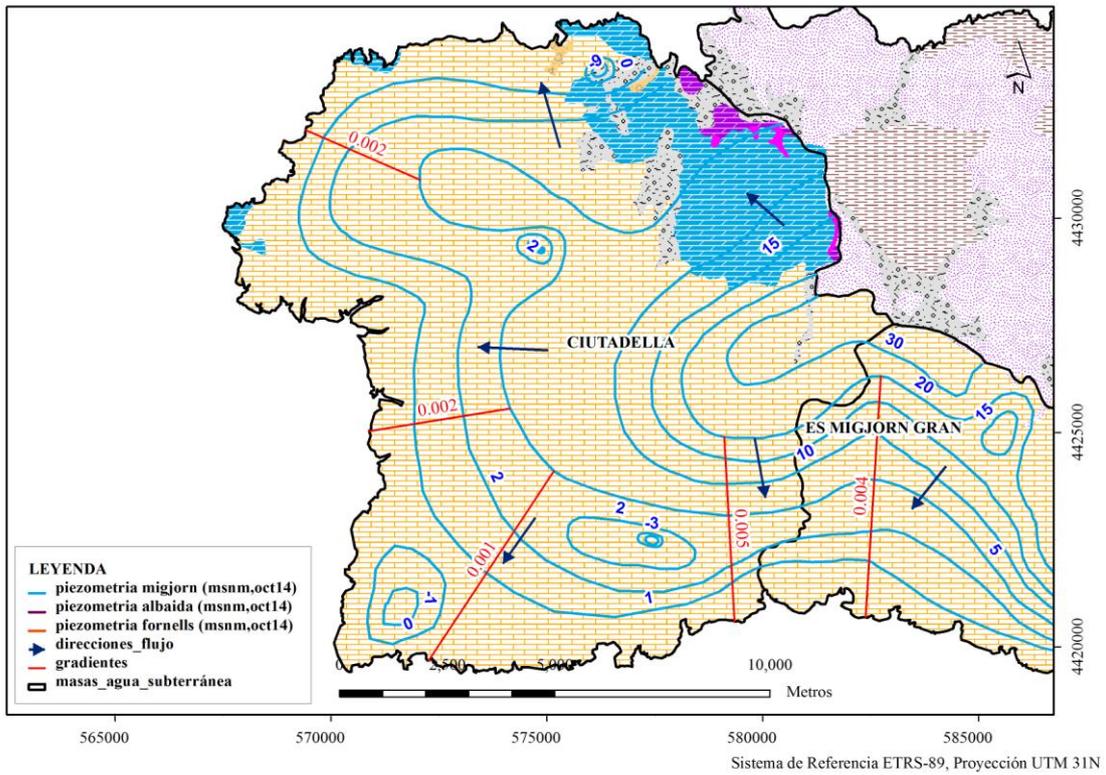


Figura 11. Piezometria y gradientes, Masa de Agua Subterránea Ciutadella.

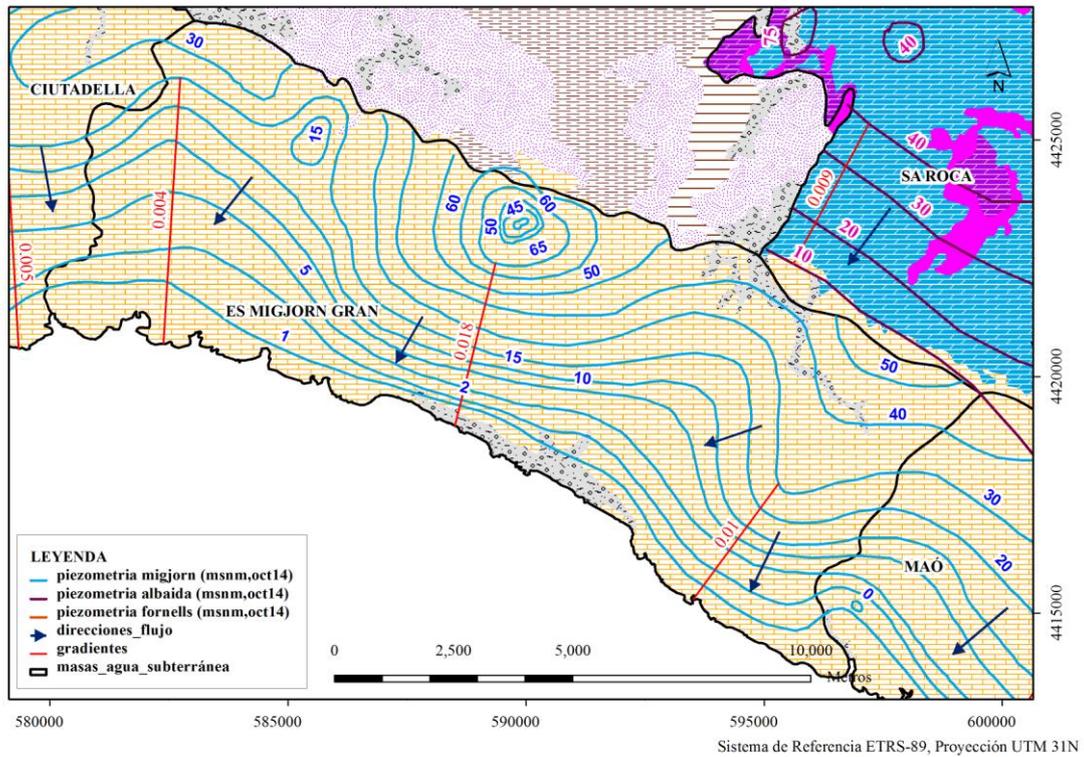


Figura 12. Piezometria y gradientes, Masa de Agua Subterránea Es Migjorn Gran

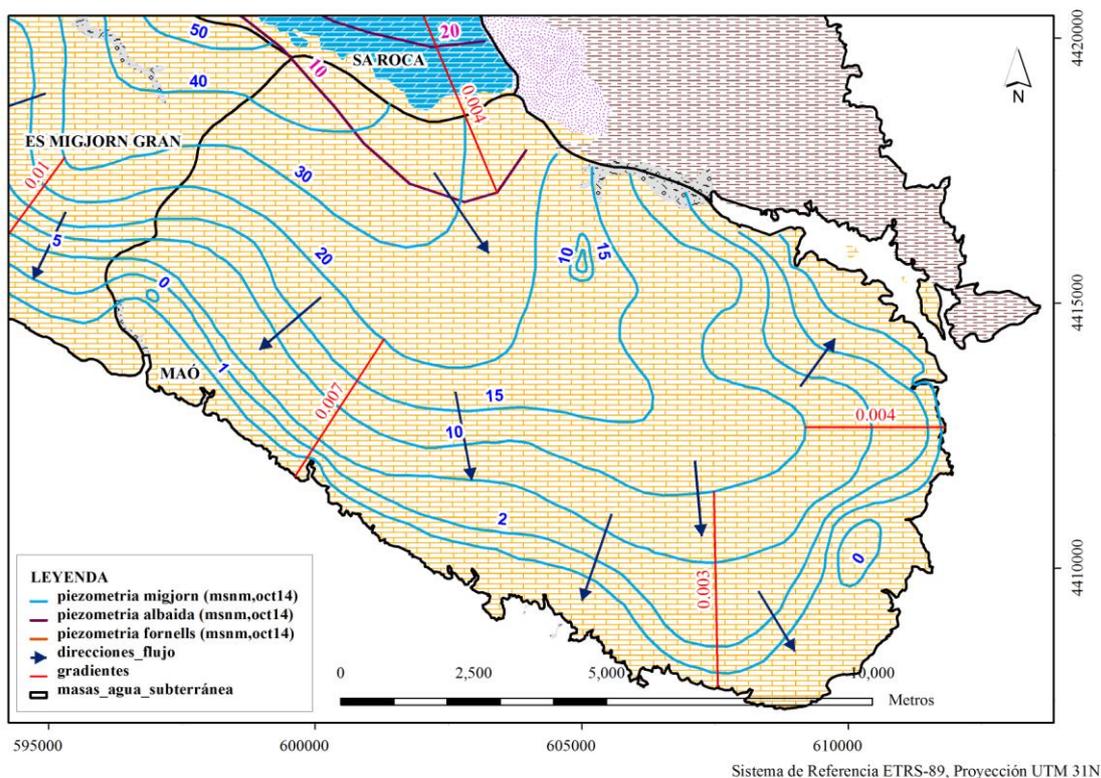


Figura 13. Piezometria y gradientes, Masa de Agua Subterranea Maó.

En el acuífero jurásico de *Albaida* (Masa de Agua Subterranea *Sa Roca*) se aprecia por la piezometria un flujo en dirección Sur en la escama principal mientras que en otra más pequeña se observa una dirección Sur-Este. En general se observa un gradiente más o menos alto (0,009), seguramente debido a la geometria del acuífero y a su desconexión con el mar. En la escama principal, en su extremo Sur-Este se aprecia una disminución del gradiente en forma de lengua, probablemente por cierta conexión hidráulica con el acuífero mioceno. Como se ha comentado en apartados anteriores, el contacto entre el acuífero jurásico (*Albaida* o *Sa Roca*) y el acuífero mioceno (*Migjorn*), es permeable según la bibliografía (PHIB, 2002). Pero observando las diferencias de cotas en la zona de contacto se intuye que podría haber conexión solo en su extremo Sur-Este donde el gradiente se suaviza y se igualan las cotas, mientras que en su extremo Oeste, posiblemente la zona saturada jurásica entra en contacto con la base del acuífero mioceno de carácter más impermeable y no se produce transferencia de agua. En este contacto la diferencia de cota es de 40m (50msnm en el mioceno y 10msnm en el jurásico).

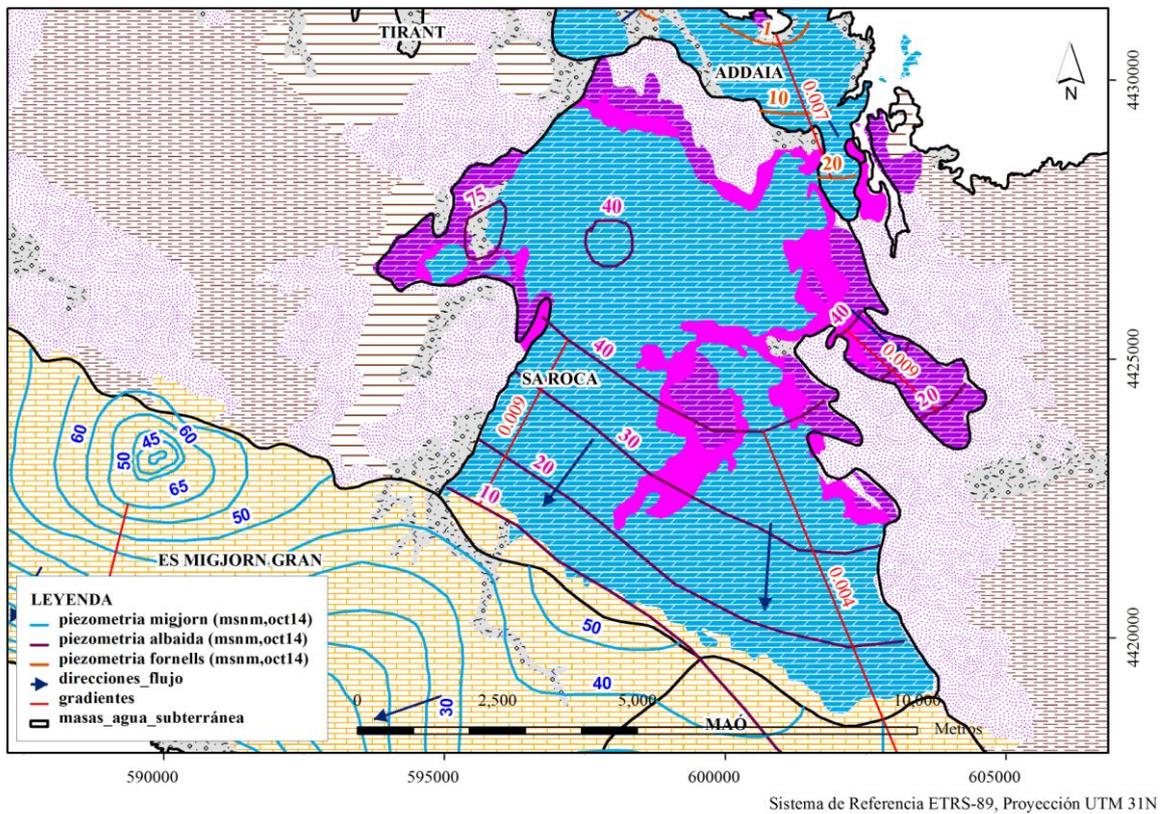


Figura 14. Piezometria y gradientes, Masa de Agua Subterranea Sa Roca.

Los acuíferos cuaternarios de la zona de *Fornells* (Masas de Agua Subterranea *Addaia* y *Tirant*) presentan una piezometria con dirección de flujo hacia el mar. Existen menos datos que en los casos anteriores pero pueden más o menos interpretarse.

En las calizas jurásicas de *Addaia* se observa un gradiente alto (0,007) por lo cerca que tiene la línea de costa. Se puede atribuir a cierta desconexión local con el mar dado los afloramientos de materiales impermeables del jurásico medio-superior en la zona costera.

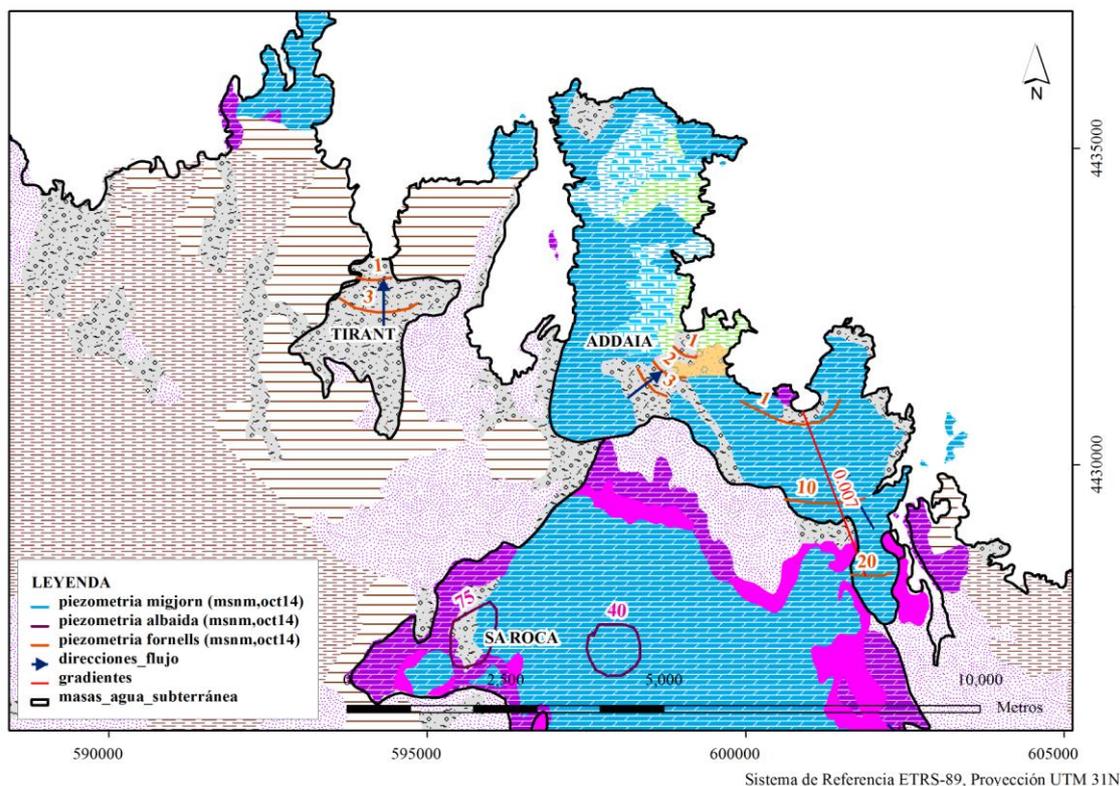


Figura 15. Piezometría y gradientes, Masas de Agua Subterránea Tirant y Addaia.

EVOLUCIÓN TEMPORAL

En cuanto a la evolución de niveles en éstos últimos treinta años (1984-2014) se observan descensos significativos en dos zonas concretas del *Migjorn* y en las calizas jurásicas de *Albaida (Sa Roca)*. Corresponden a zonas de bombeos prolongados para extracciones de abastecimiento urbano, en las que la piezometría de octubre de 2014 también muestra conos de depresión. Éstas zonas son el Norte – Centro de *Es Migjorn Gran* 1901M3 dónde se sitúan los pozos de abastecimiento al municipio *Es Migjorn Gran*, la zona Norte – Centro de *Maó* 1901M1 dónde se sitúan algunos de los pozos de abastecimiento a *Maó*, como son los *Des Turó* y la zona de pozos de abastecimiento a *Es Mercadal* (pozos de *Sa Roca*), en la Masa de Agua *Sa Roca* 1902M1. Los ascensos observados a nivel general a partir de los años 2008 y 2009 se deben a ser éstos especialmente años húmedos y excepcionales.

El Norte - Centro de *Es Migjorn Gran*, con un descenso des de 1984 a 2009 de 75 a 58 msnm o hasta 38 msnm en algún caso, observándose un ascenso hasta la actualidad (*ver gráfico Es Migjorn Gran 1901M2 Zona Norte – Centro*, en el ANEXO 3. RESULTADOS HYYH). Aunque alguno de los puntos no presenta recuperación a partir del 2010 (ME0209). Por las tendencias de evolución que se observan en el gráfico parece que cada pozo explote un nivel distinto en la Subunidad T1 con diferentes estados de confinamiento y de repuesta a la recarga (debido a las identaciones entre las Subunidades T1 y T2 (impermeable) y a los diferentes materiales que conforman la T1: lentejones de conglomerados, areniscas y/o calcisiltitas).

La zona de *Maó* presenta un agotamiento de 17m de desnivel (32 a 15 msnm des del año 2006 sin recuperarse), solo en la zona de explotación de *Es Turó* (ver gráficos ME0367 en el ANEXO 3. RESULTADOS HYYH). El resto de puntos de control de *Maó* presenta variaciones mucho más pequeñas, del orden de 5m o menores, que des de 2009-2010 parecen recuperarse o como mínimo mantenerse. La zona de agotamiento del recurso coincide con una cubeta del basamento T1-T2, tal como se aprecia en las vistas 3D del modelo geológico intersectado por la piezometria (ANEXO 5. RESULTADOS HEROS, Vistas 3D). Las extracciones medias en esta zona agotada pueden apreciarse en la Figura 25. Extracciones medias en pozos de abastecimiento, en los puntos de la red de control cuantitativo.

La zona de *Ciudadella* se caracteriza por presentar conos de bombeo provocados por extracciones para abastecimiento, profundos en la Zona de *Es Caragolí* (entre los -20 y -40 msnm invierno-verano) y asociados a fuerte intrusión salina muy localizada. Son prolongados en el tiempo según los datos de medición de niveles, aunque cabe decir que son conos estrechos, lo que implica una zona de muy poca transmisividad. Lo explicado se observa bien en la piezometria (ver Figura 8), en el mapa de valores de transmisividad (ver Figura 23) y en el mapa de valores máximos históricos de cloruros (ver Figura 19). En el ANEXO 3 se pueden ver gráficos de evolución conjunta para puntos de la zona. Se observa estas cotas tan negativas en un punto de medición de la Zona de *Es Caragolí* (ME0056). También presenta zonas puntuales con cotas negativas, aunque de menor importancia.

En general en el resto de *Ciudadella* los descensos en el tiempo son como mucho del orden de los 2-4 m para el período 1984-2009 y con tendencia ascendente hasta la actualidad. En el acuífero Jurásico los descensos en el tiempo son muy pequeños, entre medio metro y un metro.

En el acuífero jurásico de *Albaida* se observa para el período descrito descensos importantes, del orden de 20 m en la zona más alta. Según el SGOP (1988), existe una divisoria hidrogeológica de dirección E-O, que coincide con el monte *Albaida*, de modo que el drenaje se realiza mediante manantiales en el sector norte, y hacia la Unidad *Migjorn* en el sector sur. Los datos diponibles para este trabajo no representan esta zona norte de descarga.

En la Masa de Agua *Tirant* solo hay un dato y en la Masa de Agua *Addaia* la tendencia de la evolución de niveles parece estable a unas cotas de entre 1.5 y 2 msnm.

En el ANEXO 3. RESULTADOS HYYH se muestran todos los gráficos de evolución realizados por zonas.

A continuación se muestran mapas de valores mínimos y máximos históricos de cota del nivel. Se aprecian grupos de valores máximos históricos más altos coincidentes con las tres zonas con agotamiento del recurso (Centro-Norte de *Es Migjorn Gran*, Norte de *Sa Roca* y Norte de *Maó*).

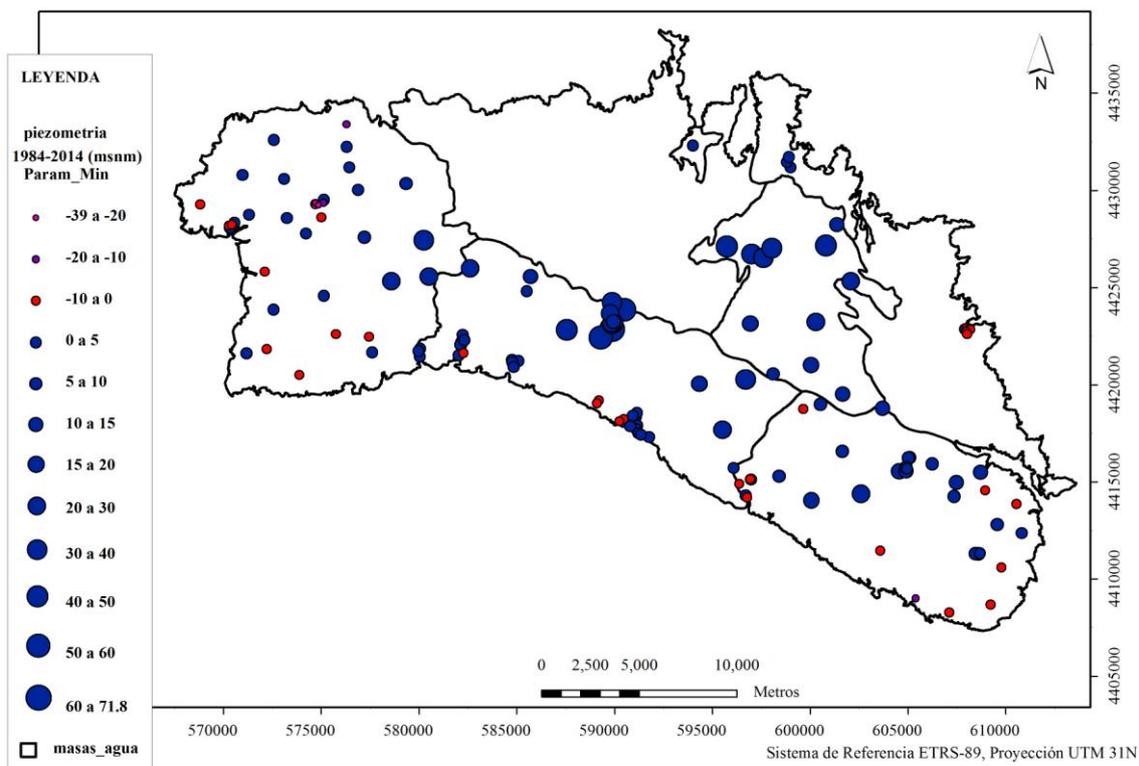


Figura 16. Cotas mínimas históricas del nivel del agua, en los puntos de la red de control piezométrico.
 Mapa generado con la herramienta HYYH, con datos de enero de 1984 a diciembre de 2014.

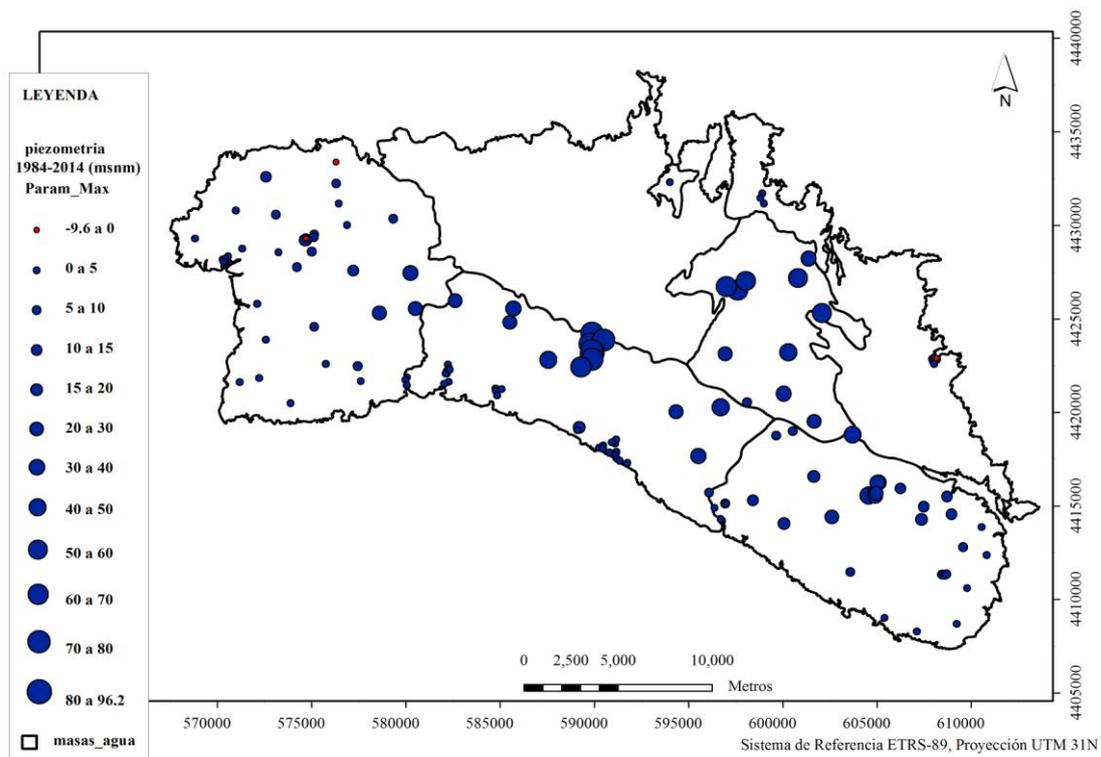


Figura 17. Cotas máximas históricas del nivel del agua, en los puntos de la red de control piezométrico.
 Mapa generado con la herramienta HYYH, con datos de enero de 1984 a diciembre de 2014.

2.2.4. CALIDAD

En el ANEXO 4. RESULTADOS QUIMET, se adjuntan los gráficos obtenidos de análisis hidroquímicos: Digramas de *Pipper* y *Shoeller-Berkaloff* y gráficos de Evolución Temporal, para todas las masas de agua subterránea y subzonas. En el ANEXO 2. MAPAS DE SITUACIÓN DE SONDEOS (BOREHOLE) Y PUNTOS DE CONTROL (DB_POINTS), pueden consultarse los puntos de control y las zonas a los que se hace referencia en el texto siguiente.

Los resultados obtenidos muestran en primer lugar, para toda la isla de Menorca, una clasificación de las aguas que sigue una clara evolución des de Bicarbonatadas Cálcidas, a Cloruradas Cálcidas y a Cloruradas Sódicas, como puede verse en la figura siguiente:

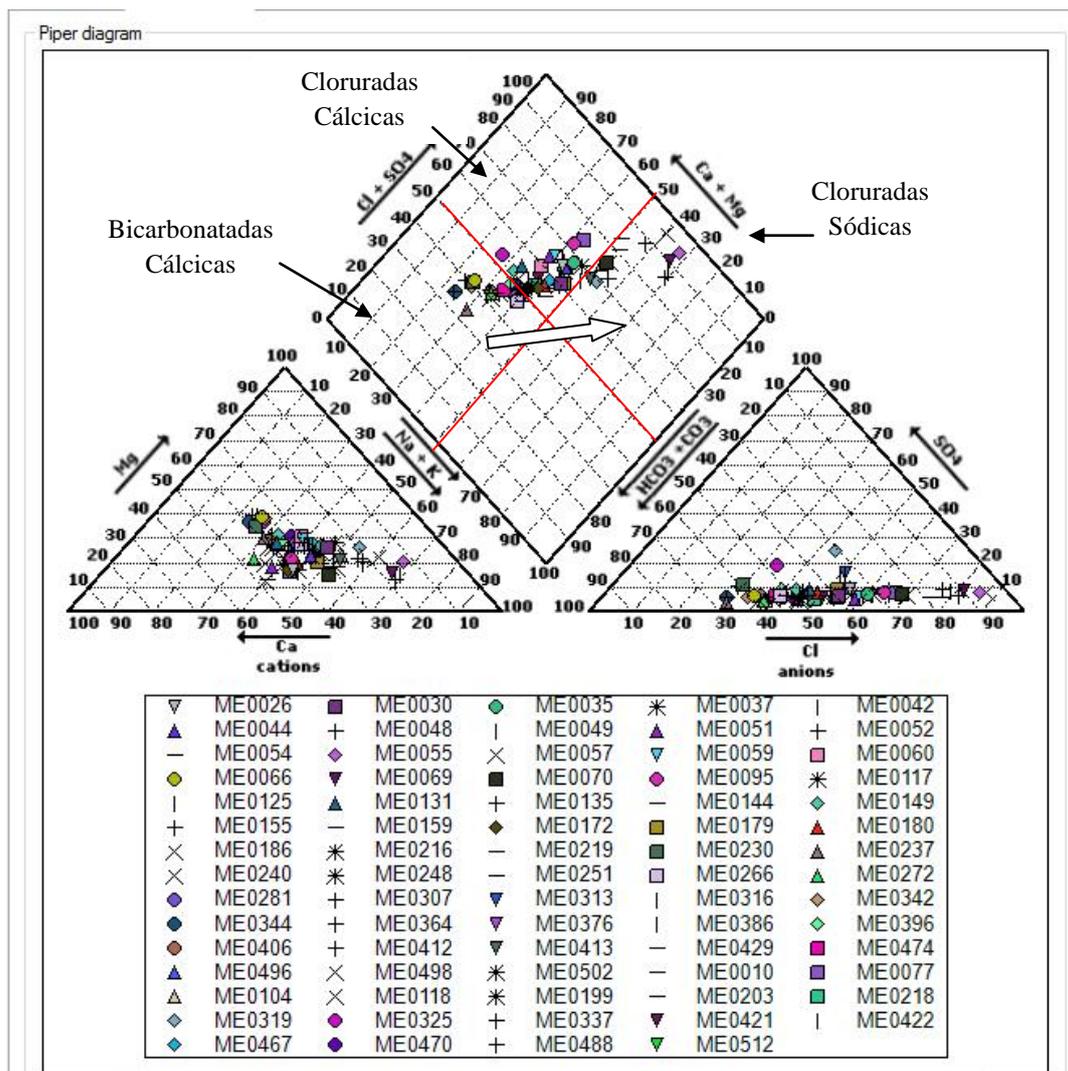


Figura 18. Diagrama de *Pipper*, puntos de la red de control cualitativo de Menorca.
Gráfico generado con la herramienta *QUIMET*, para los datos de Menorca de fecha octubre de 2014.

Esta evolución se puede atribuir a la salinización de las aguas subterráneas por intrusión marina. Las diferentes representaciones de datos explicadas en los párrafos siguientes corroboran la interpretación.

La representación de las aguas por Masa de Agua Subterránea muestra bien las diferencias entre cada una de ellas, como puede apreciarse en los diagramas de *Pipper* del ANEXO 4. A continuación se describen los resultados obtenidos:

En la zona de *Migjorn* se observa en *Ciutadella* una evolución similar a la del conjunto de la isla, siendo la mayoría del grupo Cloruradas Cálcidas, y algunas Cloruradas Sódicas. De hecho, casi todas las muestras Cloruradas Sódicas del diagrama para Menorca corresponden a *Ciutadella*.

En la masa de agua *Ciutadella* se distinguen las muestras Cloruradas Sódicas pertenecientes a las zonas costeras del Sur, *Artrutx* (ME0118), Oeste, *Los Delfines* (ME0010 *Sa Vinya*) y Norte, *Cala Morell* (ME0042) y a la zona central de *Es Caragolí* (ME0048, ME0051, ME0052, ME0054, ME0057, ME0059). Todas pertenecen a las zonas de bombeos para abastecimiento de la Ciudad y a las Subunidades saturadas M12 y M2 (ver también *Figura 25. Extracciones medias en pozos de abastecimiento, en los puntos de la red de control cuantitativo.*). El resto de muestras son Cloruradas Cálcidas, y solo dos, pertenecientes al acuífero jurásico (*Ses Arenes*) y a la zona centro Este (límite con la Masa de Agua *Es Migjorn Gran*) se pueden clasificar como Bicarbonatadas Cálcidas (ver Diagramas por zonas en ANEXO 4 y mapa de las zonas en ANEXO 2). Estos datos ponen en evidencia que se da intrusión salina generada por las extracciones de abastecimiento.

En la masa de agua *Es Migjorn Gran*, la mayoría de las muestras no muestran a penas dispersión en el gráfico y se centran casi todas en la clasificación de Cloruradas Cálcidas por muy poco (55% de Ca+Mg y 55% de Cl+SO₄). Tres muestras correspondientes a la zona del límite Noreste de la Masa se clasifican como Bicarbonatadas Cálcidas (*Es Plans* ME0230, *cerca de La Trotxa* ME0237 y ME0272). Estos resultados corroboran las bajas permeabilidades de la zona central de *Migjorn* y la dificultad de intrusión salina.

La masa de agua *Maó*, presenta unos resultados que sitúan a la mayoría de muestras en la clasificación de Bicarbonatadas Cálcidas y las demás formando una línea de evolución muy estrecha hacia Cloruradas Sódicas. Las más evolucionadas en cuestión de salinización son las correspondientes a la zona costera Sur de *Binidali* (ME0422) y *Binibequer Vell* (ME0488) y costera Este *S'Algar* (ME0470). La zona sin salinizar corresponde a la zona de agotamiento del recurso por extracciones.

La zona de *Albaida* o Masa de Agua *Sa Roca* muestra una facies del agua Bicarbonatada Cálcida (muestras ME0342, ME0344, ME0337 y ME0307). El resultado corrobora que se trata de un acuífero conformado por calizas desconectadas del mar.

En cuanto a la zona de *Fornells*, se dispone de un resultado para cada una de las Masas de Agua Subterránea *Addaia* y *Tirant*. Las dos muestras clasifican el agua como Clorurada Sódica. Se aprecia entonces que existe cierta intrusión salina (ME0325 y ME0319)

En general, los gráficos de evolución 1997 a 2014 no muestran tendencias al descenso en contenido de cloruros, más bien muestran variaciones estacionales que se mantienen en el tiempo.

Los Diagramas de *Shoeller-Berkaloff* muestran la evolución de la salinización por intrusión marina con el aumento de Cl y Na, sobretodo se puede observar para el Diagrama realizado para *Ciutadella* (octubre de 2014) (ver Gráficos en el ANEXO 3. RESULTADOS QUIMET). Así que apoyan las observaciones hechas para los diagramas de *Pipper*.

En el mapa de contenido máximo histórico en cloruros (*Figura 19*), se puede apreciar como las zonas donde se han alcanzado los valores máximos entre 1997 y 2014 corresponden a las zonas descritas anteriormente con facies del agua Cloruradas Sódicas. Así se ve como la zona costera de *Ciutadella* (valores 500 a 3000 mg/l Cl) y la zona de *Es Caragolí* (valores > 5000mg/l Cl) es la que ha alcanzado valores más altos. En *Maó* se observa algún punto en la zona costera con valores de hasta 1000mg/l. En la zona Norte se observan valores altos de entre 1000 y 2000 mg l/Cl en la Masa de Agua *Tirant*. Todos los puntos se corresponden a zonas de extracción para abastecimiento.

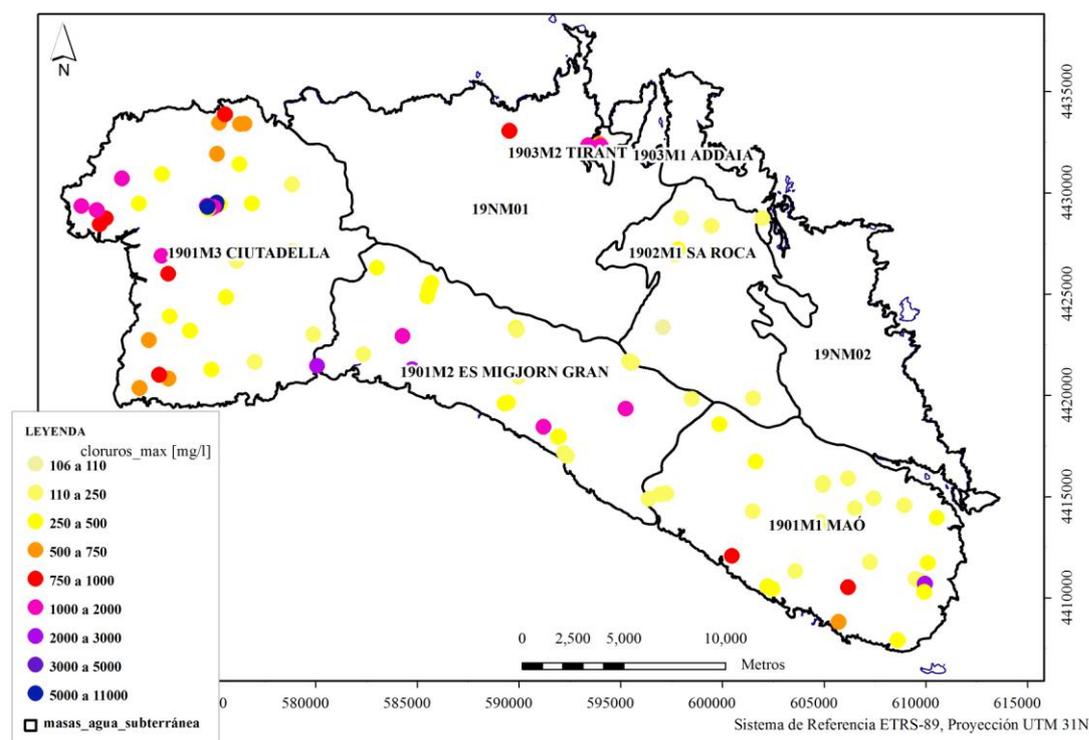


Figura 19. Contenido máximo histórico en cloruros, en los puntos de la red de control de calidad.
 Mapa generado con la herramienta *QUIMET*, con datos de mayo de 1997 a diciembre de 2014.

Los diagramas de *Stiff* para la misma fecha de análisis, octubre de 2014, representados en el mapa (*Figura 20. Diagramas de Stiff para la isla de Menorca.*), nos muestran una distribución de la salinidad que corrobora lo descrito anteriormente, siendo notable el diagrama para la zona de *Es Caragolí*. Éste muestra un contenido en sales elevado y destacable en comparación con el resto de la isla. Así que queda muy registrado el efecto de la intrusión marina en los pozos de abastecimiento de esta zona.

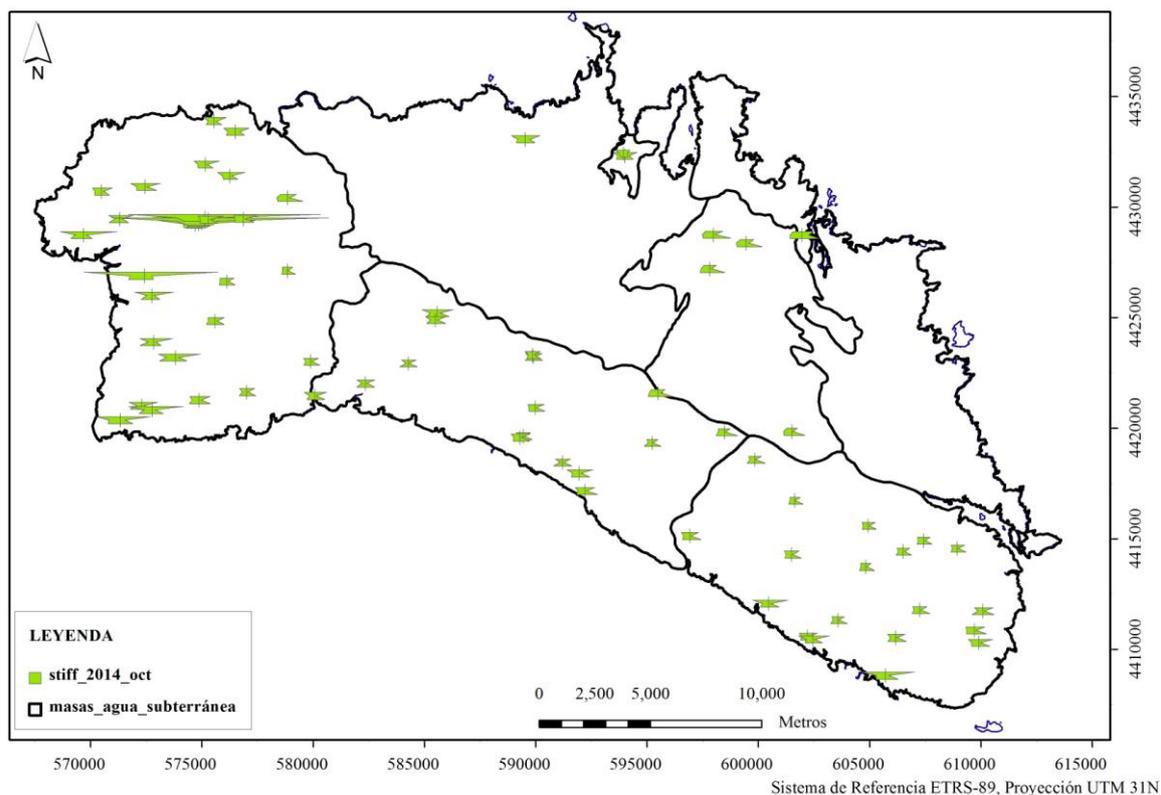


Figura 20. Diagramas de Stiff para la isla de Menorca.
 Mapa generado con la herramienta *QUIMET*, con datos de octubre de 2014.

En cuanto a contenido en Nitratos debe decirse que los valores resultantes indican, como primer análisis, que existe contaminación difusa por nitratos en todas las Masas de Agua Subterránea. Observando el mapa (*Figura 21. Contenido máximo histórico en nitratos, en los puntos de la red de control de calidad.*) de valores máximos históricos de contenido en Nitratos (NO_3 mg/l), entre los años 1997 y 2014, se aprecia una distribución general de valores de entre 37 y 50 mg/l. Hay que remarcar que el valor límite para la potabilidad del agua es de 50mg/l (DMA). En las zonas costeras de *Ciutadella* y en la zona Noreste y Sur de *Maó*, y en *Tirant*, los valores sobrepasan los 75 mg/l, llegando en algún caso a más de 200 mg/l. Se aprecia cierta acumulación de valores altos en estas zonas mencionadas que corresponden a zonas con presiones de tipo urbanístico, y en *Ciutadella* además, de tipo ganadero.

Si se observan los gráficos de evolución por Masas de Agua (*ANEXO 4. RESULTADOS QUIMET*) no se aprecian tendencias al aumento o al descenso, hecho que implica que no se están gestionando los focos de contaminación como aguas residuales de fosas sépticas o alcantarillado, y la gestión de residuos ganaderos.

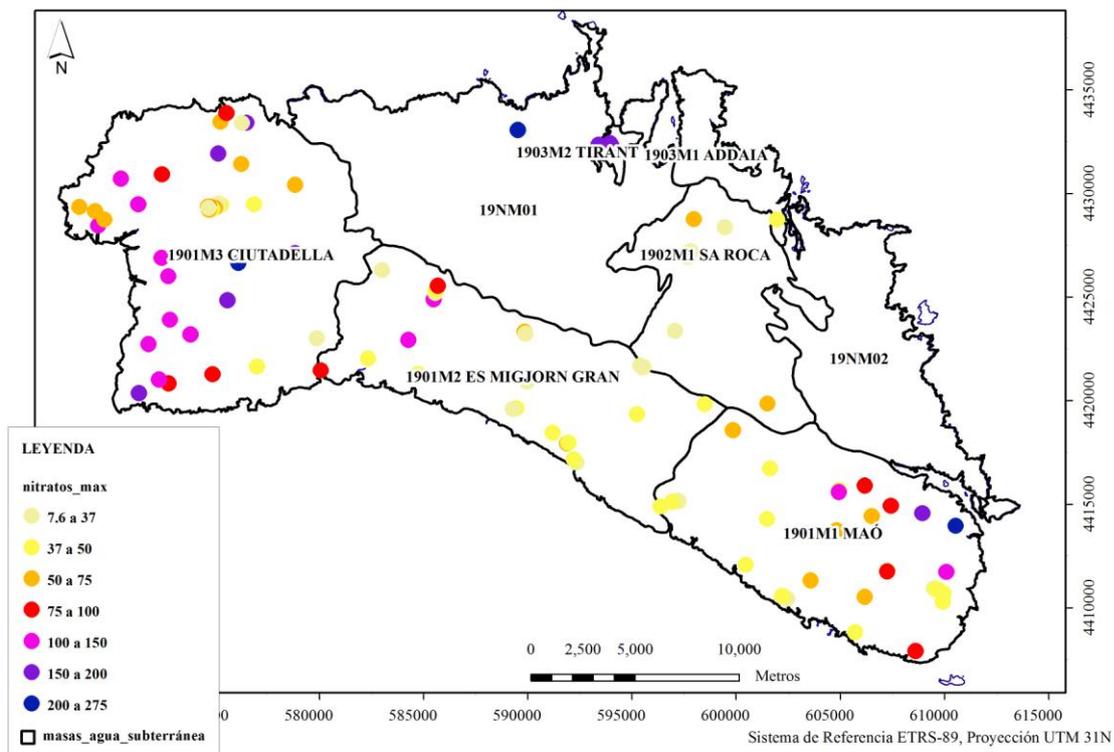


Figura 21. Contenido máximo histórico en nitratos, en los puntos de la red de control de calidad.
 Mapa generado con la herramienta QUIMET, con datos de mayo de 1997 a diciembre de 2014.

2.2.5. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

La porosidad primaria del acuífero mioceno varía en función del tipo de facies. La porosidad secundaria se aprecia claramente en las zonas más carstificadas que se desarrollan a favor de los cuerpos arrecifales, sobre todo en las superficies con contactos erosivos, entre láminas o en las fracturas. La porosidad eficaz varía entre el 2% en la Unidad de Barras, el 10% y 15% en el Complejo Arrecifal (M2). La permeabilidad también varía en función del tipo de facies, que está condicionada por la evolución del cuerpo arrecifal.

Según datos bibliográficos en la Unidad Basal, la permeabilidad es baja en las facies proximales (T1) y las facies distales (T2) se pueden considerar impermeables. La Unidad de Barras (M12) presenta en general permeabilidad baja, inferior a 1 m/d; si presenta karstificación a techo (M11), alcanza valores de 20 m/d. El Complejo arrecifal (M2) presenta permeabilidades más altas, generalmente superiores a 20 m/d. (PHIB, 2002).

Según datos bibliográficos se estima un coeficiente de almacenamiento de entre 0.01 y 0.001 para el conjunto calcarenítico (PHIB, 2002).

SUBUNIDAD		COEF. ALMACENAMIENTO (aprox. Porosidad Eficaz me)	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA [m/d]	CLASIFICACIÓN (según Custodio y Llamas, 1983)
M2	Complejo Arrecifal	0.1 - 0.15	20	Permeable
M12	Unidad de Barras	0.02	< 1	Algo Permeable
M11	Unidad de Barras Karstificada	-	20	Permeable
T2	Unidad Basal Distal	-	-	Impermeable
T1	Unidad Basal Proximal	-	0.1	Algo Permeable

Tabla 4. Valores bibliográficos de parámetros hidráulicos del acuífero mioceno.
(PHIB, 2013).

En la figura siguiente se muestra una relación de las permeabilidades asignadas a cada facies según BARÓN et.al., (1983) y se correlacionan con las Subunidades:

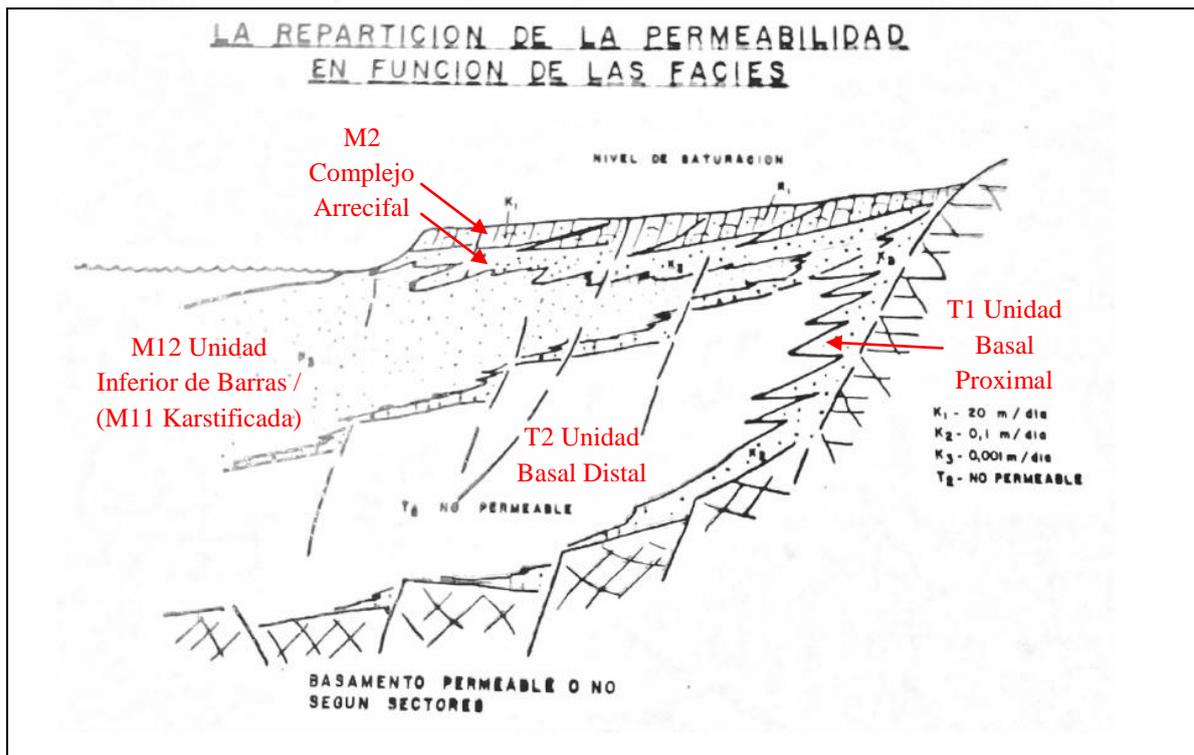


Figura 22. Corte conceptual Sur-Norte del acuífero mioceno. Permeabilidad en función de las facies.
(BARÓN et al.,1983).

En cuanto a los valores de transmisividad (T [m^2/d]) de la Base de Datos de Ensayos de Bombeo del IGME (BDAguas) utilizada en este trabajo, se observa que hay mucha variedad en los valores disponibles, mayoritariamente desde 25 a 3.000 m^2/d , y puntualmente valores mayores, entre 12.000 y 17.000 m^2/d . Es esperable una variación alta dado las diferencias de permeabilidad existentes. A priori observando el mapa de valores (*Figura 23. Valores de transmisividad en pozos particulares y de abastecimiento.*) se pueden diferenciar grupos de valores en función de las facies saturadas, de manera comparable a la distinción hecha entre gradientes de flujo obtenidos a partir de la piezometría (*Figura 9. Direcciones de flujo y gradientes.*).

Así, se aprecia en la zona central de Migjorn (*Es Migjorn Gran*) valores más bajos que en el resto (entre 1 y 275, y algún punto mayor de 200, m^2/d).

En *Maó* los valores son más dispares (la mayoría entre 5 y 925 m^2/d) y un valor puntual de 3.000 m^2/d . Estas variaciones se pueden deber a zonas más karstificadas con permeabilidad secundaria muy desarrollada. En general en *Maó* se intuyen valores más altos en la zona costera Sur (hasta 925 m^2/d), dónde el basamento T1-T2 presenta una rampa.

En *Ciutadella* se puede asociar una zona costera en la que la facies saturada es el Complejo Arrecifal (M2) de permeabilidades estimadas de 20 m/d , en la que los valores de transmisividad se encuentran mayoritariamente entre 100 y 2800 m^2/d . En el resto los valores disponibles son más bajos, entre 40 y 400 m^2/d .

Para la zona de *Albaida* (Masa de Agua *Sa Roca*), se dispone de una variedad de valores, entre 25 y 1.400m²/d y un valor puntual de 12.400m²/d. Éstos valores tan altos se deben seguramente a la karstificación y fracturación de las calizas y dolomías mesozoicas. Lo mismo sucede para la Masa de Agua *Addaia* que presenta un valor de 17.000 m²/d. En la Masa de Agua *Tirant* el único valor disponible muestra una transmisividad de unos 350 m²/d.

ZONA	TRANSMISIVIDAD [m ² /d] (datos IGME,	Subunidad atribuible del Mioceno
Ciudadella, zona costera	100 - 2800	M2
Ciudadella, interior	40 - 400	M12
Ciudadella, norte	30	T1
Es Migjorn Gran	1 - 275	M12 - T1
Maó	5 - 925, 3000	M12
Sa Roca	25 - 1400, 12000	-
Addaia, jurásico	1400, 17000	-
Addaia, cuaternario	< 10	-
Tirant	350	-

Tabla 5. Valores de transmisividad disponibles para las Masas de Agua Subterránea de Menorca y Subunidades del Mioceno.

Valores disponibles en la Base de Datos del IGME (DBAguas), introducidos en HYDOR y representados en la figura siguiente.

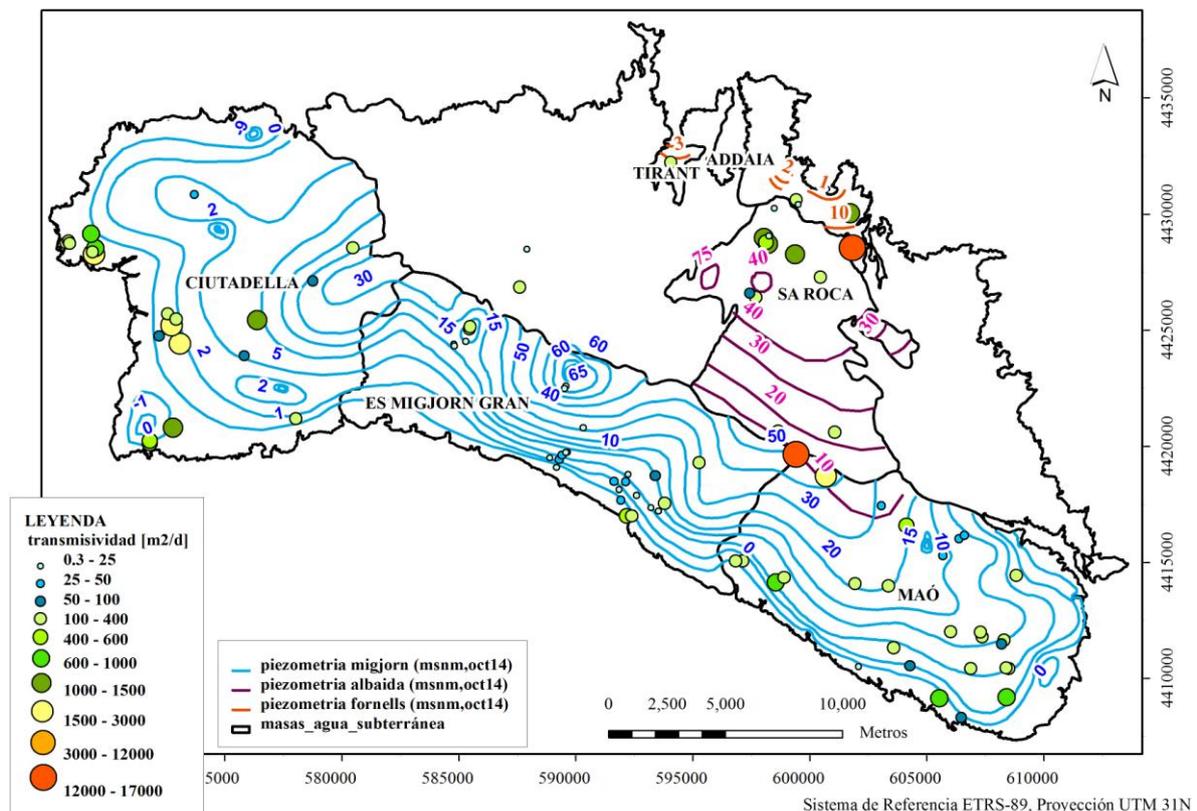


Figura 23. Valores de transmisividad en pozos particulares y de abastecimiento.

Mapa generado con la herramienta HYYH. Datos disponibles en la base de datos del IGME (BDAguas).

2.2.6. BALANCE (RECARGAS-ENTRADAS, VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO, DESCARGAS-SALIDAS)

Las recargas o entradas en las isla se dan por infiltración de agua de lluvia, a nivel general, y contabilizando por Masas se puede dar transferencia entre ellas, cómo el caso de *Sa Roca* a *Maó*, explicado en el apartado de piezometría (2.2.3.). Hay que tener en cuenta las entradas por intrusión salina. De manera antrópica se dan entradas por pérdidas en redes municipales y retorno de riegos (PHIB, 2013).

Las descargas o salidas en la isla se dan principalmente de manera natural por manantiales y salidas al mar (y alguna zona húmeda) y de manera forzada por extracciones para abastecimiento y regadío, y en menor medida para consumo doméstico disperso (pozos de uso doméstico para viviendas aisladas en suelo rústico).

El PHIB, 2013 presenta un balance muy detallado en tipo de entradas y salidas y por Masas de Agua Subterránea, con un total de entradas y salidas para toda la isla igual a 68.9hm³/a:

Código	Nombre	Infiltración de Lluvia	Transferencia entre MAS	Infiltración Torrentes / Recarga artificial	Retorno de riegos	Pérdida en redes abastecimiento	Pérdida en redes alcantarillado	Intrusión Salina	Suma				
1901M1	Maó	17,633	0,500		0,077	1,518	1,062	0,473	21,263				
1901M2	Migjorn Gran	14,554	0,500		0,051	0,516	0,361		15,981				
1901M3	Ciudadella	21,209			0,222	1,285	0,899	0,536	24,151				
1902M1	Sa Roca	5,066			0,054	0,154	0,208		5,482				
1903M1	Addaia	1,203	0,200		0,025	0,172	0,208		1,809				
1903M2	Tirant	0,249			0,000	0,008	0,005	0,010	0,272				
Sistema explotación MENORCA		59,913	1,200	0,000	0,428	3,653	2,745	1,019	68,958				
Código	Nombre	Abastecimiento en red	Agroindustria (inclou venta camions)	Industria	Regadío	Ganadería	TORRENTES	MANANTIALES	HUMEDALES	Transferencia a masses	Sorrida al mar	Recuperacio reserves	Suma
1901M1	Maó	5,059	0,857	0,640	0,767	0,140	0,223		0,048		13,530		21,263
1901M2	Migjorn Gran	1,719	0,220	0,000	0,508	0,101	1,402		0,880		11,151		15,981
1901M3	Ciudadella	4,283	0,701	0,103	2,215	0,305	0,076		0,093		16,374		24,151
1902M1	Sa Roca	1,544	0,178	0,056	0,540	0,077	0,225	1,663		1,200	0,000		5,482
1903M1	Addaia	0,059	0,004		0,070	0,000		0,377	0,196		1,103		1,809
1903M2	Tirant	0,026	0,004		0,002	0,007			0,147		0,086		0,272
Sistema explotación MENORCA		12,690	1,963	0,799	4,102	0,630	1,926	2,040	1,364	1,200	42,244	0,000	68,958

Tabla 6. Balance Hídrico de las Masas de Agua Subterránea de Menorca.
(PHIB, 2013)

Para el presente trabajo se ha elaborado el Balance Hídrico del Mioceno de la Masa de Agua Subterránea *Ciudadella*, del que también se han estimado valores de parámetros hidráulicos y se ha realizado un modelo 3D para su futura modelación (ver el apartado de *Ciudadella 3.2. BALANCE (RECARGAS-ENTRADAS, VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO, DESCARGAS-SALIDAS)*).

Así mismo se han introducido en la base de datos HYDOR las extracciones en pozos de abastecimiento para toda la isla, dado el interés del dato para la gestión del recurso. A continuación se muestra, por una parte los pozos existentes en la isla (*Figura 24*) y por otra las extracciones medias en los pozos de abastecimiento con datos, que son la inmensa mayoría (*Figura 25*). Puede observarse como en las zonas dónde se han detectado problemas de agotamiento del recurso y/o salinización, coinciden con zonas de extracciones para abastecimiento. Los puntos con valores más altos de extracciones medias son los correspondientes a los pozos de abastecimiento de *Es Caragolí*, en *Ciudadella* (zona centro), con valores de entre 300,000 y 400,000 m³/a por pozo. Precisamente es en este lugar dónde las cotas de extracción están por debajo de los -20msnm y dónde se da un cono de extracción muy acusado y la mayor salinidad observada en las muestras.

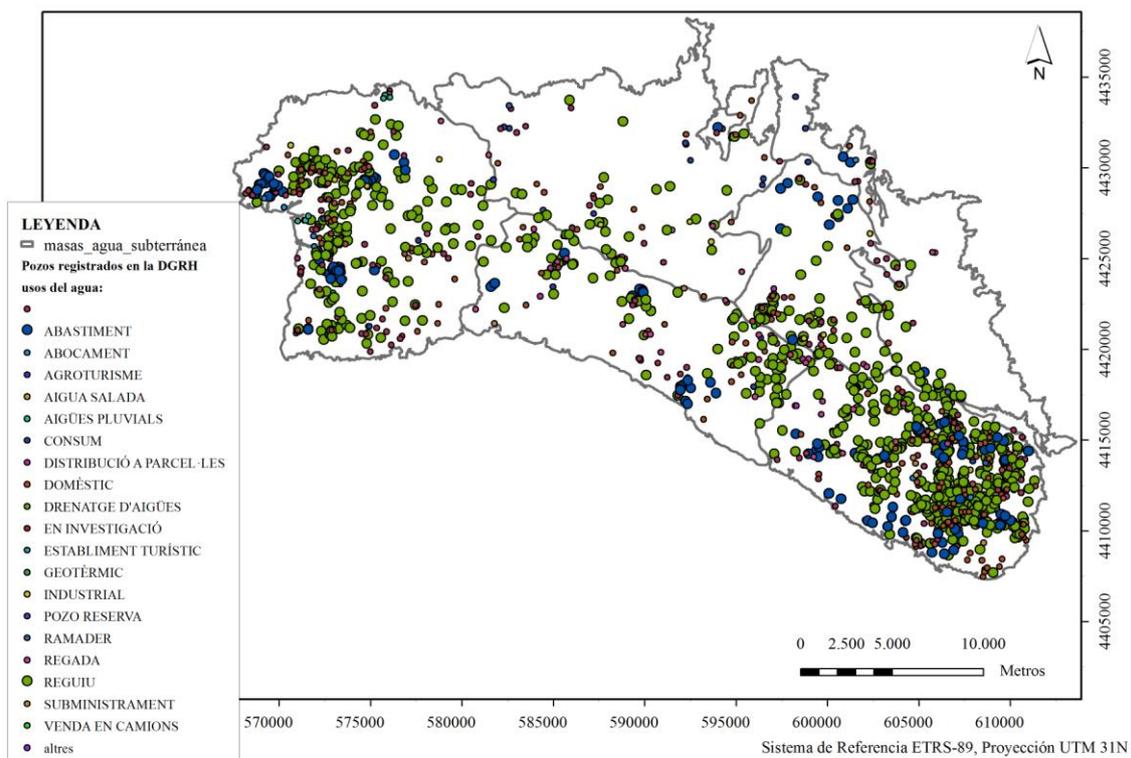


Figura 24. Pozos registrados en la DGRH, para el total de la isla de Menorca. (IDEIB), (CAS).

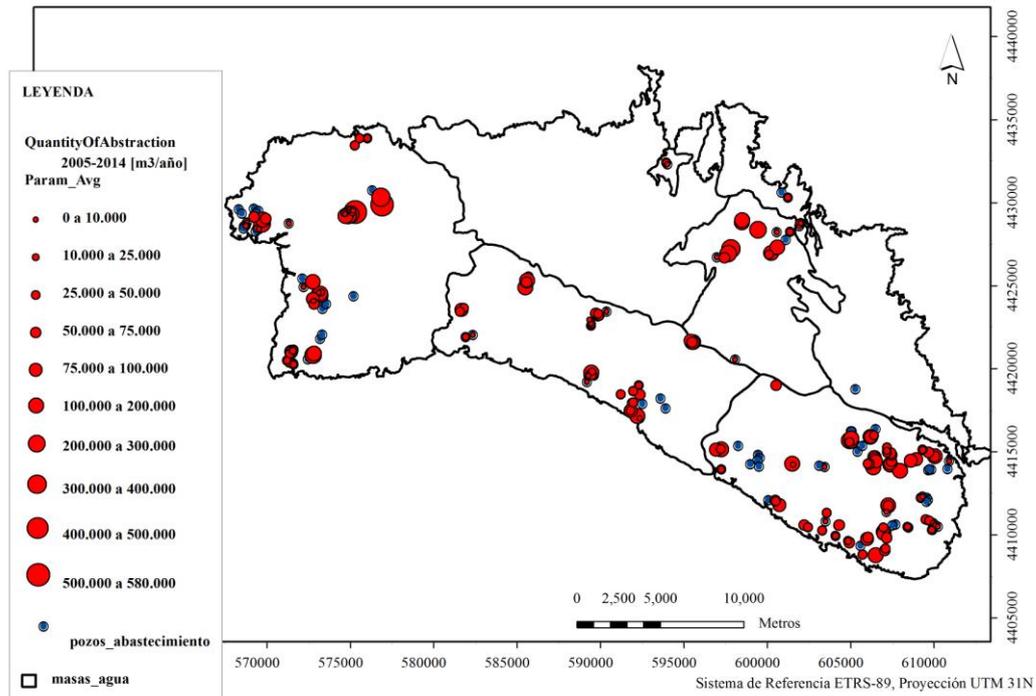


Figura 25. Extracciones medias en pozos de abastecimiento, en los puntos de la red de control cuantitativo.

Mapa generado con la herramienta HYYH, con datos de 2005 a 2014, para la mayoría de pozos de abastecimiento.

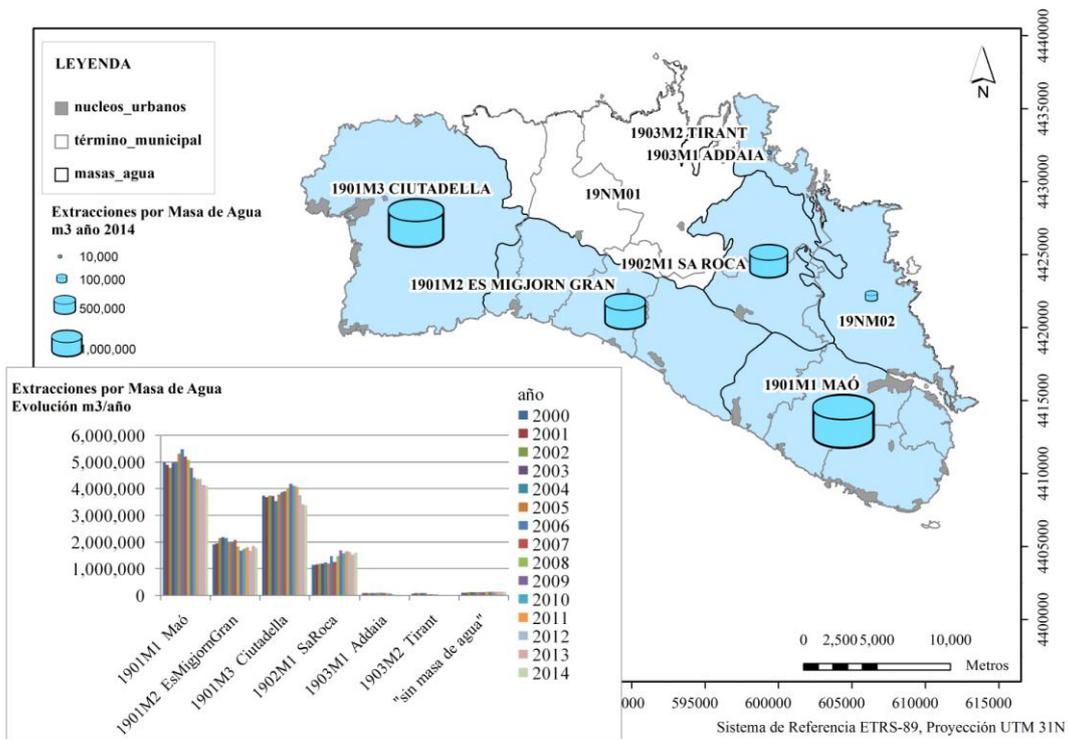


Figura 26. Extracciones para abastecimiento por Masa de Agua Subterránea.
Mapa generado con ArcMap, datos actualizados de la DGRH (COMAS,2013).

En cuanto a extracciones para abastecimiento totales se dispone de un resumen anual para los años 2000 a 2014 realizado a partir de lecturas de contadores y información aportada por los gestores municipales (DCA-PAIB) (COMAS, 2013). Se han actualizado los datos a 2014 y se han representado en un mapa. En la (Figura 26) se muestra la evolución de las extracciones para abastecimiento por Masa de Agua Subterránea y los valores para 2014. Los datos de extracción por pozo no representan la totalidad de las extracciones como puede verse en la (Figura 25), en algunos de los pozos no se dispone de dicha información. El resumen anual sí estima las extracciones totales por Masa de Agua y se ha utilizado el volumen de Ciutadella para la realización del balance Hídrico de 2014 (3.2. BALANCE (RECARGAS-ENTRADAS, VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO, DESCARGAS-SALIDAS). Se puede apreciar en general una disminución de las extracciones a partir del año 2010. La zona de la Masa de Agua Maó es la que sufre más extracciones (4hm^3 en 2014), le sigue la Masa de Agua Ciutadella ($3,4\text{hm}^3$ en 2014) y en el resto se extrae menos de $2\text{hm}^3/\text{año}$.

Según el PHIB, 2013, las extracciones para regadío se calcularon a partir de los datos de Teledetección de superficies regadas. Se utilizaron los datos pertenecientes a las superficies regadas en los años 2008 y 2009 y se asignó una dotación de riego en función del cultivo y se supuso que las aportaciones de agua tenían que ser extracciones in situ, dado que no hay aportes de otras fuentes de agua en la isla. Los datos para Ciutadella se han usado para el Balance Hídrico realizado en este trabajo. El mapa siguiente muestra las zonas regadas para este período, siendo especialmente más densas en Ciutadella:

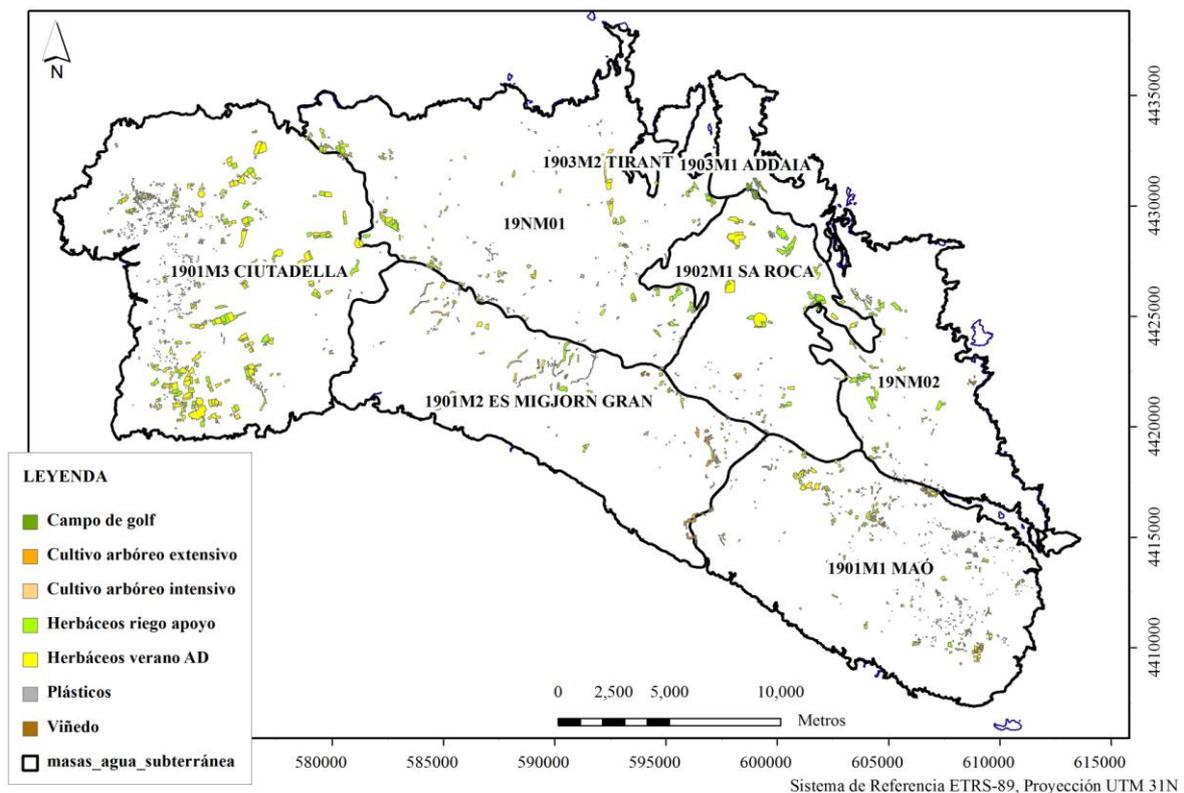


Figura 27. Superficies regadas en 2008-2009.
 Mapa generado con ArcGis. Datos disponibles del PHIB, 2013.

2.3. MODELO GEOLÓGICO-HIDROGEOLÓGICO EN 3D DEL ACUÍFERO MIOCENO

Para la realización del Modelo Geológico en 3D se han tenido en cuenta la disponibilidad de datos geológicos en sondeos y en bibliografía, la importancia de cada uno de los acuíferos en relación al total de la isla y la representación de dichos datos en relación a los límites del acuífero elegido: basamento y contornos. Por todo ello se ha elegido el Acuífero Mioceno a nivel regional, y a nivel local, el mioceno de la Masa de Agua Subterránea Ciutadella (apartado 3.3).

En el apartado 2.1. *CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO* se ha explicado la relación entre el acuífero mioceno y el resto de Masas de Agua Subterránea, así como las Subunidades (SubUnits) que configuran el acuífero mioceno.

Para una modelación de flujo del acuífero mioceno se podrían considerar dos opciones en cuanto a basamento del acuífero. La primera correspondería al basamento Paleozoico y Mesozoico y acuífero configurado por las Subunidades T1, T2, M12 y M2; y la segunda al basamento configurado por las dos Subunidades miocenas basales T1 y T2 y el acuífero configurado por las Subunidades miocenas M12 y M2 (ver *Tabla 3. Identificación y relación entre formaciones geológicas existentes, acuíferos, masas de agua, Units, Subunits y modelo geológico en 3d.*). Tanto una opción como la otra requiere considerar que habría conexión hidráulica entre el acuífero a modelar y el basamento.

Si consideramos que el basamento es el formado por el techo de los materiales Paleozoicos y Mesozoico, deberemos tener en cuenta conexiones hidráulicas locales en función de si en superficie (del basamento) encontramos materiales permeables como las calizas del jurásico o triásico medio, o los demás materiales impermeables. En este caso, no disponemos de suficiente información en los sondeos (*Borehole*) sobre la cota de la superficie del Paleozoico y/o Mesozoico ni de su identificación. Solo para algunos sondeos próximos al límite Norte del acuífero mioceno se ha identificado algún material del Paleozoico o Mesozoico. Así mismo se dispone de una interpretación del basamento Paleozoico-Mesozoico basada en una campaña de gravimetría y sondeos mecánicos, realizada por BARÓN et.al., (1983). En las figuras siguientes se muestra la información disponible para la interpretación y la batimetría generada para este trabajo:

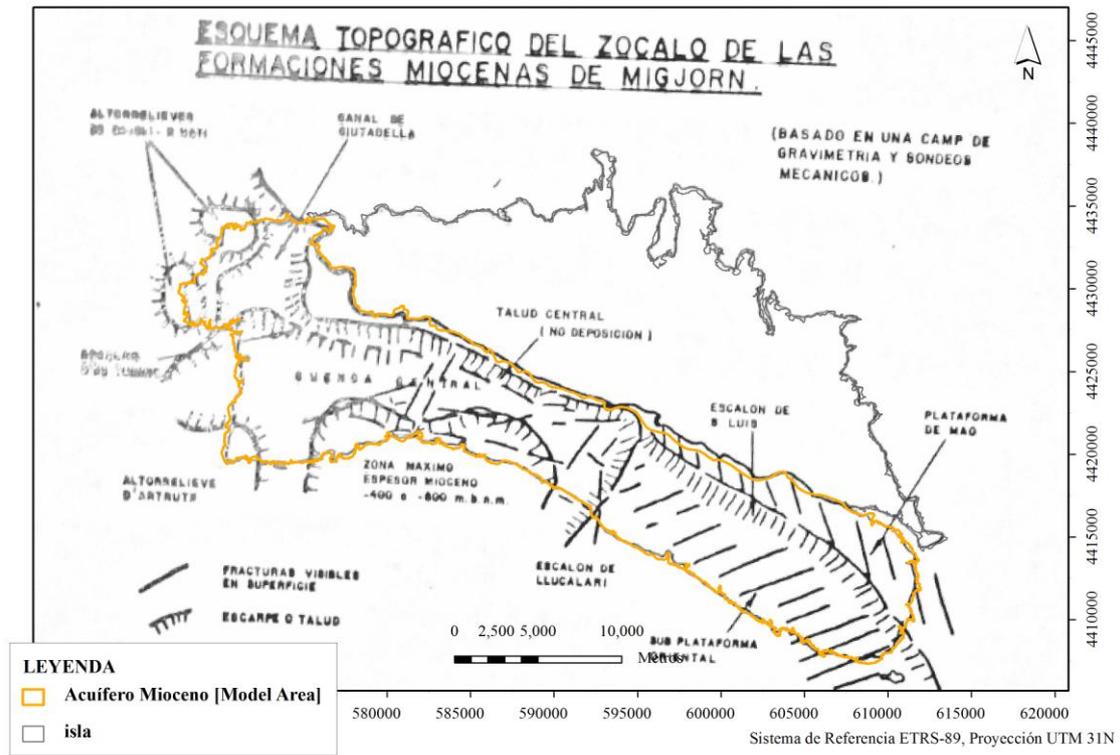


Figura 28. Esquema topográfico del zócalo de las formaciones miocenas de migjorn. (BARÓN et al., 1983).

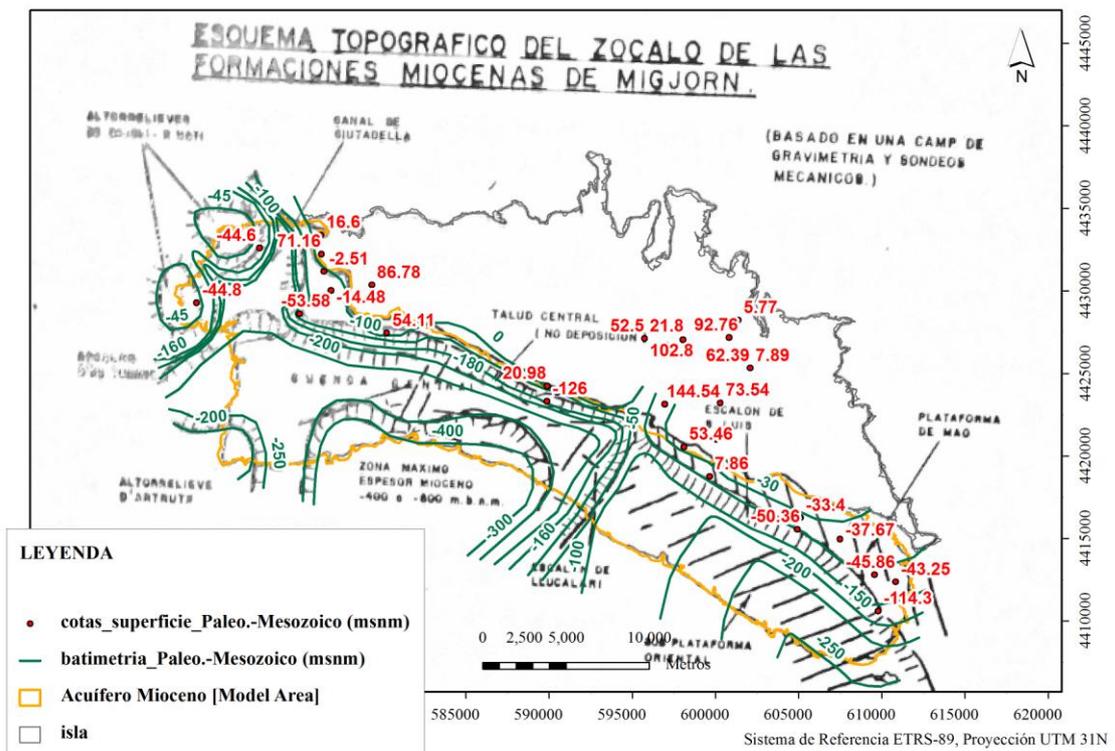


Figura 29. Cotas absolutas y batimetria del basamento Paleozoico-Mesozoico.

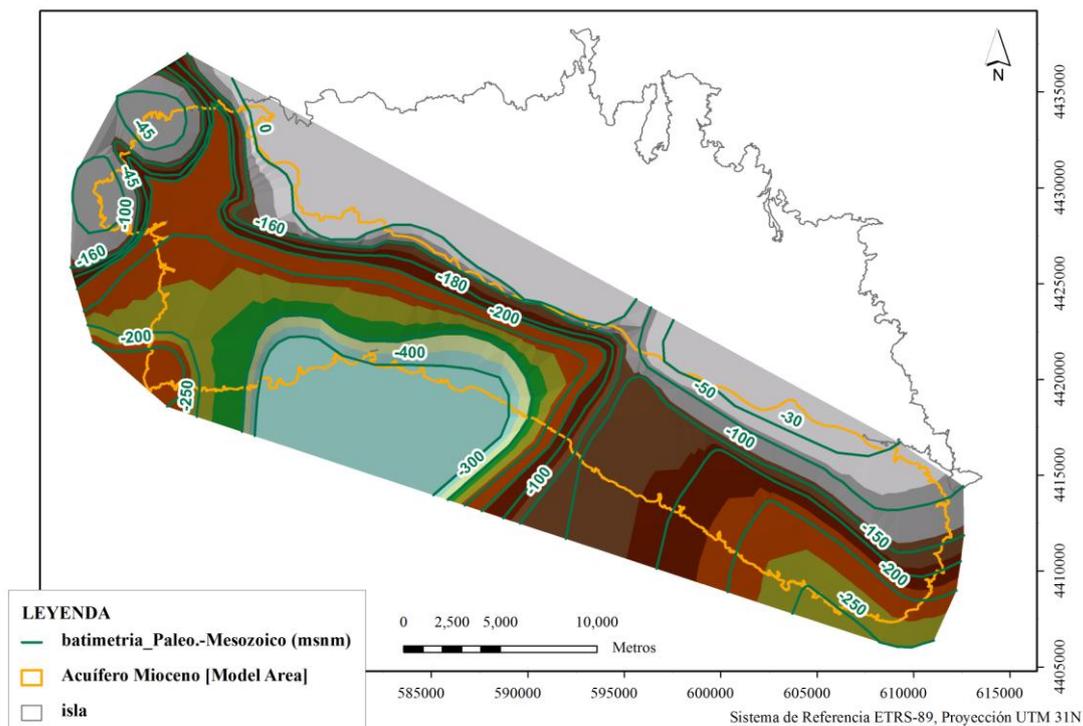


Figura 30. Interpretación de la batimetría del basamento Paleozoico-Mesozoico.

Observando la batimetría realizada se pueden distinguir tres zonas diferenciadas, casi correlacionables en cuanto a límites, con las Masas de Agua Subterránea. En el extremo occidental se aprecia un paleo canal importante, que parece de dirección Norte-Sur, con abertura hacia el Este. Al Sur se aprecia una cuenca profunda abierta hacia el Sur, y en el extremo oriental, una rampa que desde el centro hacia el este gana profundidad.

Considerando esta opción se deberían modelar las Subunidades T1, T2, M12 y M2 como capas de diferentes permeabilidades, de tal manera que la T2 sería prácticamente impermeable.

Si consideramos la segunda opción, que el basamento corresponde a las Subunidades T1 y T2, podemos modelar un acuífero conformado por las Subunidades M12 (Unidad de Barras) y M2 (Complejo Arrecifal Indiferenciado), con un base más o menos impermeable en la parte más externa de la cuenca conformada por la superficie T2 (Unidad Basal Distal) y una zona más interna de la cuenca conformada por una superficie semimpermeable, la T1 (Unidad Basal Proximal) con identaciones de la T2. A través de la Subunidad T1 se da un flujo seguramente condicionado por la alternancia de capas más permeables y menos permeables, según la litología, conglomerados, areniscas y/o arcillas.

Para la interpretación de un basamento T1-T2 se dispone de información suficiente en los sondeos (*BoreHole*), así que se ha realizado una batimetría a partir de dichos datos:

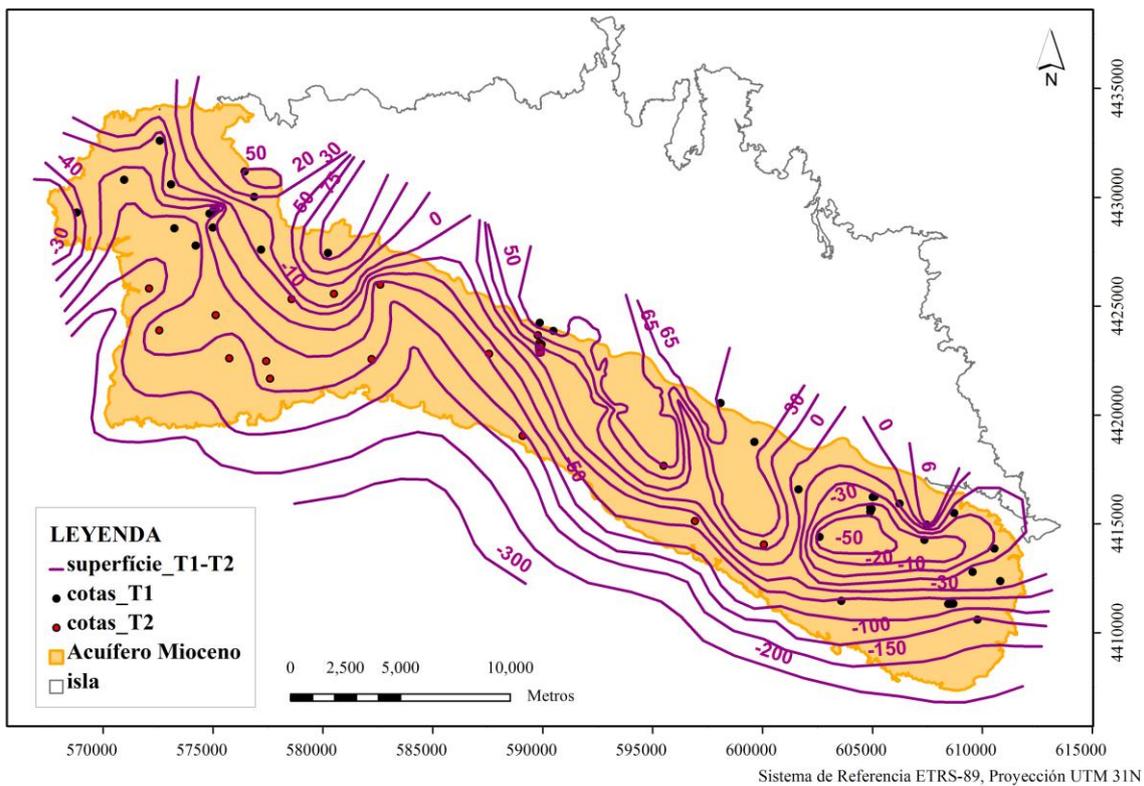
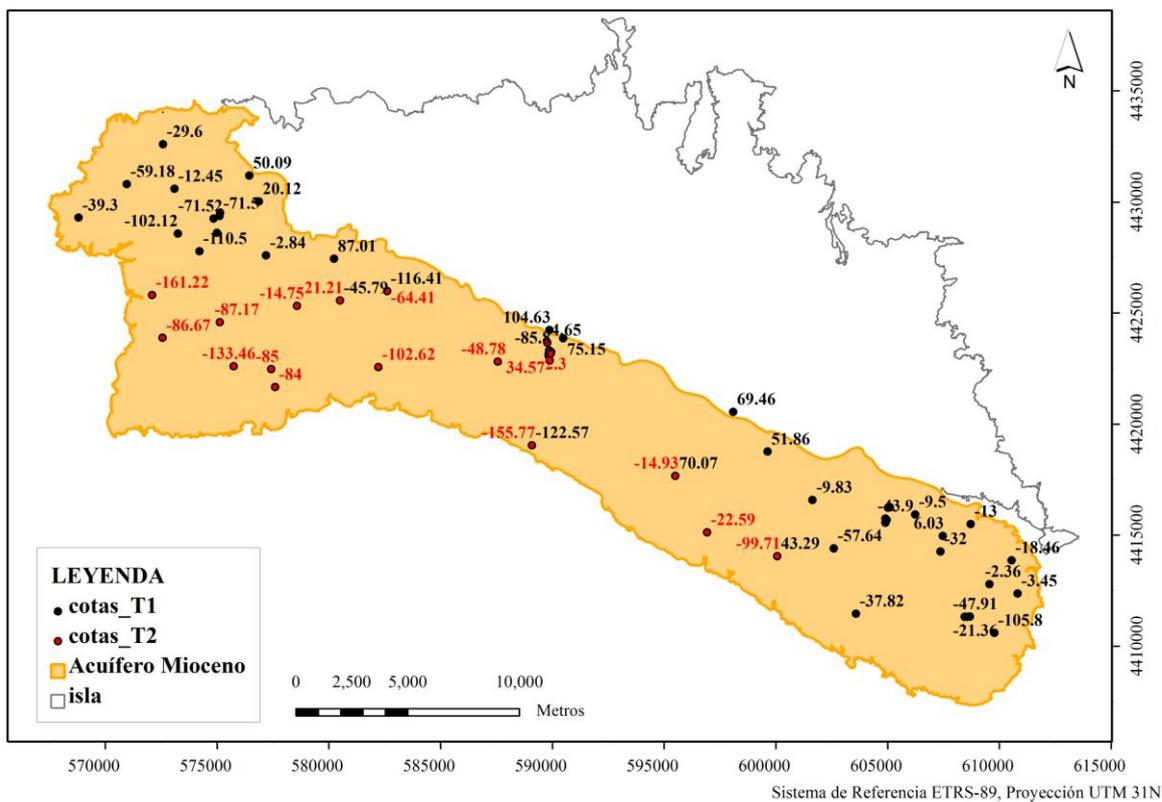


Figura 31. Cotas absolutas y batimetria del basamento Unidad Basal (T1-T2).

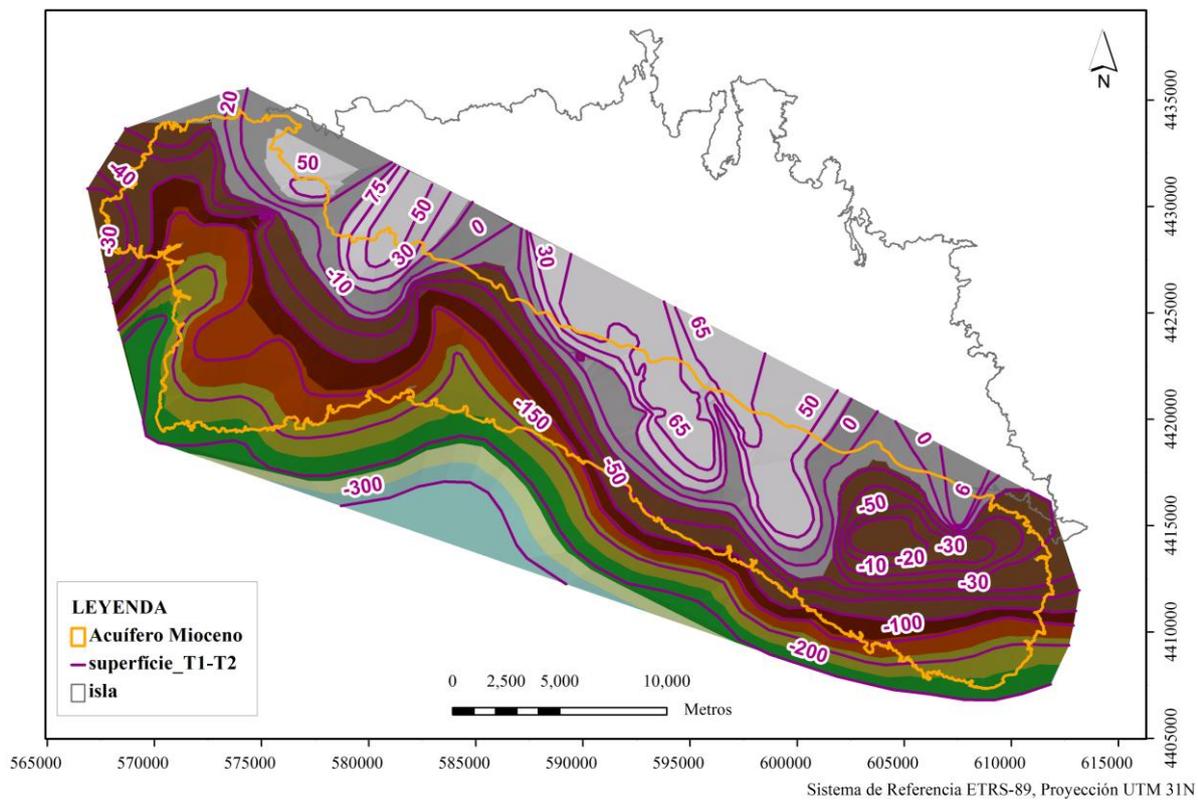


Figura 32. Interpretación de la batimetría del basamento Unidad Basal (T1-T2).

Para comparar los resultados del basamento con la piezometría realizada para octubre de 2014, se ha generado una superficie de ésta. Observando la piezometría y la batimetría T1-T2 se aprecian muchas similitudes en cuanto a gradientes en el flujo y pendientes en el basamento, así que se puede considerar que el gradiente del flujo viene muy condicionado por la superficie T1-T2 (base del acuífero si se considera como basamento), por el espesor de M12 y M2 (acuífero en caso de considerar T1-T2 el basamento) y por la Conductividad Hidráulica de las Subunidades.

A continuación se muestran algunas imágenes en 3 dimensiones de las superficies de basamento creadas, de la superficie piezométrica y de la superficie del terreno, para el mioceno del Migjonn y en el ANEXO 5. RESULTADOS HEROS se muestran detalles de las intersecciones:

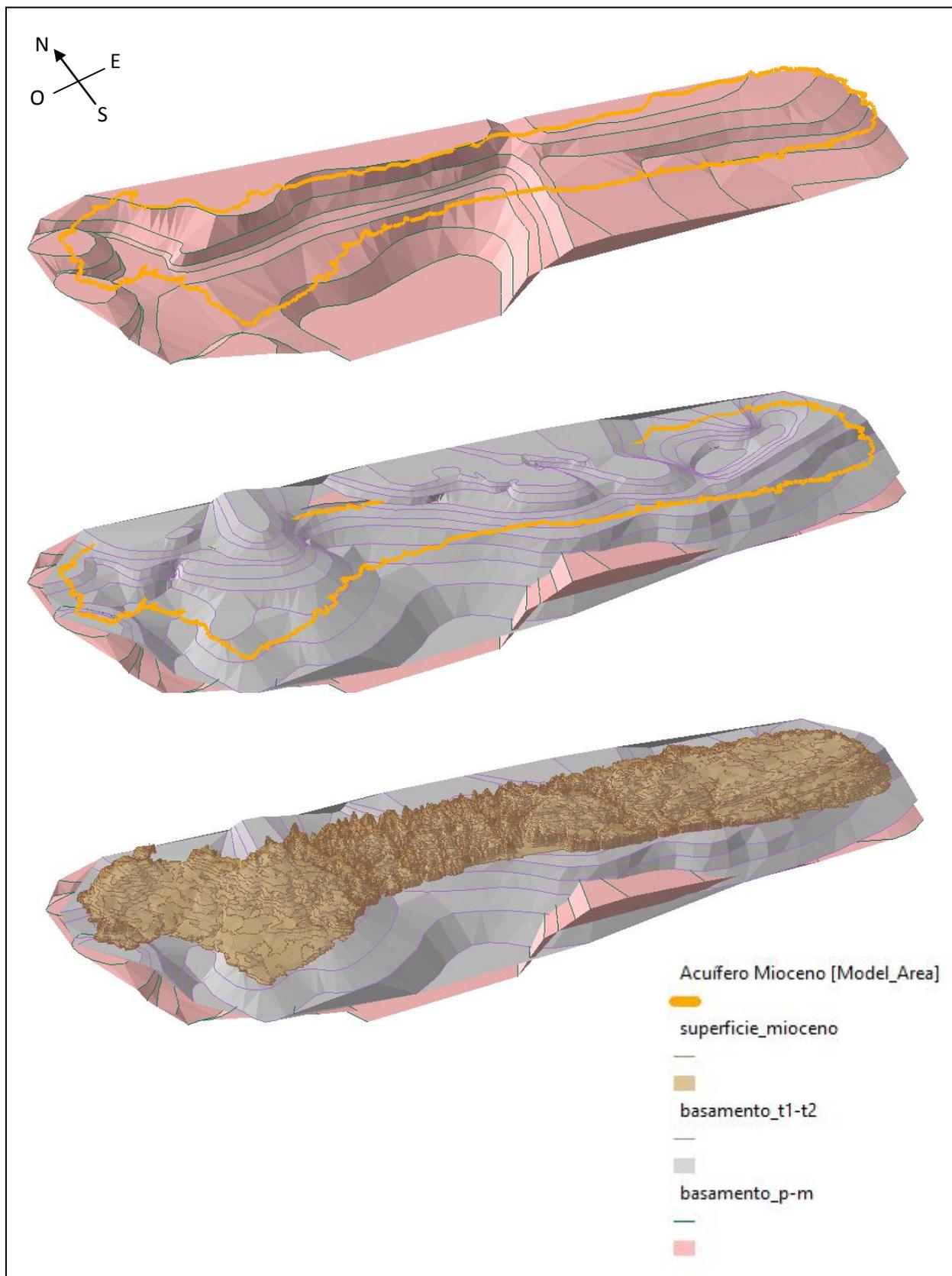


Figura 33. Vista 3D de las superficies de basamento y la superficie topográfica.

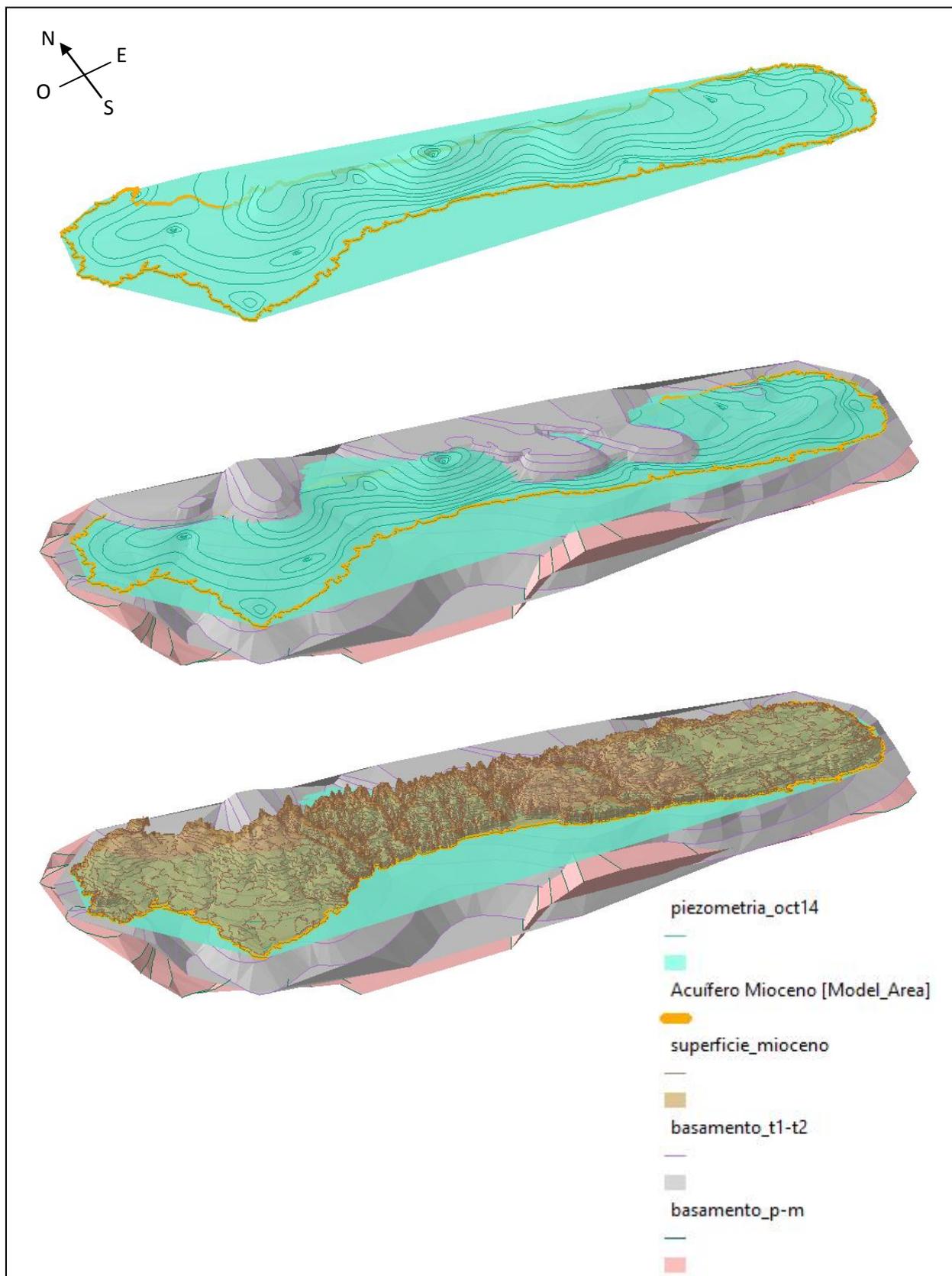


Figura 34. Vista 3D de la superficie piezométrica y las superficies de basamento y topográfica.

3. MODELO CONCEPTUAL LOCAL. MIOCENO DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA CIUTADELLA

En este apartado se detallan algunos aspectos que no han sido contemplados en el apartado anterior: 2. MODELO CONCEPTUAL REGIONAL. Se consideran explicados los apartados referentes a límites y geometría, acuíferos, piezometría y flujo y calidad. Se detallan los apartados de Parámetros Hidráulicos, Balance Hídrico, Modelo Geológico en 3D y Plan de Gestión.

3.1. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

De acuerdo a los valores de transmisividad (T) disponibles de la base de datos del IGME (DBAguas) para el mioceno de *Ciutadella*, se ha realizado una discretización en función de las Subunidades saturadas, de tal manera que se han podido agrupar por Subunidad y se ha podido estimar valores medios para cada una. Para obtener valores de permeabilidad (k) se ha calculado el espesor del acuífero en cada punto con valor de T y se ha calculado una permeabilidad. Se ha zonificado en función de la facies saturada gracias a todos los datos obtenidos anteriormente, y se ha obtenido también un valor medio. Así, para una modelación de flujo y/o transporte se dispone de una zonificación de permeabilidades. La figura y la tabla siguientes muestran los resultados:

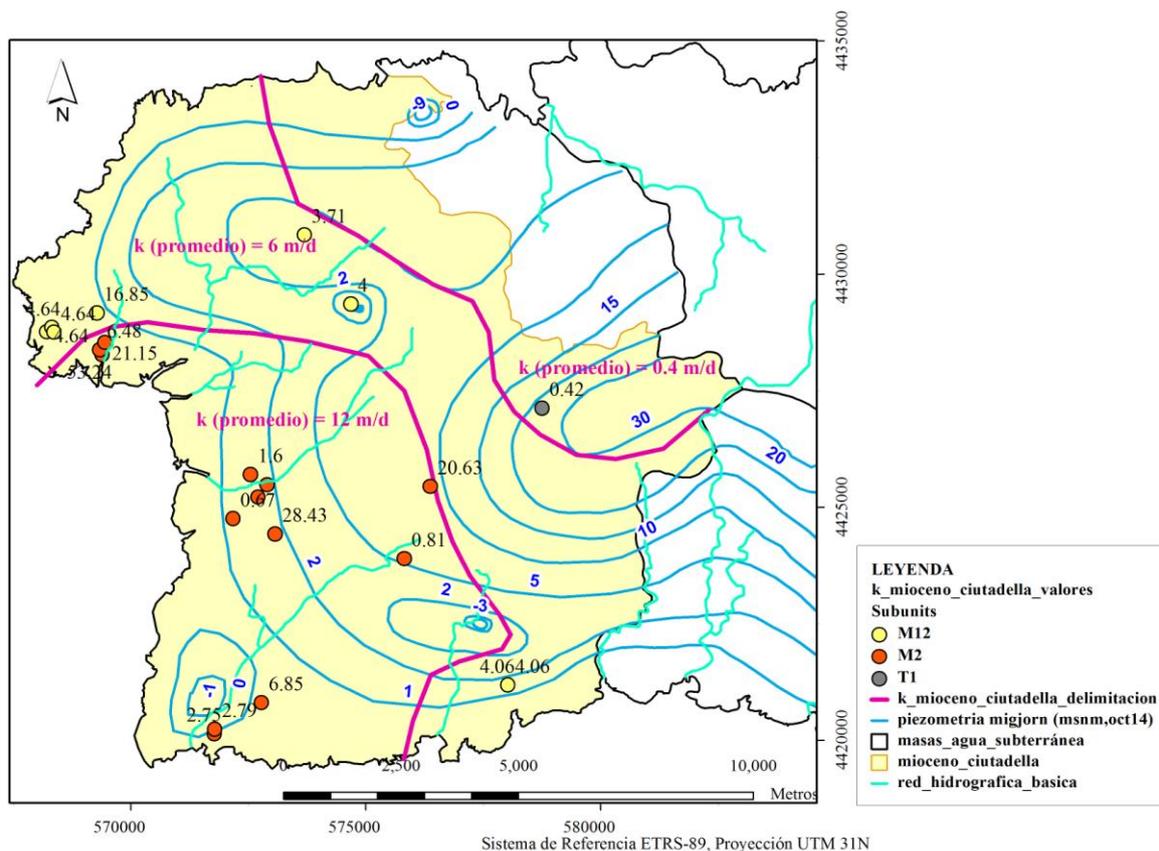


Figura 35. Valores y zonificación de permeabilidad en el mioceno de Ciutadella.

IdPoint	T m ² /d	cota_agua	cota_T1T2	cota_PM	espesor saturado (m)	k m/d	SubUnit	T m ² /d (prom.)	K m/d (prom.)
ME1007	46	6	-6.4	-	12.4	3.71	M12	287	6
ME1021	400	1.5	-97	-	98.5	4.06			
ME1022	400	1.5	-97	-	98.5	4.06			
ME0049	320	0	-80	-	80	4.00			
ME1000	140	0.2	-30	-	30.2	4.64			
ME1001	140	0.2	-30	-	30.2	4.64			
ME1002	140	0.2	-30	-	30.2	4.64			
ME1005	706	0.9	-41	-	41.9	16.85			
ME1003	2300	0.2	-43	-	43.2	53.24	M2	879	12
ME1004	280	0.2	-43	-	43.2	6.48			
ME1006	920	0.5	-43	-	43.5	21.15			
ME1011	460	0	-167	-	167	2.75			
ME1012	460	0	-165	-	165	2.79			
ME1013	250	1.6	-155	-	156.6	1.60			
ME1014	1505	1.7	-129	-	130.7	11.51			
ME1015	1042	0.2	-152	-	152.2	6.85			
ME1016	2894	1.8	-100	-	101.8	28.43			
ME1017	104	1.9	-137	-	138.9	0.75			
ME1018	1042	9.5	-41	-	50.5	20.63			
ME1019	87	1.2	-128	-	129.2	0.67			
ME1020	81	5.4	-94	-	99.4	0.81			
ME1023	58	23	-	-116	139	0.42	T1	58	0.4

Tabla 7. Valores de transmisividad (T) y conductividad hidráulica (K) estimados para las Subunidades del Mioceno de Ciutadella.

Los valores de transmisividad (T) corresponden a las interpretaciones de ensayos del IGME (BDAguas), los valores de permeabilidad (k) se han estimado a partir de los valores del espesor saturado, de acuerdo al modelo geológico 3D.

Segun el mapa se puede decir que las facies saturadas varían de una a otra en dirección SurOeste y con el orden de T1 Unidad Basal Proximal, M12 Unidad de Barras y M2 Complejo Arrecifal (zona costera). Los valores obtenidos para la permeabilidad son de 0.4, 6 y 12 m/d respectivamente y los valores de transmisividad de 58, 287 y 879 m²/d respectivamente, es decir aproximadamente 60 para la T1, 300 para la M12 y 900 para la M2, m²/d.

En cuanto al espesor del acuífero se ha planteado la necesidad de considerar la Subunidad T1 permeable como constituyente del acuífero mioceno y no como basamento junto a la Subunidad T2. En concreto para el punto ME1023, se ha calculado el espesor del acuífero entonces considerando el basamento mesozoico. El hecho de no poder descartar la Subunidad T1 como acuífero ya que se encuentra saturada, vistos los resultados de piezometría intersectados con las superficies, y dado que se dispone de datos para la superficie de la Subunidad T2 impermeable por separado de la T1, se ha obtenido por realizar un nuevo basamento para *Ciutadella*, más realista, aunque de geometría más complicada, constituido por la superficie de las Subunidades T2 y Mesozoico. La nueva superficie se muestra en el apartado 3.2.3.

3.2. BALANCE (RECARGAS-ENTRADAS, VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO, DESCARGAS-SALIDAS)

Para el balance hídrico planteado se considera que las entradas de agua al sistema se dan por infiltración de lluvia, intrusión marina y por pérdidas de redes municipales de abastecimiento y alcantarillado y que las salidas se dan por salidas al mar y por extracciones para abastecimiento, riego y otros usos.

Al no existir cursos fluviales de agua permanentes ni aportaciones de otros acuíferos no se han considerado caudales de entrada adicionales. Los retornos por riego se consideran cero dado que la estimación para las extracciones está hecha para las necesidades hídricas estrictas de cada cultivo. Los contactos con el jurásico, al Norte, y con la Masa de Agua *es Migjorn Gran*, al Este se consideran como divisorias de agua, así que no hay flujo entre ellos. La intrusión marina se ha calculado por criterio de experto. La variación de almacenamiento se considera positiva en el año 2014, fecha para la cuál se ha elegido realizar el Balance. A continuación se explica con más detalle cada parámetro considerado.

El esquema del Balance propuesto en este trabajo es el siguiente:

**ENTRADAS: INFILTRACIÓN AGUA DE LLUVIA + PÉRDIDAS EN REDES +
INTRUSIÓN SALINA**

SALIDAS: SALIDAS AL MAR + EXTRACCIONES

ENTRADAS - SALIDAS = VARIACIÓN ALMACENAMIENTO ± ERROR

RECARGA POR INFILTRACIÓN AGUA DE LLUVIA

La recarga por infiltración de la lluvia se ha estimado hasta la actualidad en la bibliografía como valor máximo de 30% de la pluviometría media anual (PHIB, 2013) para la *Masa de Agua de Ciutadella* y en general para todo *el Migjorn*. Las precipitaciones medias son del orden de los 575 mm, aunque en el año 2014 los datos de pluviometría anual son prácticamente de 700 mm. El balance del PHIB, 2013, considera un % de infiltración de la lluvia por litología existente en superficie, estimando valores estándar, como por ejemplo un 25% de infiltración de agua de lluvia sobre las calcarenitas del Mioceno. Este cálculo aporta un valor de infiltración total por lluvia para la Masa de Agua de *Ciutadella* de 21 hm³/a, considerando una pluviometría media de 575 mm.

Para la elaboración del PHIB, 2013, se dispone además de datos comparativos de recarga conseguidos a partir de diferentes métodos de cálculo de la evapotranspiración. Los resultados para *Ciutadella* fueron los siguientes:

Estación Meteorológica	RESERVA R (MM)	% INFILTRACIÓN				Promedio
		LINACRE	THORNT WAITE	RADIACIÓ	BLANEY-CRIDDLE	
Ciutadella B 860	20.00	22.80	3.52	49.21	38.55	28.52
	40.00	10.45	3.04	41.37	27.77	20.66
	50.30	7.16	9.72	38.77	24.22	19.97
	60.00	5.53	2.79	36.75	21.72	16.70

Tabla 8. Estimaciones de valores de % de Infiltración en Ciutadella.

Valores procedentes de la DGRH para la realización del PHIB, 2013, para un período de tiempo de 20 años (1991-2011).

Para el presente trabajo se ha calculado el valor de recarga a partir de los datos diarios de pluviometría y temperatura de los años 2012, 2013 y 2014, mediante la hoja de cálculo EASY_BAL_4.0, (VÁZQUEZ-SUÑÉ&CASTRO), para la estación meteorológica de *Ciutadella B860 Son Quim*. Para las características del suelo se han utilizado valores medios propuestos para el Mioceno de Menorca (VADELL, 2011). Los datos y gráficos de recarga diaria, mensual y anual pueden verse en el ANEXO 6. A continuación se muestran los valores utilizados para el suelo y los valores obtenidos de recarga:

CARACTERISTICAS DEL SUELO	
Cap. Campo (contenido volumétrico)	0.298
Humedad Inicial (contenido volumétrico)	0.298
Espesor radicular suelo (m)	0.25
Punto de Marchitez (contenido volumétrico)	0.167
Valor de laminación (mm)	150
Reserva Útil (mm)	32.75
Reserva Inicial (mm)	32.75

Tabla 9. Características del suelo de Migjorn de Menorca.

Introducidos para el cálculo de la recarga en EASY BAL. Valores medios, (VADELL, 2011), considerando el inicio del cálculo a 1 de enero de 2012 (Humedad inicial = Capacidad de Campo).

RECARGA ANUAL			
año	R (mm/año)	P (mm/año)	% infiltración
2012	242.0	537.2	45
2013	354.3	664.9	53
2014	335.2	693.3	48

Tabla 10. Valores de recarga anual según cálculo con EASY BAL.

Valores de recarga obtenidos con EASY BAL, a partir de datos diarios de P y T para los años 2012-2014.

Los valores obtenidos de recarga (de 45 a 53 %) a partir de datos diarios de P y T para éste período (*Tabla 10. Valores de recarga anual según cálculo con EASY BAL.*) superan la media

estimada hasta el momento (de un máximo del 30% de infiltración). Considerando el área de la Masa de Agua de *Ciutadella* y el área de afloramiento del mioceno, y aplicando los valores obtenidos de recarga resultan unos valores anuales de infiltración muy elevados, entre 32 y 55hm³:

INFILTRACIÓN ANUAL					
AÑO	RECARGA m ³ /m ²	ÁREA	m ²	m ³	hm ³
2012	0.242	Mioceno	134,216,365.0	32,480,360.3	32.48
2013	0.354	Mioceno	134,216,365.0	47,512,593.2	47.51
2014	0.335	Mioceno	134,216,365.0	44,962,482.3	44.96
2012	0.242	Masa de Agua	157,226,885.1	38,048,906.2	38.05
2013	0.354	Masa de Agua	157,226,885.1	55,658,317.3	55.66
2014	0.335	Masa de Agua	157,226,885.1	52,671,006.5	52.67

Tabla 11. Estimación de volumen anual infiltrado con EASY BAL.

Volumen anual infiltrado según área considerada y a partir de los valores de recarga obtenidos con EASY BAL, a partir de datos diarios de P y T para los años 2012-2014.

De acuerdo a los datos obtenidos y a la bibliografía consultada, y teniendo en cuenta el encuadre del balance hídrico se ha considerado calcular la infiltración de agua de lluvia para el año 2014 en el mioceno (exceptuando zona urbana) a partir de una recarga del 25 % de la pluviometría anual (693mm). El resultado es de 22.35 hm³/a. Para las demás litologías, que ocupan la zona fuera del dominio a modelar (mioceno) se ha obtenido una infiltración de 2.61 hm³/a, que hacen un total de 24.96 hm³/a:

1901M3 Ciutadella		ÁREA		P m ³ /m ²	INFILTRACIÓN ANUAL			
AFLORAMIENTO MATERIAL	EPOCA	total m ²	permeable m ²		%	m ³ /m ²	m ³	hm ³
Limos, arcillas y gravas	Cuaternario	4.755.549	4.755.549	0,693	0,15	0,104	494.339,3	0,49
Calcarenitas y calcisilitas con cantos	Mioceno sup. (Tort.-Mesiniense)	134.216.365	129.027.305		0,25	0,173	22.353.980,6	22,35
<i>Zonas Urbanas</i>		5.189.060	-					
Conglomerados y areniscas	Mioceno inf.-med. (Aquit.-Burdig.)	365.407	365.407		0,05	0,035	12.661,4	0,01
Dolomías y calizas	Jurásico inferior	16.398.969	16.398.969		0,18	0,125	2.045.607,3	2,05
Margas y evaporitas	Triásico (Keuper)	345.344	-		0,00	0,000	0,0	0,00
Areniscas y lutitas rojas	Triásico inf.-med. (Buntsandstein)	198.080	-		0,00	0,000	0,0	0,00
Calizas micríticas y dolomías laminadas	Triásico med.-sup. (Muschelkalk)	947.171	947.171		0,08	0,055	52.511,2	0,05
Turbiditas mixtas siliciclásticas y carbonatadas	Carbonífero	20.182	-		0,00	0,000	0,0	0,00
Total		157.226.885,13	151.494.400,97			0,71	0,49	24.959.099,79

Tabla 12. Valores de infiltración estimados a partir de la litología en superficie.

Volumen anual infiltrado según área considerada para cada litología, a partir de los valores de % de recarga estandard considerados por el PHIB, 2013, y utilizando la pluviometría del año 2014 obtenida con EASY BAL.

SALIDAS AL MAR

Para la estimación del volumen de salida al mar se ha calculado el caudal de salida en la línea de costa a partir de la expresión $Q = T \cdot i \cdot L$, siendo $Q =$ caudal [m^3/d], $T =$ transmisividad [m^2/d], $i =$ gradiente piezométrico (altura/longitud) y $L =$ longitud de costa [m], y considerando que en toda la costa existe contacto hidráulico con el mar. Los valores de gradientes (*Figura 9*) y los valores promedio de transmisividad (*Tabla 5* y *Tabla 7*) se han mostrado en apartados anteriores. Para la línea de costa se han definido tramos rectilíneos para conseguir una longitud (L) de la sección más realista.

En la zona del límite de la Masa de Agua *Ciudadella* con la de *Es Migjorn Gran*, se ha alargado el tramo de la sección (L) para el cálculo del caudal hasta dónde se ha considerado que existe divisoria de aguas, coincidiendo hasta el próximo curso fluvial al límite actual entre las dos Masas. Éste caudal realmente sería un caudal de aportación a la Masa de Agua *Es Migjorn Gran* y finalmente una salida al mar desde esa masa. Así que, para el balance hídrico no se considera como transferencia a la masa *Es Migjorn Gran* si no que se considera todo salida al mar. Lo explicado anteriormente puede justificar un cambio de límite entre ambas masas, situándolo hacia el Este, en la divisoria de aguas y que se corresponde con el próximo curso fluvial. El contacto con el jurásico, al Norte, se considera también una divisoria de aguas.

La figura siguiente muestra los valores de caudal por tramo de costa considerado, así como se muestra la piezometría, gradientes y valores medios de transmisividad utilizados. Los resultados para todo el tramo de costa del mioceno de la Masa de Agua *Ciudadella* se muestran en la *Tabla 13. Valores estimados de caudal de salida al mar* .

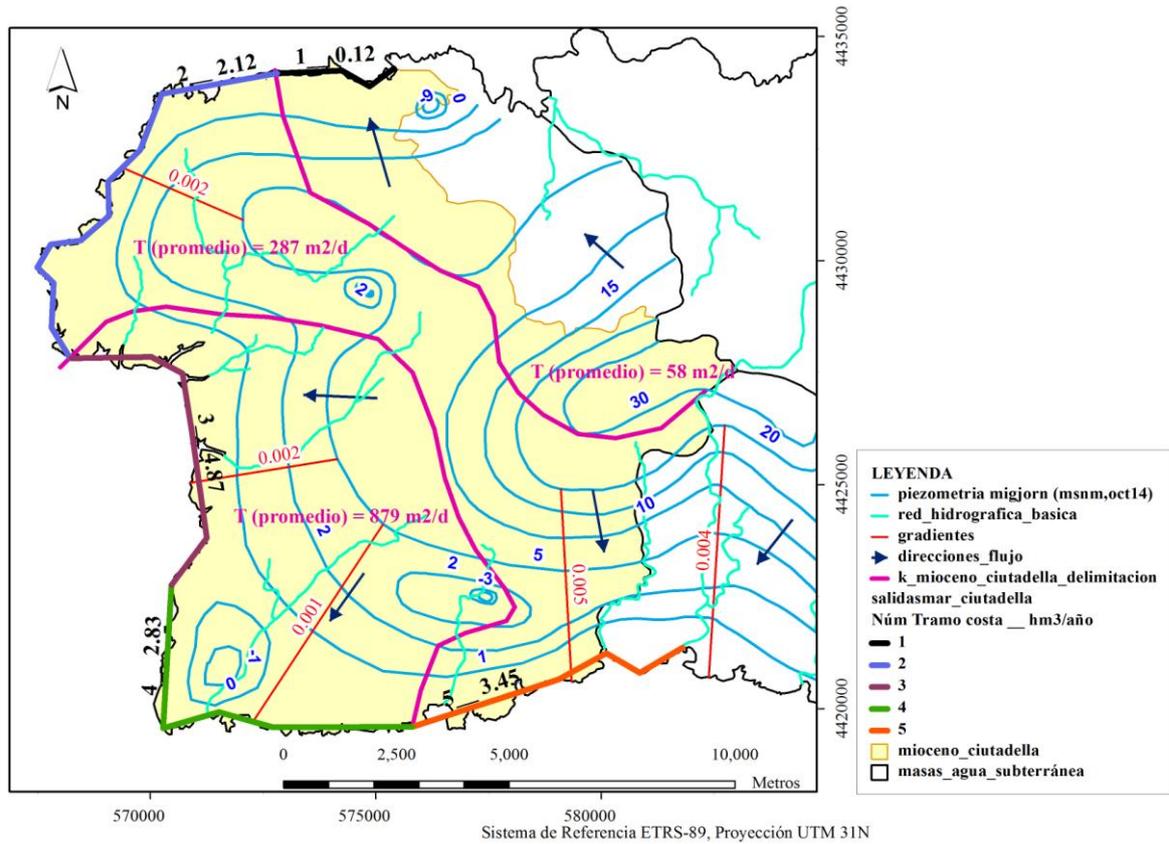


Figura 36. Salidas al mar en el mioceno de Ciutadella.

Mapa generado con la calculadora de ArcGis (*Field Calculator*) a partir de valores promedio de T, de gradiente y de longitud de costa, para una delimitación de la costa en tramos rectos y de características similares (numerados del 1 a 5).

Tramo costa (mapa)	Gradiente	T (promedio) [m ² /d]	Longitud costa (m)	Caudal [m ³ /d]	SubUnit	Caudal [hm ³ /año]
1	0.002	58	2,820.9	327.2	T1	0.12
2	0.002	287	10,095.3	5,794.7	M12	2.12
3	0.002	879	7,585.7	13,335.7	M2	4.87
4	0.001	879	8,820.3	7,753.0	M2	2.83
5	0.005	287	6,585.8	9,450.7	M12	3.45
total				36,661.3		13.38

Tabla 13. Valores estimados de caudal de salida al mar .

VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO

De acuerdo a la observación de niveles piezométricos la variación de almacenamiento en el acuífero es positiva desde al menos la última década, observándose en casi todos los piezómetros (*DB_Points*) una tendencia ascendente a partir de 2008-2009. Para el último año de datos (2014) se puede apreciar, en la zona límite con *Es Migjorn Gran*, una subida del nivel de 0.40m en el punto ME0151 (*C28 Bellaventura*) (ver el gráfico y el mapa de situación en el ANEXO 2. *RESULTADOS HYYH*), y de 0.30m en el punto ME0130 (*C18 San Juan de Missa*) en la zona SurOeste. Aplicando porosidades atribuibles a cada zona, según la (*Tabla 4*), y considerando la zona costera sin almacenamiento, se puede suponer 1/3 de la zona permeable para cada valor. Así se obtienen los siguientes valores orientativos del almacenamiento producido:

ALMACENAMIENTO		
PIEZÓMETRO	ME0151	ME0130
	Bellaventura C28	San Juan de Missa C18
VARIACIÓN NIVEL (2014) [m]	0.4	0.3
POROSIDAD	0.02	0.1
ÁREA MIOCENO [m ²]	134,216,365.1	134,216,365.1
1/2 DEL ÁREA MIOCENO [m ²]	67,108,182.5	67,108,182.5
VOLUMEN [m ³] (área mioceno)	1,073,730.9	4,026,491.0
VOLUMEN [m ³] (1/2 del área)	536,865.5	2,013,245.5
VOLUMEN [hm ³] (1/2 del área)	0.54	2.01

Tabla 14. Valores estimados de almacenamiento .

EXTRACCIONES

Las extracciones para riego, industria, ganadería, viviendas aisladas y abastecimiento proceden de los datos del PHIB (2013). Los volúmenes censados (autorizados) en la DGRH no se corresponden con los usos reales. Para cada caso se han estimado de la siguiente manera:

- ⇒ Riego, necesidades hídricas atribuibles a extracciones netas en el acuífero, calculadas a partir de dotaciones de agua para tipo de cultivo y del mediterráneo y de las superficies regadas acumuladas en 2008 y 2009 resultado de la teledetección (ver *Figura 27. Superficies regadas en 2008-2009.*).
- ⇒ Industria, censo de aguas subterráneas (DGRH).
- ⇒ Ganadería, censo agricultura.
- ⇒ Viviendas Aisladas, a partir del número de edificaciones aisladas existentes y considerando un consumo de 700m³/anuales por casa.
- ⇒ Abastecimiento, lectura de contadores de la DGRH y control de las extracciones solicitando a los gestores la información (ver *Figura 26. Extracciones para abastecimiento por Masa de Agua Subterránea.*). Se ha considerado extracción media para el período de datos.

PÉRDIDAS EN REDES

Las pérdidas en redes de abastecimiento se han considerado como el 30% del volumen suministrado (= al extraído), y las pérdidas en redes de alcantarillado se han estimado como el 20% del volumen consumido (que es igual al extraído menos las pérdidas de red de abastecimiento).

BALANCE

De acuerdo a los datos explicados anteriormente se obtiene el siguiente balance hídrico para el Mioceno de Ciutadella:

BALANCE 2014 [hm ³]	
Pérdida en redes abastecimiento	1.140
Pérdida en redes alcantarillado	0.532
Intrusión salina	1.000
Infiltración de lluvia	22.350
Total Entradas	25.02
Abastecimiento en red	3.800
Viviendas aisladas en suelo rústico	1.174
Industria	0.200
Regadío	2.215
Ganadería	0.305
Salidas al mar	13.380
Total Salidas	21.07
Almacenamiento	2.55
Error	1.40
Entradas - Salidas = Almacenamiento ± Error	
25.02 - 21.07 = + 2,55 + 1,4	

Tabla 15. Balance hídrico del Mioceno de Ciutadella para el año 2014.

3.3. MODELO GEOLÓGICO-HIDROGEOLÓGICO EN 3D DEL ACUIFERO MIOCENO DE LA MASA DE AGUA CIUTADELLA

Para detallar el modelo geológico al mioceno de Ciutadella se han realizado 8 perfiles de interpretación de las Subunidades miocenas. Se ha generado un TIN de superficie del terreno a partir de cotas de nivel, y como ya se ha descrito en el apartado (*ver apartado 2.3. MODELO GEOLÓGICO-HIDROGEOLÓGICO EN 3D DEL ACUIFERO MIOCENO*), se han generado TIN de superficies de los dos posibles basamentos (Paleozoico-Mesozoico, y T1-T2). Los Perfiles Geológicos (*Geological Profile*) se han situado estratégicamente para que fueran representativos del máximo de sondeos disponibles con información (*Borehole*). Se han exportado a 3D para la construcción de un *Fence Diagram*. A continuación se muestra la situación de los Perfiles:

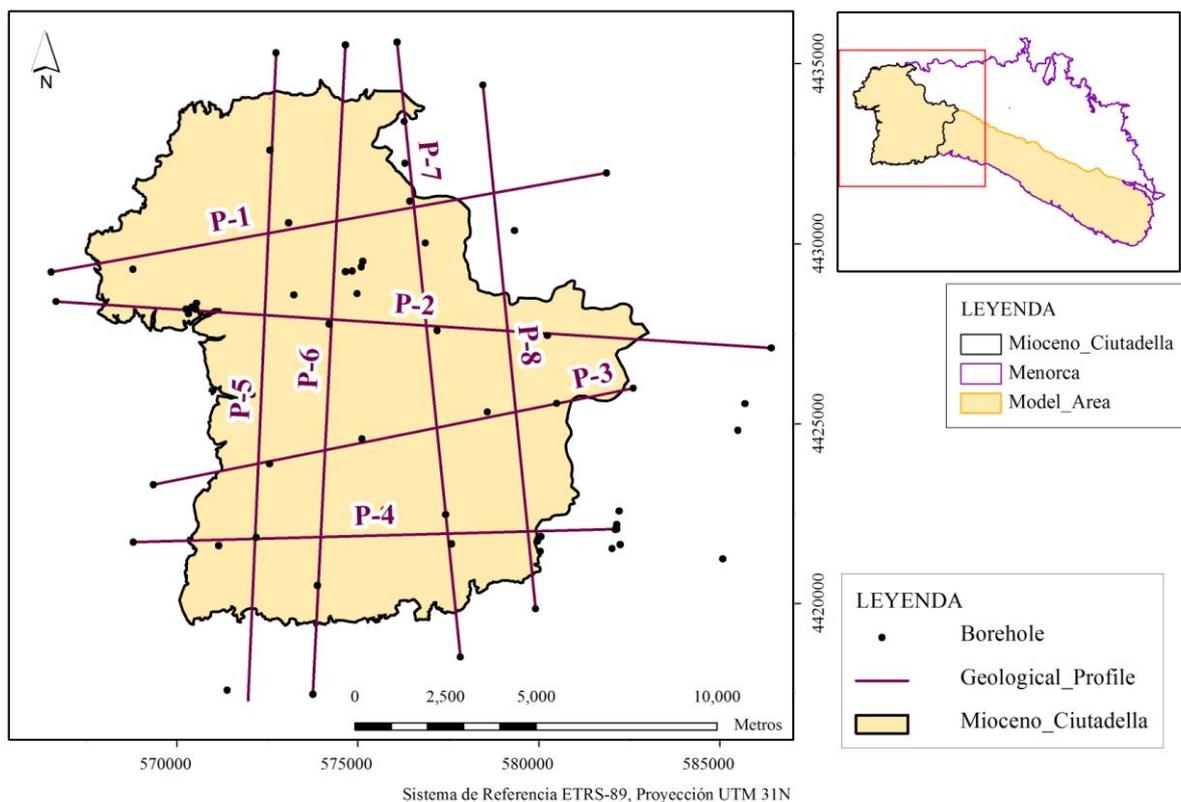


Figura 37. Situación de los Perfiles Geológicos.

En el ANEXO 5. *RESULTADOS HEROS* se recogen los 8 Perfiles realizados y una selección representativa de esquemas de los sondeos pertenecientes a Ciutadella (*Borehole Diagram*).

Para la interpretación de los cortes se ha utilizado un corte conceptual realizado por BARÓN et.al., 1983, en el que se representan las Subunidades del mioceno y el basamento Jurásico, se muestra en la *Figura 38*. Tal como se ha explicado en un apartado anterior, para la interpretación de contactos entre las Subunidades y la realización de los *Geological Profile*, se ha dado prioridad a la intersección de los TIN de superficies generadas que se proyectan en el perfil.

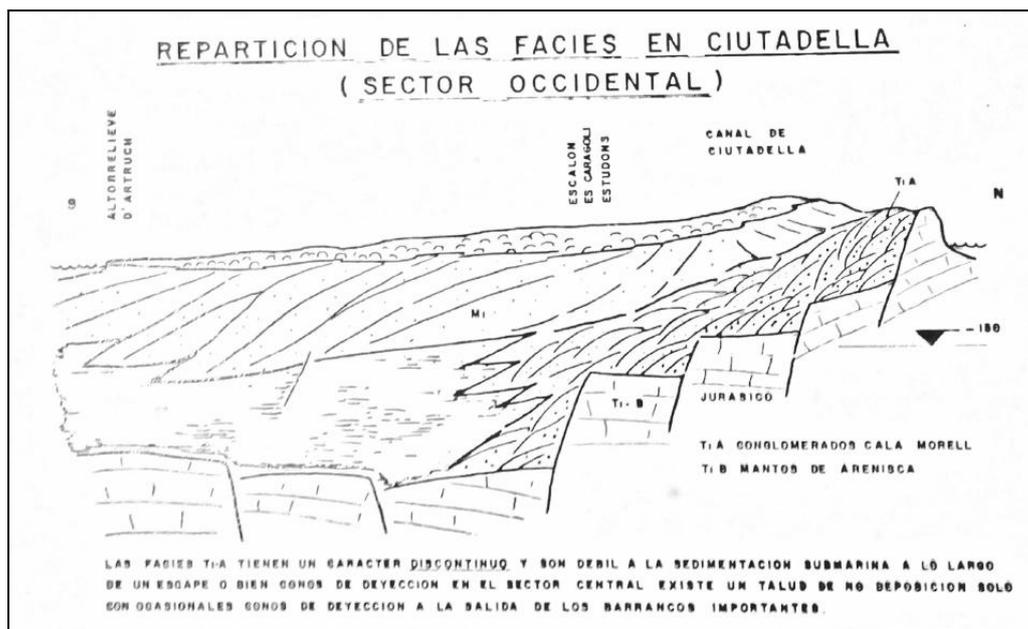


Figura 38. Corte conceptual Sur-Norte del Mioceno y Basamento Jurásico de Ciutadella.

La proyección en 3D de los perfiles (*Fence Diagram*) junto a los basamentos posibles planteados hasta el momento para una modelación del acuífero, (el Paleozoico-Mesozoico, y el T1-T2), y la superficie piezométrica se muestra en las figuras siguientes (*Figura 39* y *Figura 40*). Como se ha ido explicando ampliamente en apartados anteriores, dicha intersección ha permitido visualizar las diferentes facies saturadas en cada una de las zonas del *Migjorn*, y ha permitido la zonificación de zonas con diferentes permeabilidades.

También se ha explicado la necesidad de considerar una tercera opción para la modelación del mioceno de Ciutadella, en cuanto el cálculo de espesor de acuífero ha puesto de manifiesto que la Subunidad T1 (Unidad Basal Proximal) debía considerarse separada de la Unidad Basal Distal (T2) que es impermeable y debía ser considerada como acuífero. Aunque el valor de permeabilidad para T1 ha resultado ser bajo, de 0.4m/d.

Entonces, se ha generado una nueva superficie teniendo en cuenta la batimetría del Mesozoico-Paleozoico y sobre ella la superficie de la Subunidad T2. Viendo los perfiles (*Geological Profile*) es de esperar una batimetría caracterizada por una zona de elevación entre la costa y el centro de la cubeta miocena, mientras que la parte interior gana profundidad con la Subunidad T1. Ambas Subunidades se interpretan con cambio de una a la otra en la horizontal. La tabla siguiente muestra la relación entre Subunidades y el Modelo Geológico para el mioceno de Ciutadella:

SubUnits		3D Mioceno	3D Mioceno Ciutadella
Complejo Arrecifal Indiferenciado	M2	M2	M2
U.Inferior de Barras, Karstificada	M11	M12	M12
U.Inferior de Barras	M12		
U.Detrítica Basal, Facies proximal	T1	Basamento T1, T2	T1
U.Detrítica Basal, Cacisiltitas grises con sílex	T2		Basamento Mesozoico-T2
Lias	L	Basamento Paleozoico-Mesozoico	
Keuper			
Muschelkalk			
Buntsandstein			
Carbonífero			

Tabla 16. Relación entre Subunidades y modelo Geológico en 3D para el mioceno regional y el mioceno de Ciutadella.

En la *Figura 41* se muestra la batimetría del Paleozoico-Mesozoico junto a las cotas de la superficie de la Unidad Basal Distal T2 y una nueva batimetría a partir de las dos. En la *Figura 42* se puede apreciar la superficie TIN generada en 3D, que representa la base del acuífero (T1, M12 y M2), conformada por el Mesozoico y la Subunidad T2.

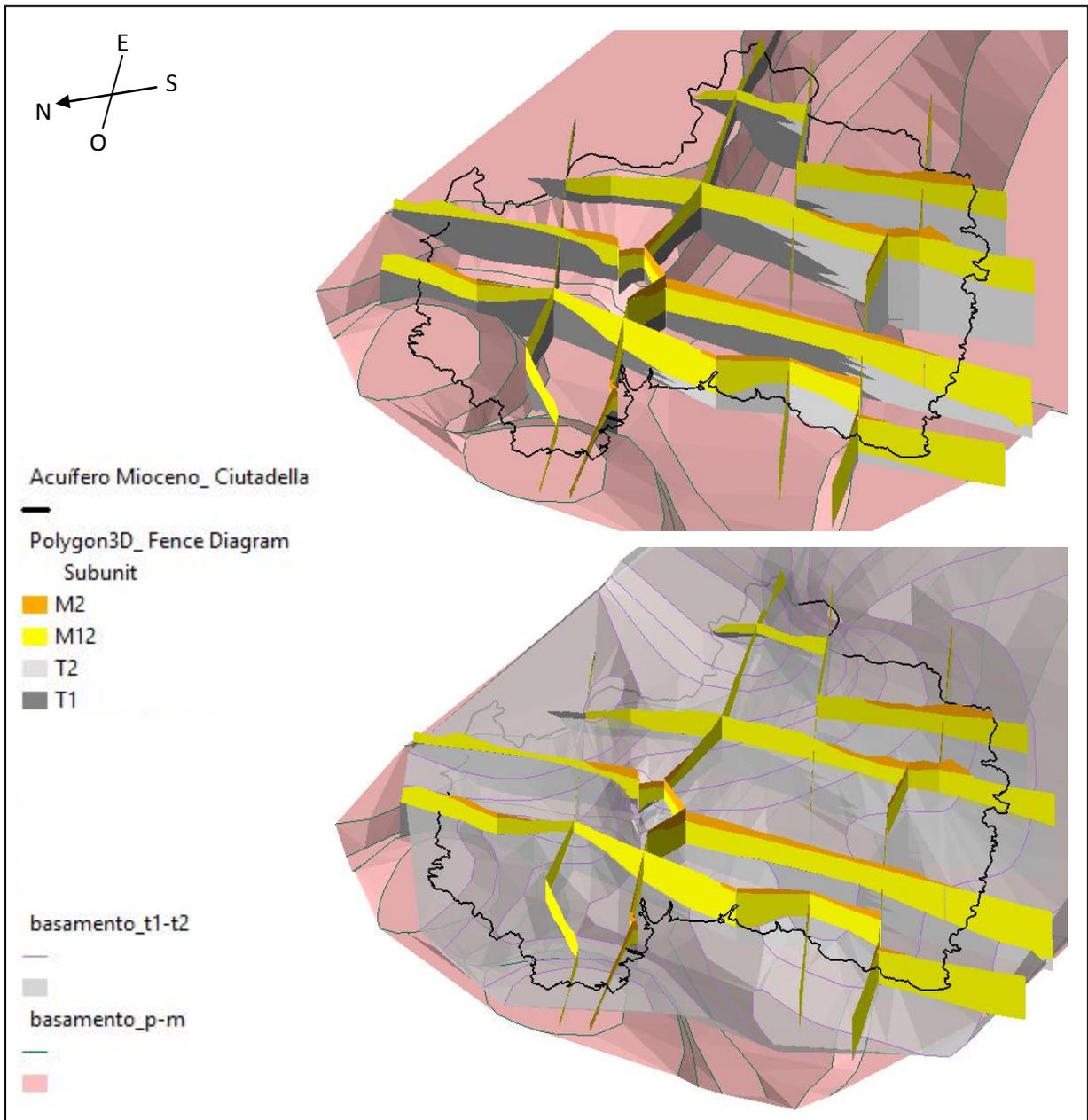


Figura 39. Vista 3D del *Fence Diagram* del mioceno de Ciutadella sobre los basamentos posibles del acuífero mioceno.

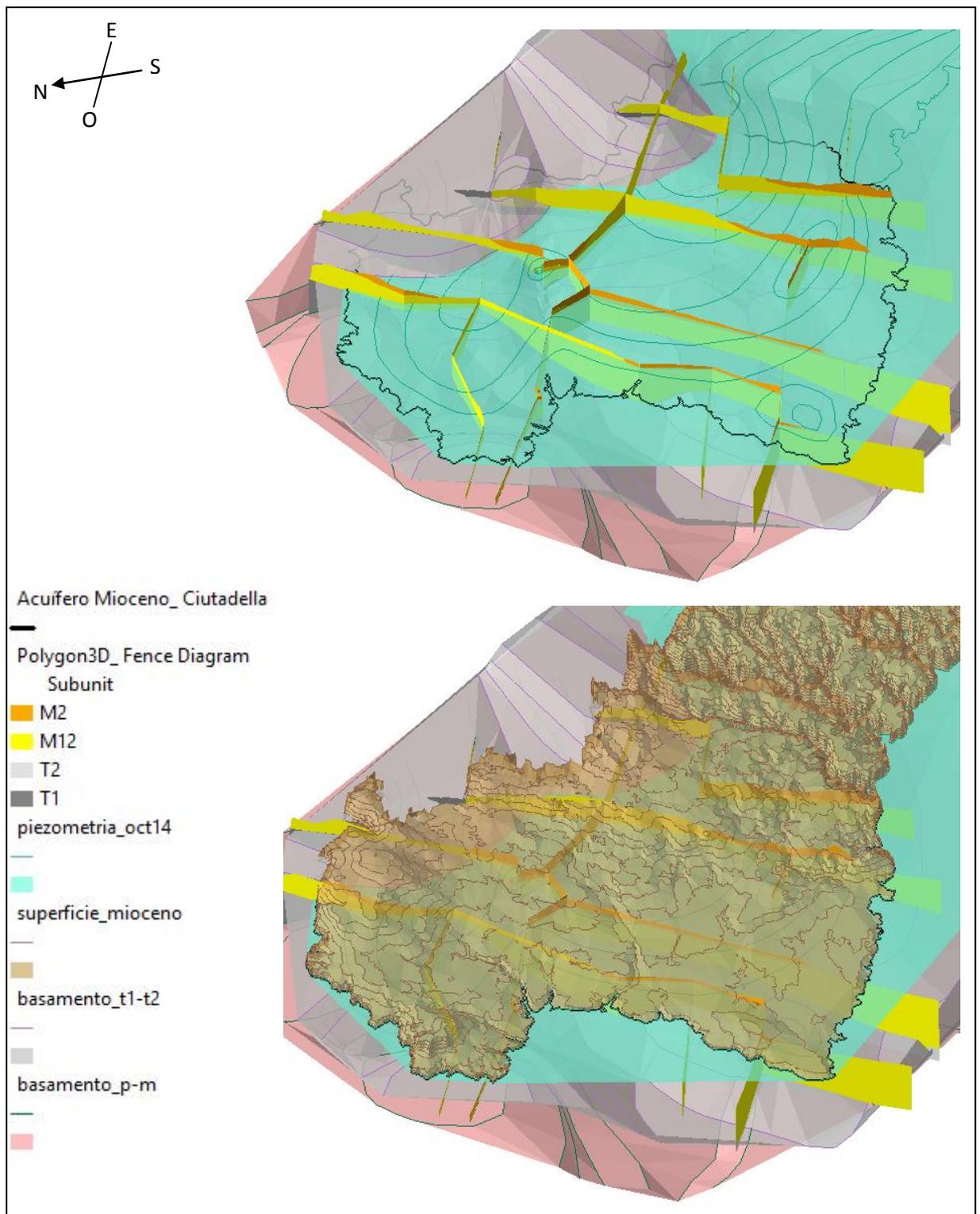


Figura 40. Vista 3D del *Fence Diagram* del mioceno de Ciutadella con piezometria, superficie topográfica y los posibles basamentos para el acuífero mioceno.

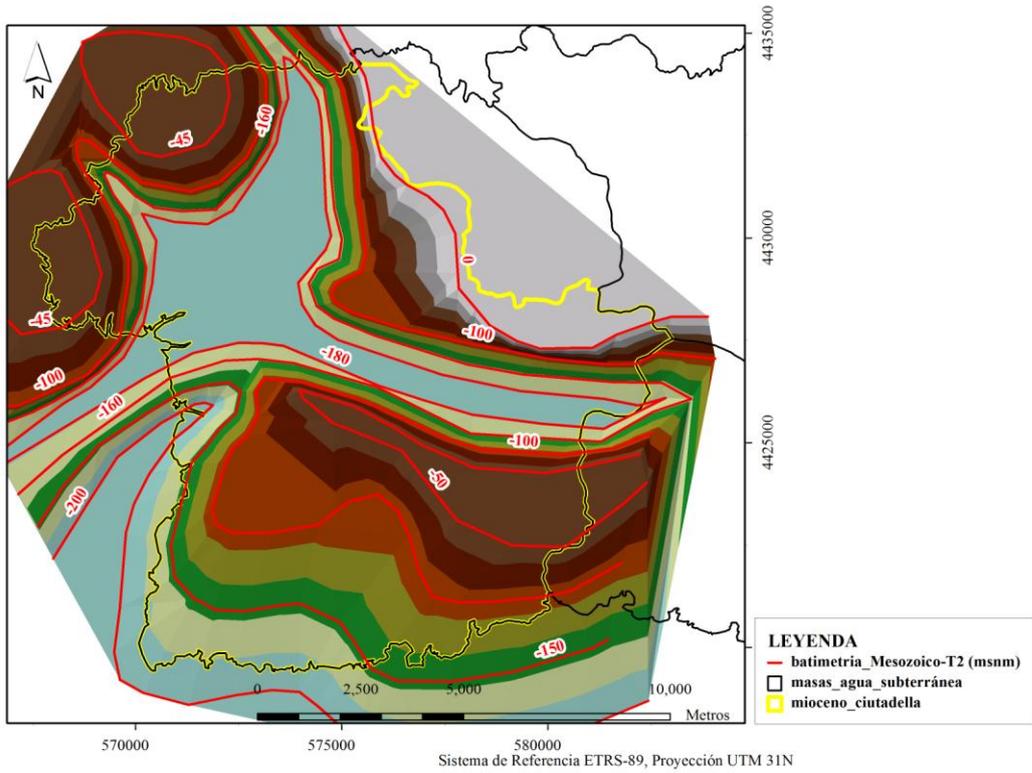
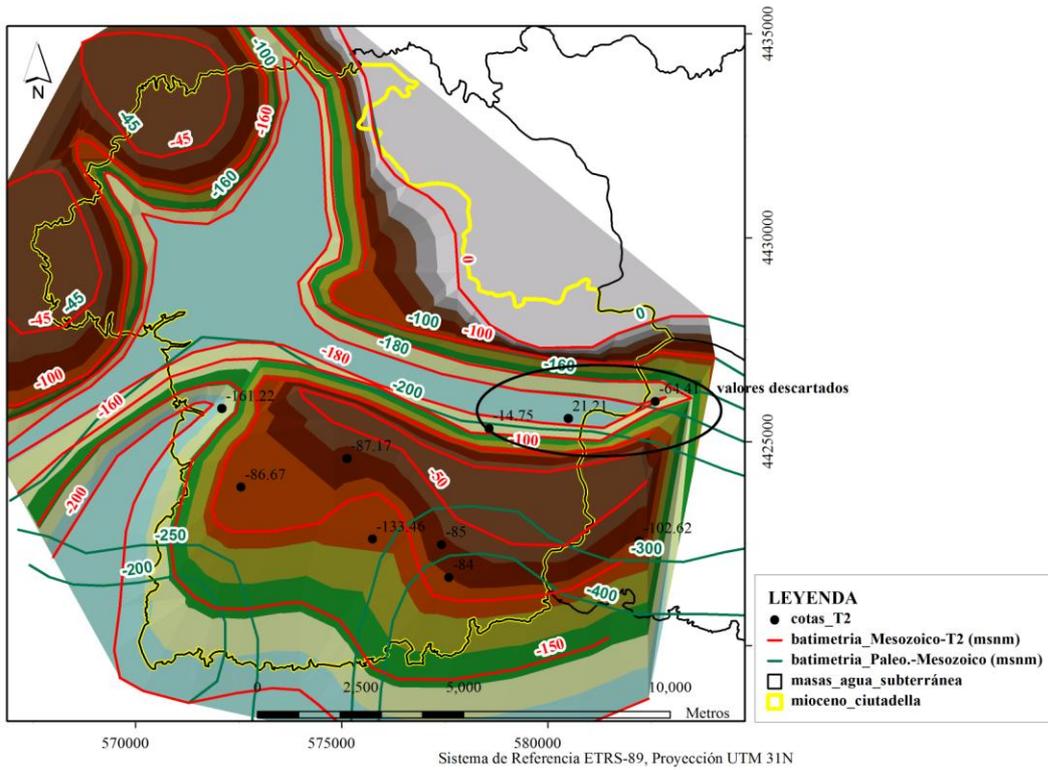


Figura 41. Cotas y Batimetria para la superficie Mesozoica y de la Unidad Basal Distal T2, en el mioceno de ciutadella.

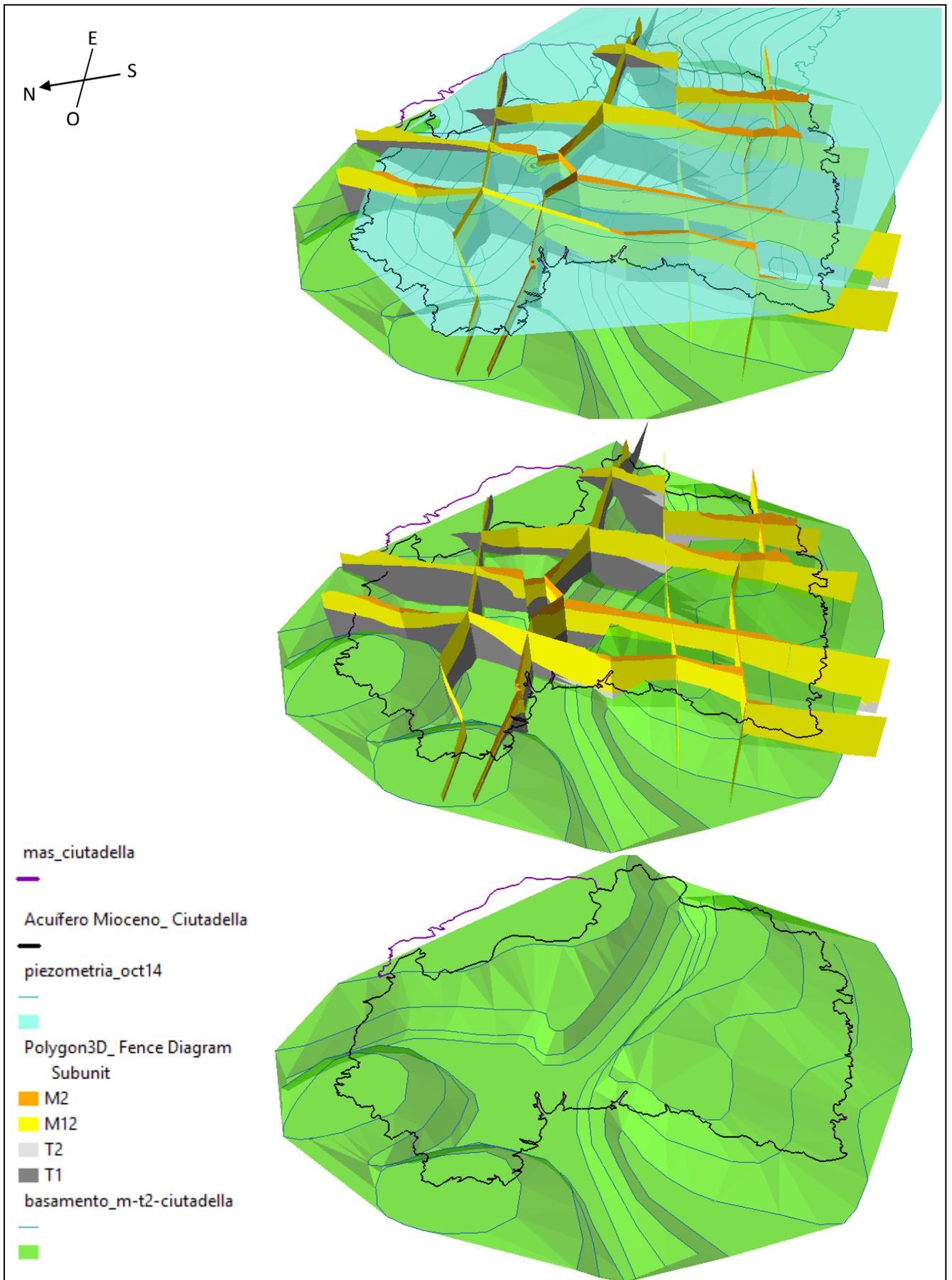


Figura 42. Vista 3D del *Fence Diagram* del mioceno de Ciutadella con piezometria, superficie topográfica y basamento Mesozoico-Unidad Basal Distal T2.

3.4. PLAN DE GESTIÓN PARA EL MIOCENO DE LA MASA DE AGUA DE CIUTADELLA

El Plan de Gestión de la Masa de Agua Subterránea de *Ciutadella* pretende ser un plan para la buena gestión de las aguas subterráneas con el objetivo de evitar su deterioro y el de promover su recuperación.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo se pueden concluir los siguientes aspectos para el Mioceno de *Ciutadella*:

El acuífero mioceno de *Ciutadella* es de carácter libre en casi todo su dominio, tiene una extensión en superficie de 134 km² y está formado por las Subunidades T1 (Unidad Basal Proximal), M12 (Unidad de Barras) y M2 (Complejo Arrecifal), de permeabilidades 0.4, 6 y 12 m/d respectivamente. De N-E a S-O se observa una gradación de zona saturada correspondiente a cada Subunidad. El espesor del acuífero en la zona N-E correspondiente a al T1 es de aproximadamente 139 m, en la zona central y siguiendo un franja SE-NO, la Unidad de Barras presenta un espesor de 30 a 40 m, aumentando a 100 m en el borde SE. Finalmente la zona SO presenta un espesor que va de los 40 m a los 150 en dirección al mar SO y se corresponde en su base a la Subunidad M12 y en el techo a la Subunidad M2.

El balance hídrico es positivo, dando valores de almacenamiento del orden de 2,5hm³ para el año 2014, aunque la calidad del agua indica salinización por intrusión marina en la zona costera y en el centro del acuífero donde se concentran las mayores extracciones (de abastecimiento, *Es Caragolí*). La cota máxima es de 5 msnm en la Subunidad M12, de 2 msnm en la Subunidad M2 (zona costera) y de 30 msnm en la zona este-centro, correspondiente a la Subunidad T1 probablemente semiconfinada o muy poco drenada por su baja permeabilidad. Destacan los conos de bombeo, especialmente el de *Es Caragolí*, que situa la cota de -20 a -40 msnm.

No se observa tendencia al descenso en la última década en contenido de cloruros, que ha llegado puntualmente a los 5,000 mg/l, tampoco en el contenido en nitratos que supera en algún momento los 200 mg/l en la zona central del acuífero y valores menores en toda la zona. Esto indica que no se están gestionando las fuentes de contaminación. En el caso de la salinización, las extracciones no gestionadas, por ejemplo con niveles deprimidos hasta los -20 a -40 msnm en *Es Caragolí* y caudales instantáneos superiores a los ideales (supuestamente). En cuanto a los nitratos, existencia de fosas sépticas no estancas, redes de alcantarillado en mal estado y explotaciones ganaderas sin gestión de los residuos.

De acuerdo a las conclusiones anteriores y teniendo en cuenta otras posibles fuentes de suministro diferentes al acuífero mioceno, se detallan las medidas básicas de gestión para garantizar una reducción de la intrusión salina en el acuífero y así mejorar su calidad y la optimización de su uso:

1) Revisión de las cotas de extracción y caudales instantáneos de bombeo en los pozos de abastecimiento situados en la zona costera y en la zona central, *Es Caragolí*, para su reordenación siguiendo los criterios de:

1.1.) Redistribución espacial de los bombeos en una franja correspondiente a las cotas más altas de la piezometría y espesor mayor del acuífero (Subunidad M12).

1.2.) Redistribución espacial de los bombeos en la vertical, evitando colocar bombas de extracción por debajo de la cota 0 msnm.

1.3.) Aumentar el número de puntos de extracción y disminuir su caudal instantáneo, es decir, repartir las extracciones y evitar concentraciones (como pasa en la actualidad).

1.4.) Reducir el volumen total anual de extracción, de media 3.8 hm³ anuales (2000-2014), a 1.8 hm³ anuales, repartido entre los nuevos puntos de captación reordenados y suponiendo que los 2 hm³ han sido reemplazados por la desalación.

2) Conectar la desaladora existente a la red de distribución municipal, y producir y suministrar 2 hm³ anuales, en sustitución de las extracciones a reducir.

3) Reducir las pérdidas en redes de abastecimiento municipales, del 30% al 15% (pasar de 1.1 a 0.57 hm³ anuales), y las pérdidas en redes de alcantarillado del 20% al 10% (pasar de 0.53 a 0.26 hm³ anuales) en un primer horizonte temporal para ir disminuyendo hasta 1%. Actualmente las pérdidas en redes se estiman en 1.67 hm³, casi la cantidad propuesta de desalación.

4) Asegurar tratamientos terciarios de las aguas residuales, ya sea en sistemas de depuración autónomos como en estaciones depuradoras municipales. Reutilizar las aguas regeneradas para la protección del acuífero frente a la salinización, mediante barreras hidráulicas como pozos de infiltración en el perímetro de costa. Reutilizar hasta 2 hm³ (al menos una tercera parte del consumo), destinando 1 hm³ para regadíos y 1 hm³ expresamente para la barrera hidráulica. Liberando de esta manera las extracciones para regadío, pasando de 2,2 a 1,2 hm³ y aportando un caudal de agua frente a la intrusión marina.

5) Revisar y actualizar parámetros hidráulicos del acuífero mediante ensayos de bombeo.

6) Realizar una cartografía de karstificación e identificar la zona de permabilidad más alta para la Subunidad M12 Unidad de Barras y reconsiderar la zonificación de permeabilidades.

7) Realizar un modelo de flujo con la superficie de basamento generada para el Mesozoico y la Unidad Basal Distal T2, para, verificar los parámetros hidráulicos estimados, el balance y la piezometría interpretada, así como para verificar que la nueva distribución de pozos de abastecimiento (punto 1) no va a suponer las depresiones actuales y que los nuevos valores de extracciones y recargas van a favorecer la calidad y cantidad del recurso disponible.

4. CONCLUSIONES

La recopilación de datos hidrogeológicos e hidroquímicos y su introducción en la Geodatabase HYDOR representa una inversión a corto y largo plazo en la gestión del recurso hídrico, por la facilitación que ello supone en cuanto a almacenaje y homogeneización de datos para su representación y visualización espacio-temporal.

Las herramientas utilizadas (HEROS10, HEROS3D, HYYH, QUIMET y Geoprocesamiento en ArcGis) han permitido valorar y gestionar los datos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos de la isla de Menorca, en detalle, trabajo hasta ahora no realizado. Por una parte han permitido elaborar un modelo conceptual regional de la isla y por la otra han permitido la realización de un modelo geológico en 3D y la obtención de los parámetros necesarios para una modelación de flujo y/o transporte, de una zona local, el acuífero mioceno de *Ciutadella*.

En definitiva se ha establecido un marco de gestión hídrica para el sistema de explotación Menorca.

Los principales procesos hidrogeológicos que se han demostrado y concluido con la utilización de las herramientas de gestión han sido:

- ⇒ Agotamiento del recurso hídrico en zonas poco permeables, por extracciones prolongadas en el tiempo para abastecimiento urbano y sin suponer intrusión salina aún habiendo conexión hidráulica con el mar, en la zona central-norte de la Masa de Agua *Es Migjorn Gran*, en la zona norte de la Masa de Agua *Maó* y en la zona norte de la Masa de Agua *Sa Roca* (ésta última sin conexión hidráulica con el mar). Con descensos sin recuperación, de entre 15 y 30 m considerando las tres zonas y un período temporal de 30 años (1984-2014), siendo la cota más baja de 15msnm.
- ⇒ Salinización de las aguas subterráneas con evolución de facies de bicarbonatadas cálcicas a cloruradas sódicas en zonas costeras con conexión hidráulica con el mar, con cotas máximas del nivel piezométrico de entre 3 a 5 msnm, con extracciones de abastecimiento muy concentradas y con bombeos a cotas negativas. En las Masas de Agua *Ciutadella*, *Maó* (al Sur), *Tirant* y *Addaia*, destacando la zona central de *Ciutadella: Es Caragolí*.
- ⇒ Contaminación difusa por nitratos en las zonas de mayor presión urbanística (Masa de Agua *Maó*) y ganadera (ambas, en Masa de Agua *Ciutadella*), con valores máximos históricos de 275 mg/l, sin tendencia alguna al descenso para el período de tiempo de 1997 a 2014.
- ⇒ Verificación de falta de gestión en cuanto a las aguas residuales, los residuos ganaderos, las pérdidas de agua en redes de distribución municipales, y las extracciones para abastecimiento, de acuerdo a los resultados de tendencias de evolución en contenido en cloruros y nitratos que no muestran descenso.

Se han concluido aspectos nuevos del modelo conceptual regional, gracias a la visualización e interpretación de datos, tales como:

- ⇒ Aportación de caudal desde la Masa de Agua *Sa Roca* a la Masa de Agua *Maó* sólo en su zona de contacto más oriental, por la suavización del gradiente de flujo observado en esa zona.
- ⇒ Diferentes respuestas a la recarga y diferentes estados de confinamiento en los materiales de la Subunidad T1 de la zona norte-centro de *Es Migjorn Gran* (lentejones de conglomerados, areniscas y arcillas).
- ⇒ Propuesta de modificación del límite entre la Masa de Agua *Ciutadella* y Masa de Agua *Es Migjorn Gran*, coincidiendo con la divisoria de aguas generada con la piezometría de octubre de 2014.
- ⇒ Cálculo de salidas al mar en la Masa de Agua *Ciutadella* a partir de valores medios de transmisividad y gradientes de flujo calculados con la piezometría de octubre de 2014, obteniendo valores menores a los bibliográficos.
- ⇒ Cálculo de variación del almacenamiento en la Masa de Agua *Ciutadella* a partir del ascenso observado en la piezometría de octubre de 2014.

Se ha caracterizado el acuífero mioceno como el más importante de la isla por su extensión, datos disponibles y usos del agua, para su modelación de flujo y/o transporte, y especialmente para el sector mioceno de la Masa de Agua *Ciutadella* se ha obtenido:

- ⇒ Varias opciones de superficie de basamento, una topográfica y una de piezometría. Finalmente se ha justificado considerar el basamento como la batimetría del Mesozoico y de la Subunidad T1 Unidad Basal Distal.
- ⇒ Espesores saturados y permeabilidades medias.
- ⇒ Direcciones de flujo y gradientes.
- ⇒ Entradas, salidas y almacenamiento en el sistema.
- ⇒ Perfiles geológicos interpretativos de las Subunidades del acuífero mioceno (T1, T2, M12 y M2).
- ⇒ Intersección de la superficie piezométrica con las superficies y los perfiles geológicos, que ha permitido realizar una zonificación de valores medios de permeabilidad en cada Subunidad saturada. Ha permitido comparar la zonificación de permeabilidad con los gradientes de flujo.

En el mioceno de Menorca se distinguen: La Unidad Basal (Proximal y Distal), La Unidad de Barras y el Complejo Arrecifal. El modelo sedimentológico distingue en el Complejo Arrecifal tres subunidades (Arrecife, Talud y Plataforma) que en el presente trabajo se

interpretan como una única subunidad (M2). El modelo hidrogeológico distingue en la Unidad de Barras una zona karstificada (M11) y la otra no (M12). En el presente trabajo se ha definido en los sondeos la Subunidad M11 pero para su interpretación en perfiles se ha descartado y se ha representado como Unidad de Barras (M12). Finalmente, la Unidad Basal, está conformada por dos Subunidades (Proximal T1 y Distal T2), que en ambos modelos y para el presente trabajo se han representado, tanto en sondeos como en perfiles.

Para la mejora de la información disponible en el acuífero mioceno de *Ciutadella* se considera necesario caracterizar la zona karstificada de la Unidad de Barras (M11) mediante métodos geofísicos y delimitación cartográfica para la modelación en 3D y afinar el valor de recarga en general para el acuífero. También se deben verificar mediante las herramientas disponibles los parámetros hidráulicos, mediante la interpretación de ensayos de bombeo representativos.

Se ha redactado un plan de gestión para garantizar el no deterioro de los recursos hídricos del mioceno de *Ciutadella*, a partir de los resultados obtenidos y aplicando criterios de gestión que pueden garantizar la disponibilidad de recursos de calidad en el futuro.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACA, AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA, CONSULTA DE DADES: http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca?_nfpb=true&_pageLabel=P3800245291211883042687, último acceso 03/03/2015.
- BARÓN, A., BAYÓ, A. y FALLAS, J.A. (1979) *Relación Modelo Geológico - Modelo Hidrogeológico. El Acuífero Mioceno de la Isla de Menorca*. II Simposio Nacional de Hidrogeología. Pamplona.
- BARÓN, A., BAYÓ, A., FAYAS, J.A. (1983). *Valor Acuífero del Modelo Sedimentario de Plataforma Carbonatada del Mioceno de la Isla de Menorca*. Menorca : 10º Congreso de Sedimentología.
- BARÓN, A. (1989). *Informe sobre el estado de las reservas de agua en Menorca*. Sección de Estudios y Planificación, Govern Balear, C. d'Obres Públiques i Ordenació del Territori. DG d'Obres Públiques. Servei Hidràulic.
- BARÓN, A., GONZÁLEZ, M.C. (1991). *Nota Técnica sobre la actualización de la geología de Menorca*. Sección de Estudios, Departamento0 Hidráulico, Dirección General de Obras Públicas, Govern Balear.
- BARÓN, A. (2006). *Descripciones geológicas de sondeos de Menorca. Libretas de Campo 1975-2006*. Direcció General de Recursos Hídrics, Govern Balear.
- BARÓN, A. *Descripciones litológicas de los sondeos revisados en Mallorca y Menorca en el año 1975*. MOPU, SHB, Servicio Hidráulico de Baleares.
- BDAguas, Instituto Geológico y Minero de España IGME <http://info.igme.es/bdaguas/>, último acceso 03/03/2015.
- BDCartografía, Instituto Geológico y Minero de España IGME <http://info.igme.es/BDCartografia/>, último acceso 01/04/2015.
- CAS, Censo de aguas subterráneas de la *Direcció General de Recursos Hídrics del Govern Balear*, http://dgrechid.caib.es/www/visualitzador_aigues_subterranies/, último acceso 03/03/2015.
- COMAS, M. (2013). *Obtenció de les dades d'extraccions d'aigua subterrània destinades a l'abastiment urbà*. Direcció General de Recursos Hídrics, Conselleria de Medi Ambient, Govern de les Illes Balears.
- CHESNAUX, R., LAMBERT, M., WALTER, J., FILLASTRE, U., HAY, M., ROULEAU, A., DAIGNEAULT, R., MOISAN, A., GERMANEAU, D. (2011). *Building a geodatabase for mapping hydrogeological features and 3D modeling of groundwater systems: Application to the Saguenay-Lac-St.-Jean region, Canada*. Computers & Geosciences.
- DCA-PAIB, Portal de l'Aigua de les Illes Balears > Informació i dades disponibles > Dades Disponibles > Dades de Consum d'Aigua <http://www.caib.es/sacmicrofront/contenido.do?mkey=M0808011112185729323&lang=CA&cont=22868> último acceso 01/04/2015.
- DMA, 2000. Directiva Marco del Agua. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.
- EPTISA, (1999). *Asistencia técnica de actualización de Bases de Datos, Cartografía Digital y Edición del Plan Hidrológico de les Illes Balears y su documentación básica. Monografía de las Unidades Hidrogeológicas. Tomo 4, Menorca, Ibiza y Formentera*. Junta d'Aigües de Balears, Direcció General de Recursos Hídrics, Conselleria de Medi Ambient, Govern de les Illes Balears.
- EPTISA, (2007). *Planificación Hidrológica de la Directiva Marco: Elaboración y Análisis de la documentación básica, fijación de objetivos medio ambientales y programa de medidas para su aplicación en el Plan Hidrológico de la Demarcación de Baleares. 2006-2007. Documentación Básica, Fichas y Mapas de*

las Masas de Agua Subterránea Demarcación de las Baleares. Conselleria de Medi Ambient, Govern de les Illes Balears.

- FAYAS, J.A. (1972). *Estudio de los Recursos Hidráulicos Totales de la Isla de Menorca, primer informe*. Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP).
- FAYAS, J.A. y BAYÓ, A. (1973). *Los Recursos Hidráulicos Totales de la Isla de Menorca*. V Coloquio de Investigaciones sobre el agua. San Sebastián.
- FAYAS, J.A. y BAYÓ, A. (1978). *Water Resources of Minorca. Evaluation, Explotation and Control*. Economic Commission for Europe. Malta.
- FORNÓS, J. (2004). *Morfologia Costanera i Processos Litorals. El paper de la fracturació i el carst*. Història Natural del Migjorn de Menorca. SHINB.
- GHS, (2014). QUIMET. *Developed in the Department of Geotechnical Engineering and Geosciences and Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA- CSIC)*. Grupo de Hidrologia Subterránea (ETCG), UPC-CSIC, Barcelona (Spain). Available at: http://www.h2ogeo.upc.es/English/software/QUIMET_ACADEMIC/index.htm
- GIMÉNEZ, J., GELABERT, B. BARÓN, A. (2004). *Hidrologia Subterrània del Migjorn*. Història Natural del Migjorn de Menorca. SHINB.
- GOGU, R., CARABIN, G., HALLET, V., PETERS, V., & DASSARGUES, A. (2001). *GIS-based hydrogeological databases and groundwater modelling*. Hydrogeology Journal, 9(6), 555–569. doi:10.1007/s10040-001-0167-3
- IDEIB, *Infraestructura de dades espacials de les Illes Balears, de la Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient i Territori del Govern Balear, SITIBSA, Servei d'Informació Territorial de les Illes Balears*. <http://www.ideib.cat/> Visualitzador de mapes: <http://ideib.caib.es/visualitzador/visor.jsp>, último acceso 03/03/2015.
- JA, JUNTA DE ANDALUCÍA:
http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem.f361184aaadba3cf8ca78ca731525ea0/?vgnnextoid=168a7c119370f210VgnVCM2000000624e50aRCRD&lr=lang_es, último acceso 03/03/2015.
- LLOMPART, C., ROSSELL, J., (2014). *El Naixement d'una Illa. Menorca. Guia Geològica Pràctica*. Institut Menorquí d'Estudis.
- MAS-PAIB, Portal de l'Aigua de les Illes Balears > Informació i dades disponibles > Dades Disponibles > Masses d'Aigua Subterrània de les Illes Balears > Fitxes detallades de les Masses d'Aigua Subterrània de Balears.pdf
<http://www.caib.es/sacmicrofront/contenido.do?mkey=M0808011112185729323&lang=CA&cont=22869> último acceso 03/03/2015.
- OBRADOR, A. (1970). *Estudio Estratigráfico y Sedimentológico de los materiales Miocénicos de la isla de Menorca*. Acta geológica Hispánica, Barcelona.
- OBRADOR, A. (1971). *Unidades morfológicas de la zona de Playa*. Aplicación a Sedimentos no recientes. Chilage, Madrid.
- OBRADOR, A., POMAR, L., (2004). *El Miocè del Migjorn*. Història Natural del Migjorn de Menorca. SHINB.
- PHIB, (2002). *Pla Hidrològic de les Illes Balears*. Aprobado mediante Real Decreto 378/2001 de 6 de abril. Publicado mediante Resolución de 28 de mayo de 2002, BOIB núm.77 de 27 de junio de 2002.
- PHIB, (2013). *Pla Hidrològic de les Illes Balears*. Aprobado mediante Real Decreto 684/2013 de 6 de setiembre, BOIB núm.180 de 28 de diciembre de 2013.

- PONS, G.X y GÓMEZ-PUJOL, L., (2003). *Introducción al medio Físico de Menorca*. Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Universitat de València.
- SGOP, (1991). Servicio Geológico de Obras Públicas. Sondeos de reconocimiento realizados en Baleares. Descripciones Geológicas de Sondeos en Menorca, Tomo II.
- VADELL, J. (2011). Cartografía Hidrològica de Sòls de les Illes Balears, Menorca,. UIB, Universitat de les Illes Balears.
- VELASCO, V., TUBAU, I., VÁZQUEZ-SUÑÈ, E., GOGU, R., GAITANARU, D., ALCARAZ, M., SERRANO-JUAN, A., FERNÁNDEZ-GARCIA, D., GARRIDO, T., FRAILE, J., SANCHEZ-VILA, X., (2014). *GIS-based hydrogeochemical analysis tools (QUIMET)*. Computers & Geosciences. Volume 70, September 2014, Pages 164-180
- VELASCO, V., GOGU, R., VÁZQUEZ-SUÑÈ, E., GARRIGA, A. RAMOS, E., RIERA, J. ALCARAZ, M., (2012). *The use of GIS-based 3D geological tools to improve hydrogeological models of sedimentary media in an urban environment*. Environmental Earth Sciences. doi: 10.1007/s12665-012-1898-2.
- VELASCO, V., CABELLO, P., VÁZQUEZ-SUÑÈ, E., LÓPEZ-BLANCO, M., RAMOS E., TUBAU, I. A *sequence stratigraphic based geological model for constraining hydrogeological modeling in the urbanized area of the Quaternary. Besòs delta (NW Mediterranean coast, Spain)*.
- XCAS-PAIB, Portal de l'Aigua de les Illes Balears > Informació i dades disponibles > Dades Disponibles > Xarxa de control de les Aigües Subterrànies 2015 <http://www.caib.es/sacmicrofront/contenido.do?mkey=M080801112185729323&lang=CA&cont=38141> último acceso 03/03/2015.

ANEXOS

ANEXO 1. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA

En este Anexo se describe la geología a más detalle que en el apartado 2.1.1. *CONTEXTO GEOLÓGICO*, para cada una de las antiguas unidades hidrogeológicas de la isla de Menorca, haciendo referencia a ellas como zonas y con el mismo nombre: **Zona de Migjorn, zona de Albaida y zona de Fornells**. Para este trabajo se han utilizado las descripciones geológicas del Plan Hidrológico de les Illes Balears (PHIB, 2002), dado su enfoque hidrogeológico, y se han consultado otras de interés

ZONA DE MIGJORN

La zona de *Migjorn* está formada por materiales del Mioceno, poco alterados por la tectónica, configurando una plataforma de relieve tabular con una ligera inclinación hacia el S. El zócalo está formado por materiales mesozoicos, que afloran en algunos puntos de la costa y en el sector de Algaiarens, por esquistos paleozoicos o areniscas y pelitas del Buntsandstein, y se encuentra a profundidades variables, máxima de 200m.

La serie estratigráfica es la siguiente:

JURÁSICO

Constituye el zócalo de la plataforma miocena y aflora en el sector costero NO (*Punta Nati, Punta Ombria*) y en el sector de *Curniola, Son Planes* y *S'Almudaina*. Estos afloramientos jurásicos anteriormente constituían una Unidad Hidrogeológica propia denominada Unidad *Algaiarens*. El Jurásico está compuesto por un nivel inferior margoso (Infralias), y sobre éste dolomías grises masivas, dolomías con estromatolitos, calizas y calizas dolomíticas, margas azuladas y a techo calizas y calizas encriníticas. La serie puede alcanzar una potencia de 450m.

MIOCENO

Ocupa el extremo occidental y toda la plataforma meridional de la isla. El Terciario se ha interpretado por los distintos autores como la progradación de un arrecife franjeante sobre una plataforma calcarenítica formada por barras, que a su vez se dispone sobre una barra basal detrítica. A continuación se describen las distintas facies, teniendo en cuenta la nomenclatura del Servicio Geológico (*BARÓN&GONZÁLEZ, 1991*):

La descripción de las distintas Unidades litosedimentarias es la siguiente:

Unidad Basal

Está constituida por dos tipos de facies: proximal o inferior, de potencia no superior a los 100 m, formada por conglomerados, areniscas de grano grueso a fino y colores rojizos o grises (T1). La formación distal o superior (T2) está formada por limolitas calcáreas gris azuladas y negruzcas con espesores que pueden sobrepasar los 200 m. No aflora en superficie; la facies T1 presenta importantes afloramientos en Cala Morell; es de edad pretortonense.

M1

Constituida por calcarenitas y calcisiltitas con algún canto de tamaño grava o gravilla y matriz limosa. Su espesor aumenta al O y SO alcanzando 200 m al S de Ciutadella. Localmente presenta una cementación y carstificación importante.

M2

Formada por tres tramos, difíciles de distinguir la mayoría de las veces:

Nivel bioconstruido, compuesto por biocalcarenitas con mucho cemento calcáreo, o por biolititas coralinas. Corresponde a facies de bioconstrucción arrecifal y presenta una importante carstificación, y un espesor entre 10 y 50 m.

Nivel de talud arrecifal, presenta un apreciable buzamiento, y está formado por biocalcarenitas con restos de corales y algas.

Nivel de plataforma carbonatada, formada por biocalcarenitas subhorizontales con rodolitos, briozoos y abundantes Heterostegina. En los bordes existe una discontinuidad bien marcada con la Unidad M1 con una lumaquela de Heterostegina.

Las unidades M1 y M2 son de edad Tortoniense-Messiniense.

P1

Biocalcarenitas con megaláminas métricas a decamétricas y abundantes restos de rodofíceas y macrofauna. Afloran sobretodo en el sector SE de la isla. A la Unidad P1 se le atribuye una edad Plioceno superior.

Cuaternario

Para la descripción de los materiales cuaternarios se ha recurrido a la realizada para la memoria del mapa geológico del Proyecto Magna (ROSSELL et al., 1989). Dicho equipo atribuye al Cuaternario cinco facies distintas, cuya descripción es la siguiente:

Las cinco facies están constituidas por calcarenitas eólicas, bioclásticas, con distintos grados de cementación, masivas o con laminación, y con edades que abarcan desde el techo del Plioceno superior, hasta el Cuaternario reciente. Estas cinco facies, denominadas en orden cronológico reciente D5, D4, D3, D2 y D1, corresponderían a la Unidad P2 del Servicio Geológico.

ROSSELL et al. distinguen además del complejo de eolianitas otros materiales cuaternarios: las arenas de playa actuales, limos aluviales y coluviales, los cuales rellenan fondos de valle planos, o asociados a la carstificación de los materiales miocenos ("terra rossa"). El Servicio Geológico distingue la facies Q2, que corresponde a limos negros con ostreidos y restos vegetales, y que se halla en en las zonas húmedas desarrolladas en las desembocaduras de los barrancos.

Calcarenitas eólicas y bioclásticas, y limos aluviales y coluviales.

ZONA DE ALBAIDA

La zona de *Albaida* está compuesta por materiales triásicos carbonatados, de facies *Muschelkalk*, y por materiales calizos y dolomíticos jurásicos. El conjunto puede estar localmente despegado a favor de los tramos lutíticos del *Buntsandstein*, lo cual produce la laminación de las calizas triásicas.

La serie estratigráfica es la siguiente:

Triásico

Facies Muschelkalk, constituida por dos barras carbonatadas, superior e inferior, separadas por un nivel terrígeno intermedio. La inferior está mucho menos desarrollada que la superior. Los materiales son:

- Calizas micríticas grises, algo dolomitizadas, bioturbadas y con laminación algal.
- Calizas micríticas grises estratificadas;
- Dolomías masivas grises;
- Dolomías pardas estratificadas.

Facies Keuper-Rethiense, margas y arcillas versicolores, con evaporitas. A techo se disponen las margas grises y amarillentas de la base del Jurásico.

Jurásico

Dolomías brechoides grises en la base; sobre ellas, calizas micríticas y dolomías microcristalinas a techo.

ZONA DE FORNELLS

Los materiales que constituyen la zona de *Fornells* son mayoritariamente del Paleozoico y Mesozoico, recubiertos por materiales cuaternarios en los valles.

La serie estratigráfica del Paleozoico es la siguiente:

Devónico

Constituye la base de la serie paleozoica. está formado por una potente serie turbidítica, dispuesta sobre unas pizarras negras con Graptolites. Esta serie turbidítica, que presenta capas de caliza intercaladas, se halla intensamente plegada y presenta niveles deslizados ("slumps") y resedimentados. Aflora extensamente, desde el sur de las penínsulas de *Fornells* y *Cavalleria* hasta el S de Mercadal, y su máximo desarrollo lo alcanza en *Cala Tirant*.

Carbonífero

Constituido por turbiditas de facies Culm. Se trata de turbiditas mixtas, siliciclásticas y carbonáticas. Aflora en la zona de Son Ermità- Santa Rita y el afloramiento es solapado por el Mioceno discordante en Ses Fonts Redones, en las proximidades de Es Migjorn Gran.

Estos afloramientos carboníferos se diferencian por su grado de tectonización y en parte por su litología de los afloramientos de la zona oriental de la Unidad (*Favàritx- Maó*).

La serie está compuesta por capas de calizas micríticas negruzcas, dolomitizadas, alternantes con areniscas gruesas y finas. En el sector oriental también se hallan facies microconglomeráticas, siendo escasas las capas de caliza.

En el sector Binimel.là- Santa Margarida aflora un complejo olistostrómico, asociado al cabalgamiento del Devónico sobre el Carbonífero. Está formado por niveles deslizados (pliegues sinsedimentarios), y compuesto por los siguientes materiales:

- Nivel de conglomerados poco cementados (colada fangosa);
- Nivel de radiolaritas, calizas y pizarras rojizas;
- Rocas volcánicas y cuarzoqueratófidos.

Pérmico

Los materiales del Pérmico ocupan las zonas topográficamente más bajas. Son de composición pelítica predominante, y colores rojo- violáceos. Están configurados en dos tramos, uno inferior, de conglomerados basales y pelitas, con intercalaciones de areniscas finas, y uno superior, formada por una alternancia de areniscas y pelitas, siendo más abundantes las areniscas en el sector de Monte Toro, y más las pelitas en el sector central (Cala del Pilar).

El Mesozoico está compuesto por materiales triásicos de facies germánica, Buntsandstein, la serie carbonatada del Jurásico, dolomitizada, y discordante sobre esta última la serie carbonatada del Cretácico inferior.

Triásico

La base del Triásico se sitúa en un potente nivel conglomerático de facies aluvial, que contrasta con las facies fluviales de la sedimentación pérmica; estos conglomerados, de cantos de cuarzo blancos, y en menor proporción, negros (lilitas), fosilizan en discordancia una superficie de erosión modelada sobre el techo del Pérmico.

Buntsandstein

Esta facies, de sedimentación fluvial y color rojo vinoso, está distribuida en dos niveles: uno inferior arenoso, y otro superior pelítico- arenoso, menos potente. Las facies Buntsandstein afloran predominantemente en la parte occidental de la Unidad, desde la Punta de Algaiarens hasta el Monte Toro; forman además el límite con la Unidad Albaida, en el sector más oriental de la Unidad Fornells.

-Nivel inferior: formado por una serie monótona de areniscas de granulometría mediana, con raras intercalaciones pelíticas o conglomeráticas; su contacto basal, con el Pérmico, es erosional; el contacto con el tramo superior pelítico es transicional.

Las areniscas se disponen en barras de base plana, o en cuerpos acanalados, de base erosiva y techo plano; la laminación está poco preservada.

-Nivel superior: está formado esencialmente por pelitas, en las que se intercalan niveles canaliformes de areniscas de grano medio, y capas de areniscas de granulometría fina a muy fina.

Jurásico

En la Unidad Fornells aflora principalmente en las penínsulas de Cavalleria y Fornells, y la serie, de muro a techo, es la siguiente:

-Nivel inferior, margoso, que constituye la base del Jurásico;

-Nivel de dolomías masivas, compuesto por dolomías grises, de grano medio, estratificadas en bancos potentes con juntas de estratificación margosas. Se encuentran intensamente dolomitizadas.

-Nivel de dolomías con estromatolitos,

-Nivel de calizas y calizas dolomíticas, compuesto por calizas micríticas y oolíticas, a veces bioclásticas, localmente afectadas por dolomitización secundaria; cuando se hallan preservadas, se pueden distinguir los ciclos de sedimentación que las han originado, con estructuras típicas de ambiente intramareal.

-Nivel de margas azuladas,

-Nivel de calizas dolomíticas y calizas encriníticas.

Cretácico

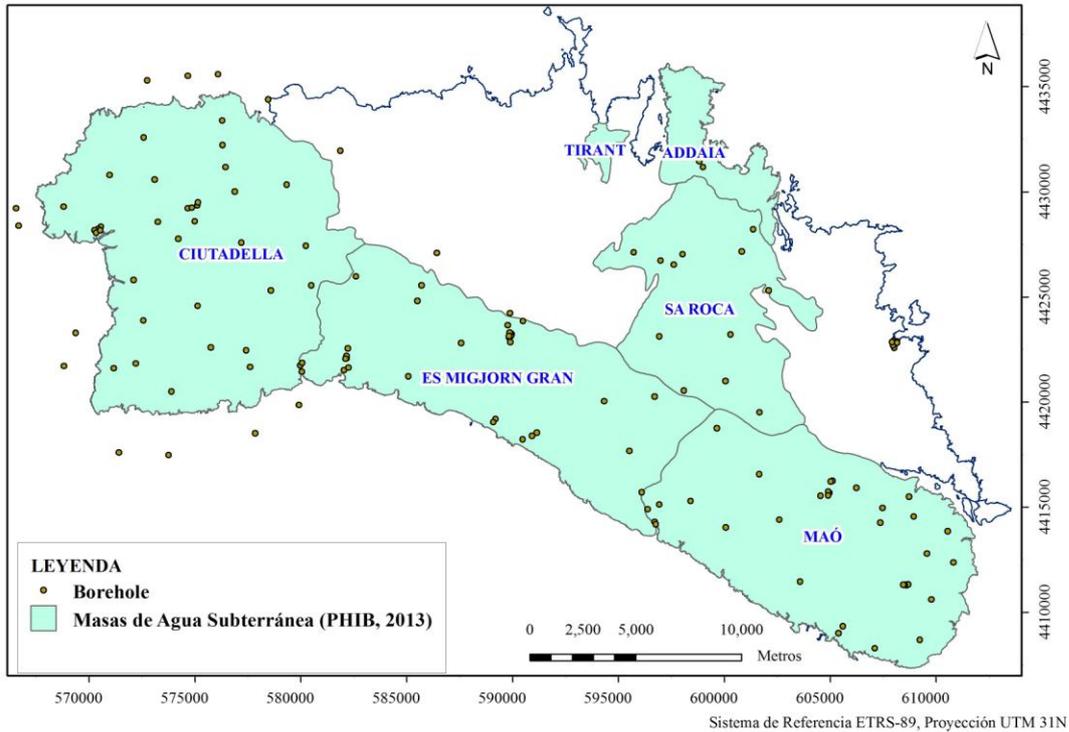
Unicamente afloran los materiales del Cretácico inferior, en el extremo oriental de la Península de Fornells, y en Son Saura, y están formados por calizas micríticas u oolíticas, con niveles intercalados poco potentes de margas.

Cuaternario

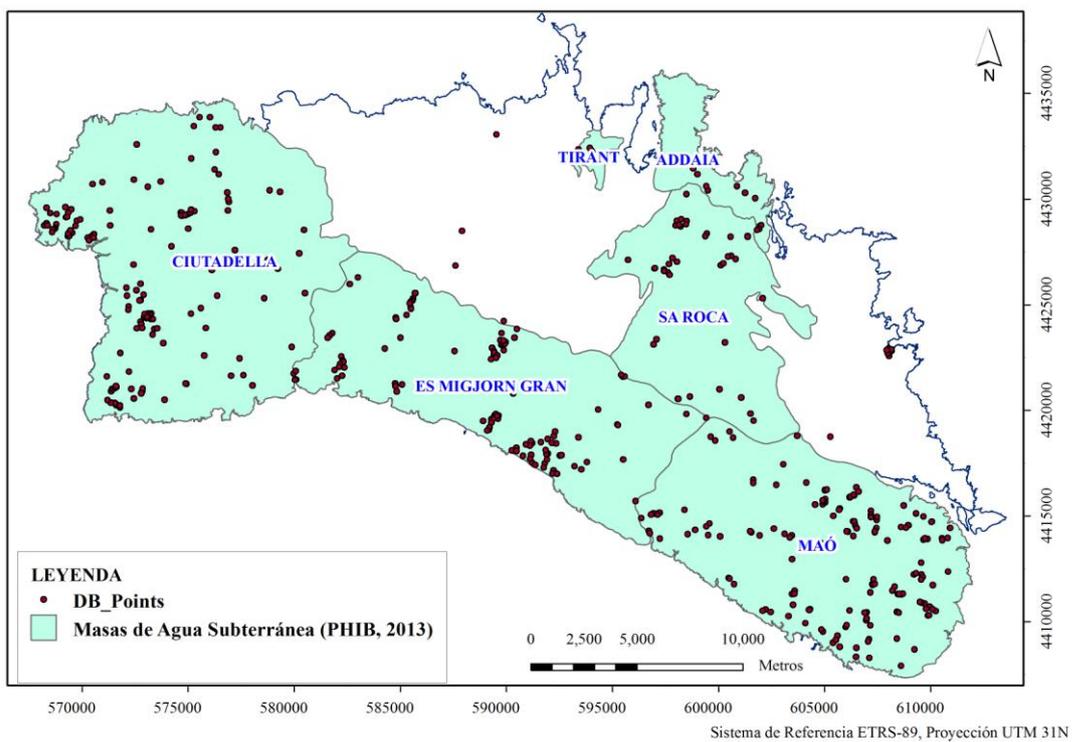
Formado por depósitos aluviales y eólicos (arenas, gravas y arcillas), que se depositan en fondos de valle (Cala Tirant, y entre Cala Calderer y Cala Ferragut).

ANEXO 2. MAPAS DE SITUACIÓN DE SONDEOS (BOREHOLE) Y PUNTOS DE CONTROL (DB_POINTS)

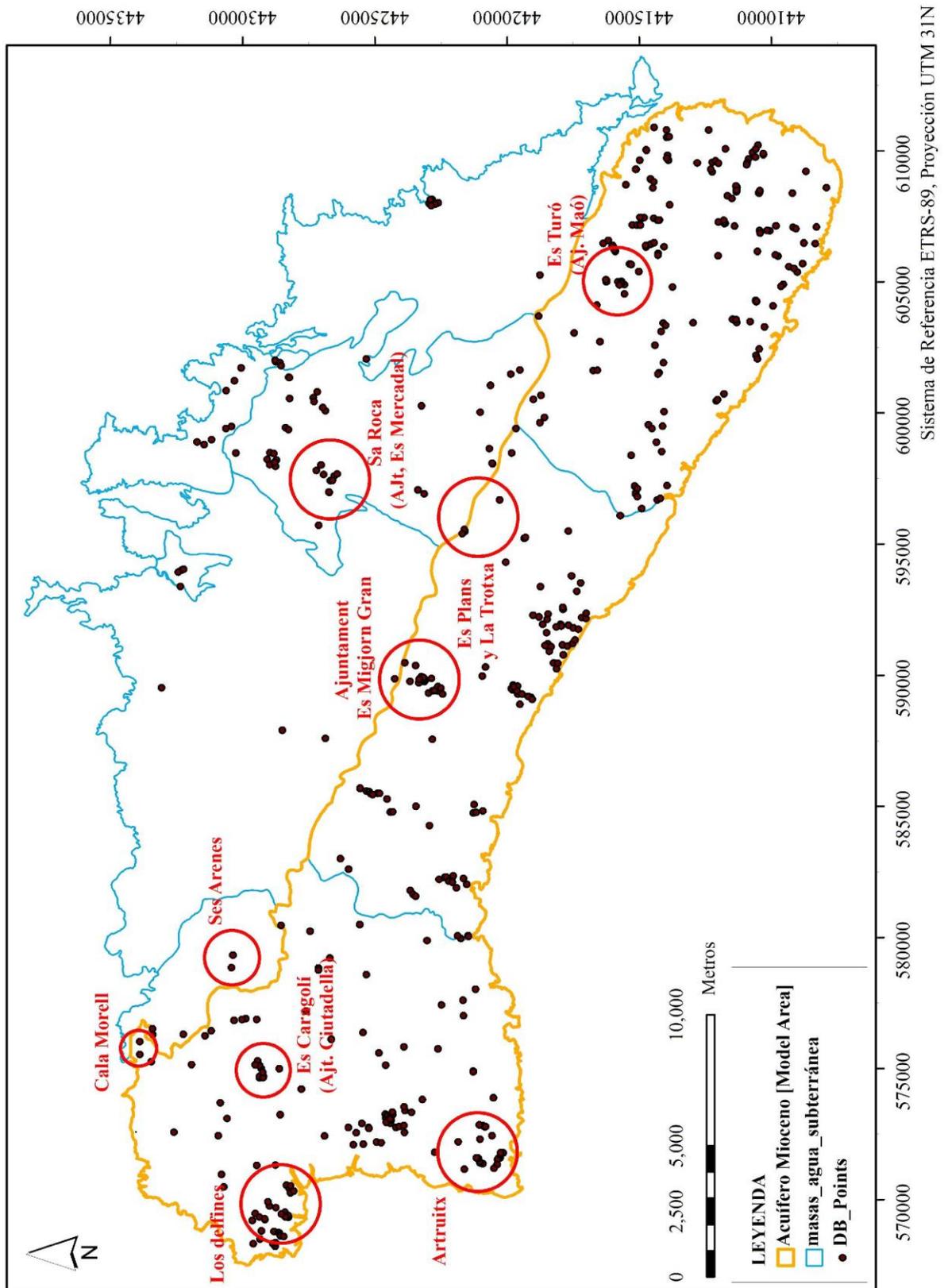
Menorca, Borehole (Sondeos Geológicos):



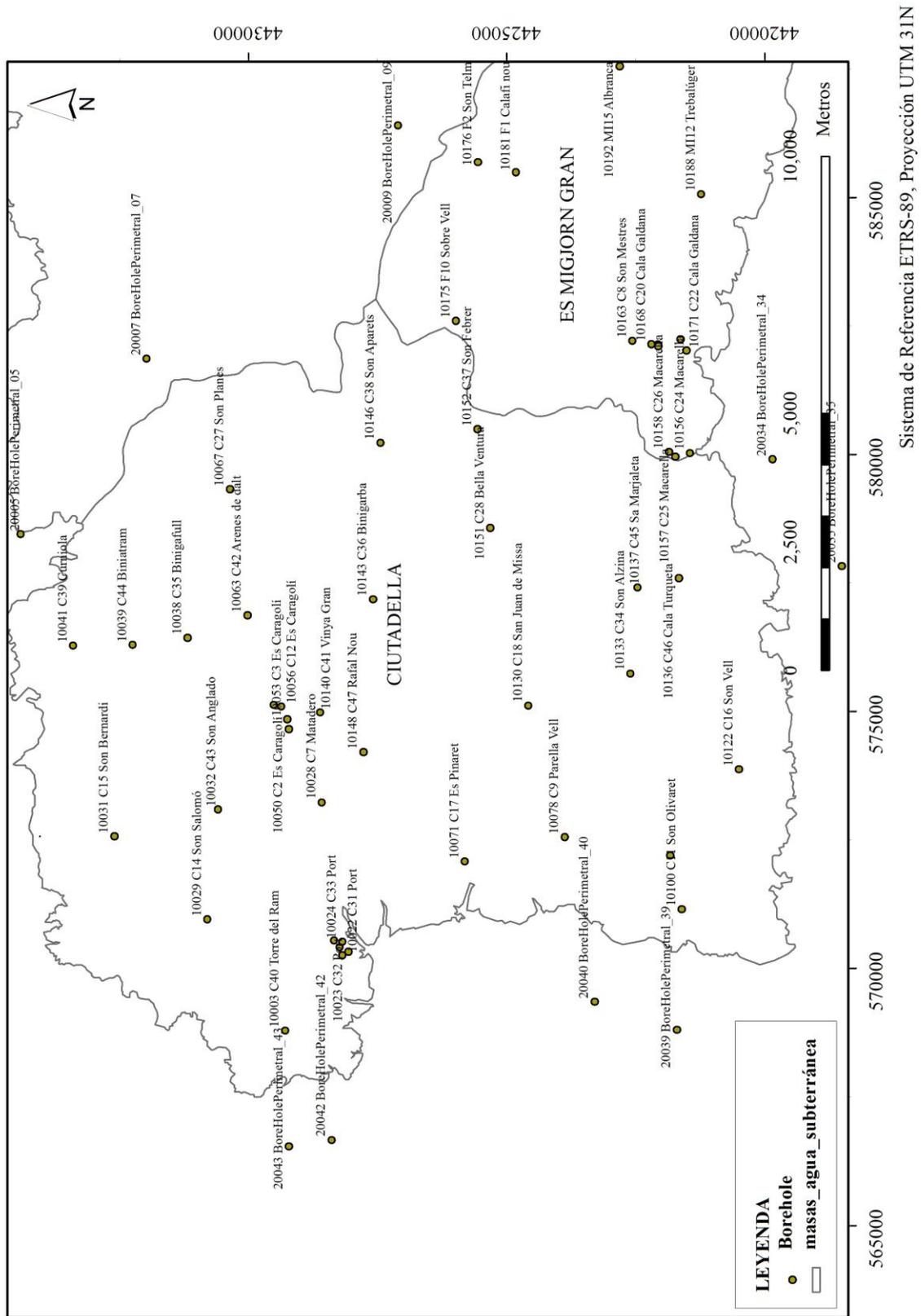
Menorca, DB Point (Puntos de Control, Hidroquímica, Hidrogeología):



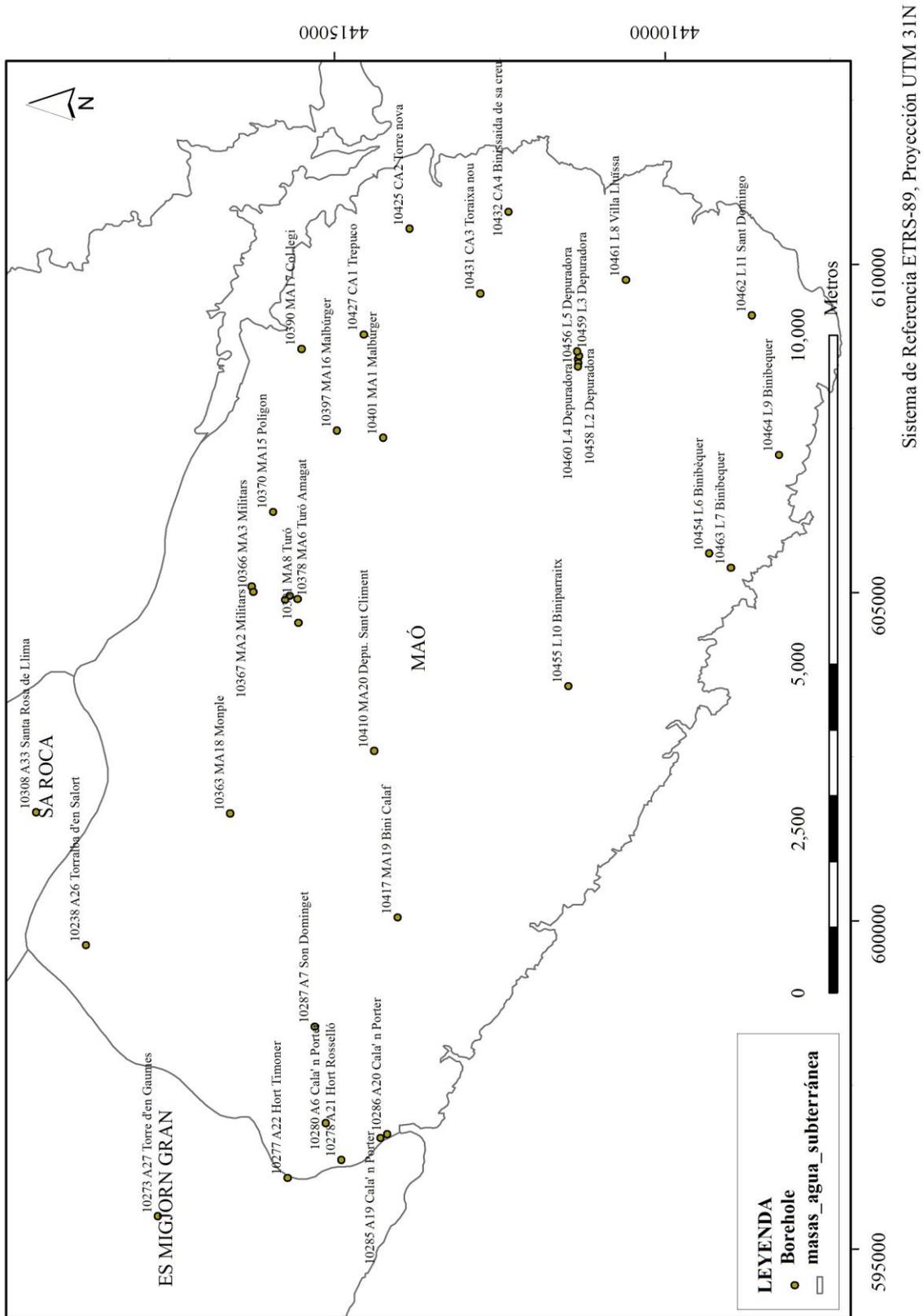
Menorca, DB Point (Zonas Descripciones):



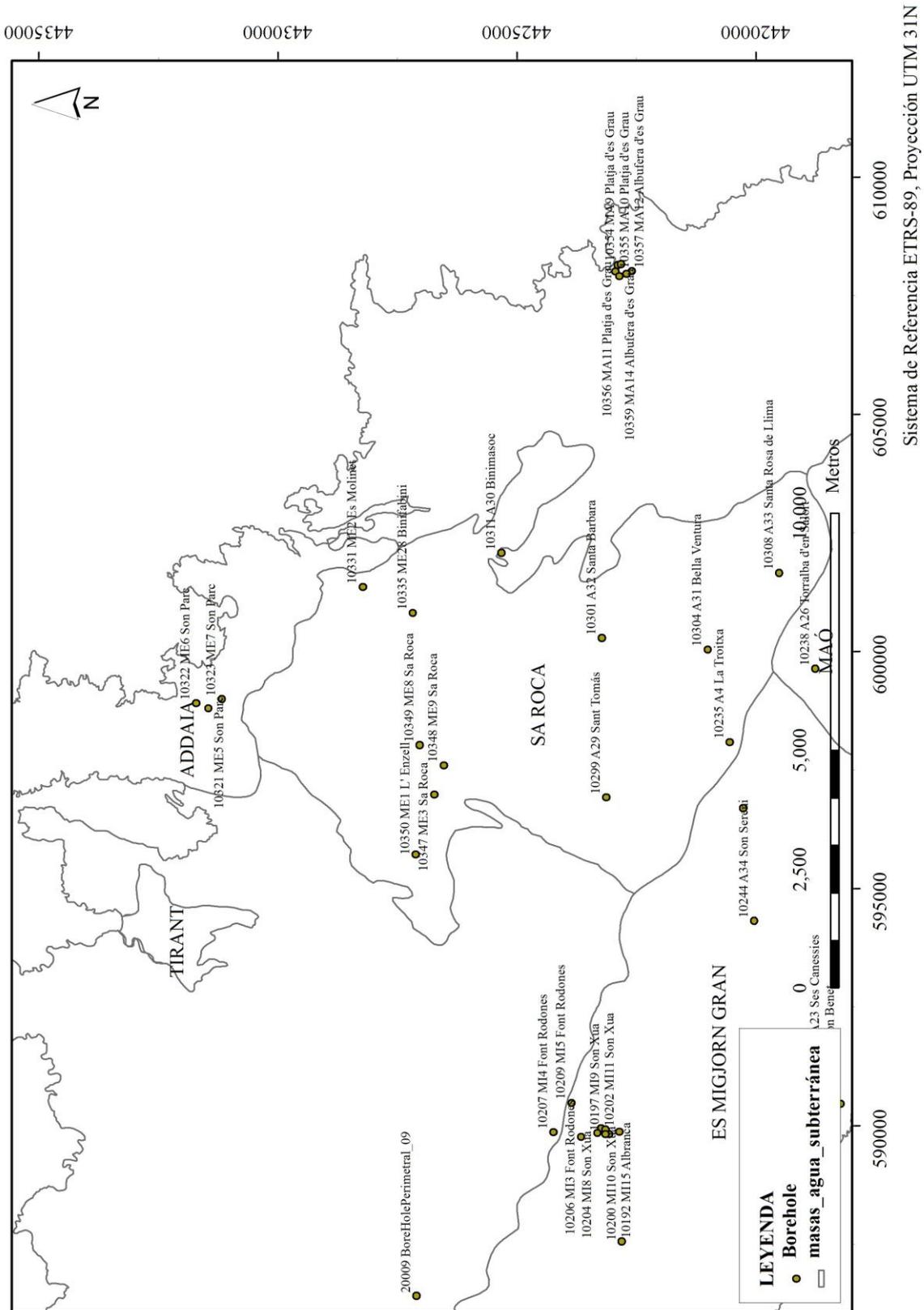
Ciutadella, Borehole (Sondeos Geol\u00f3gicos):



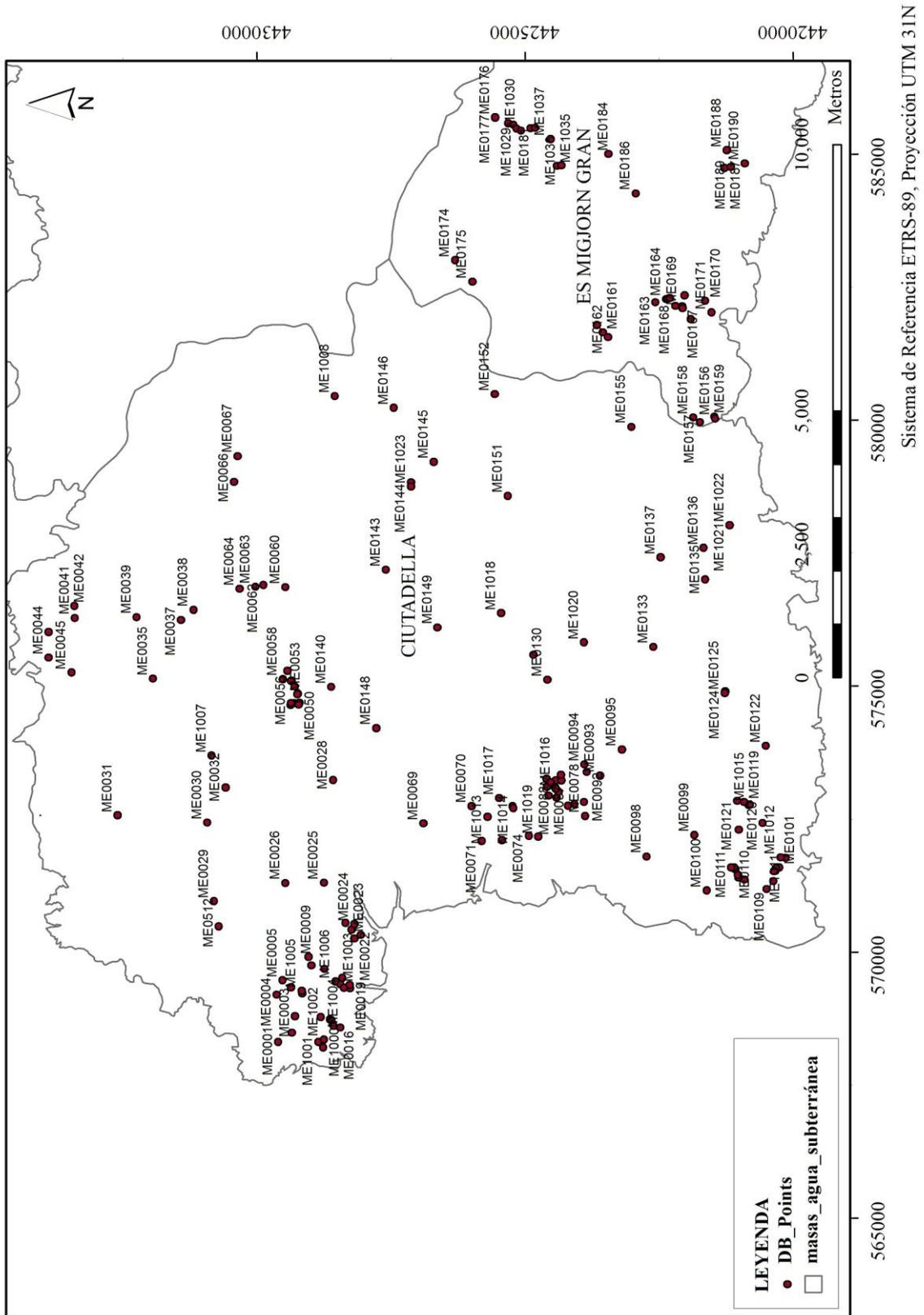
Maó, Borehole (Sondeos Geológicos):



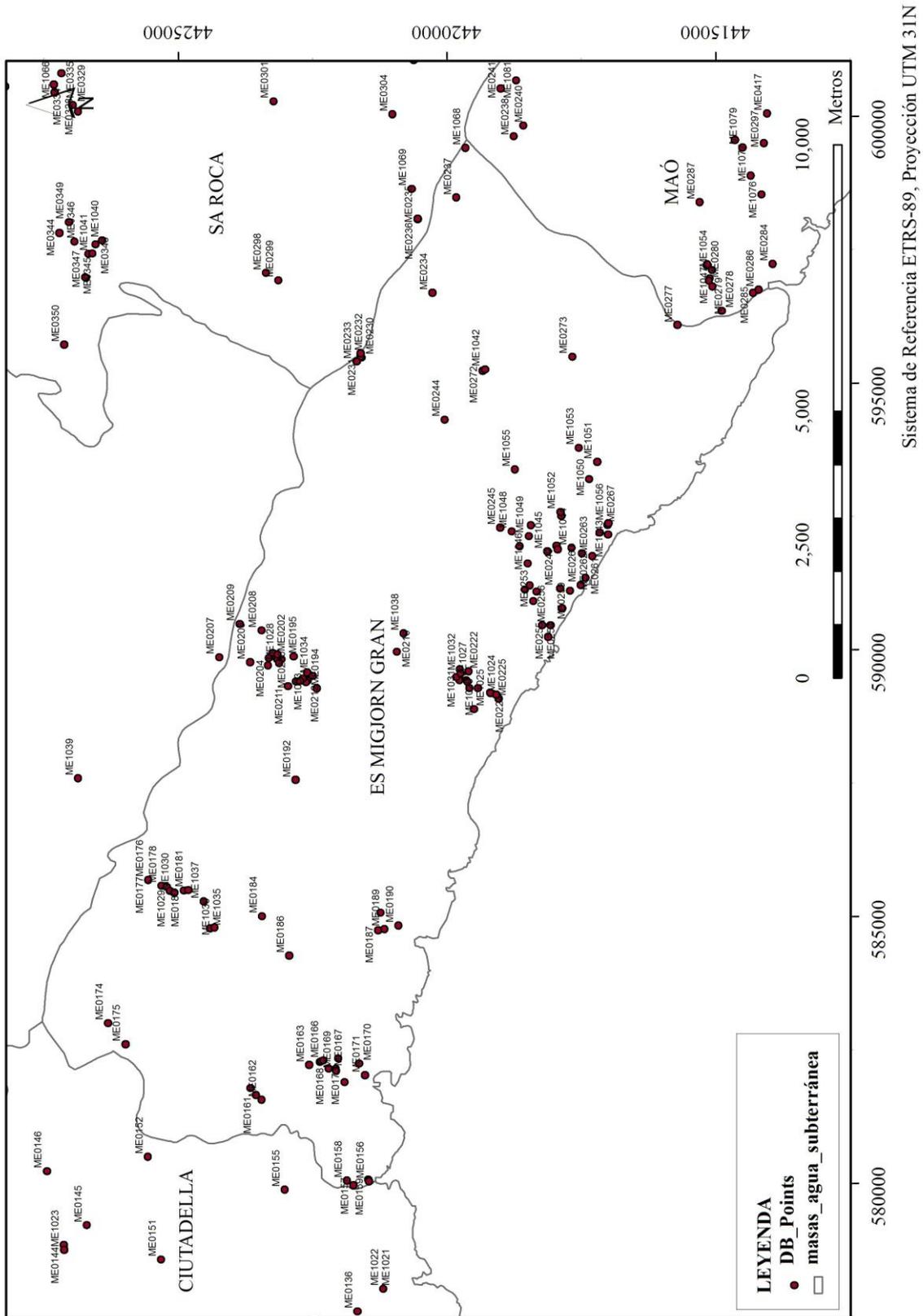
Sa Roca, Addaia y Tirant, Borehole (Sondeos Geológicos):



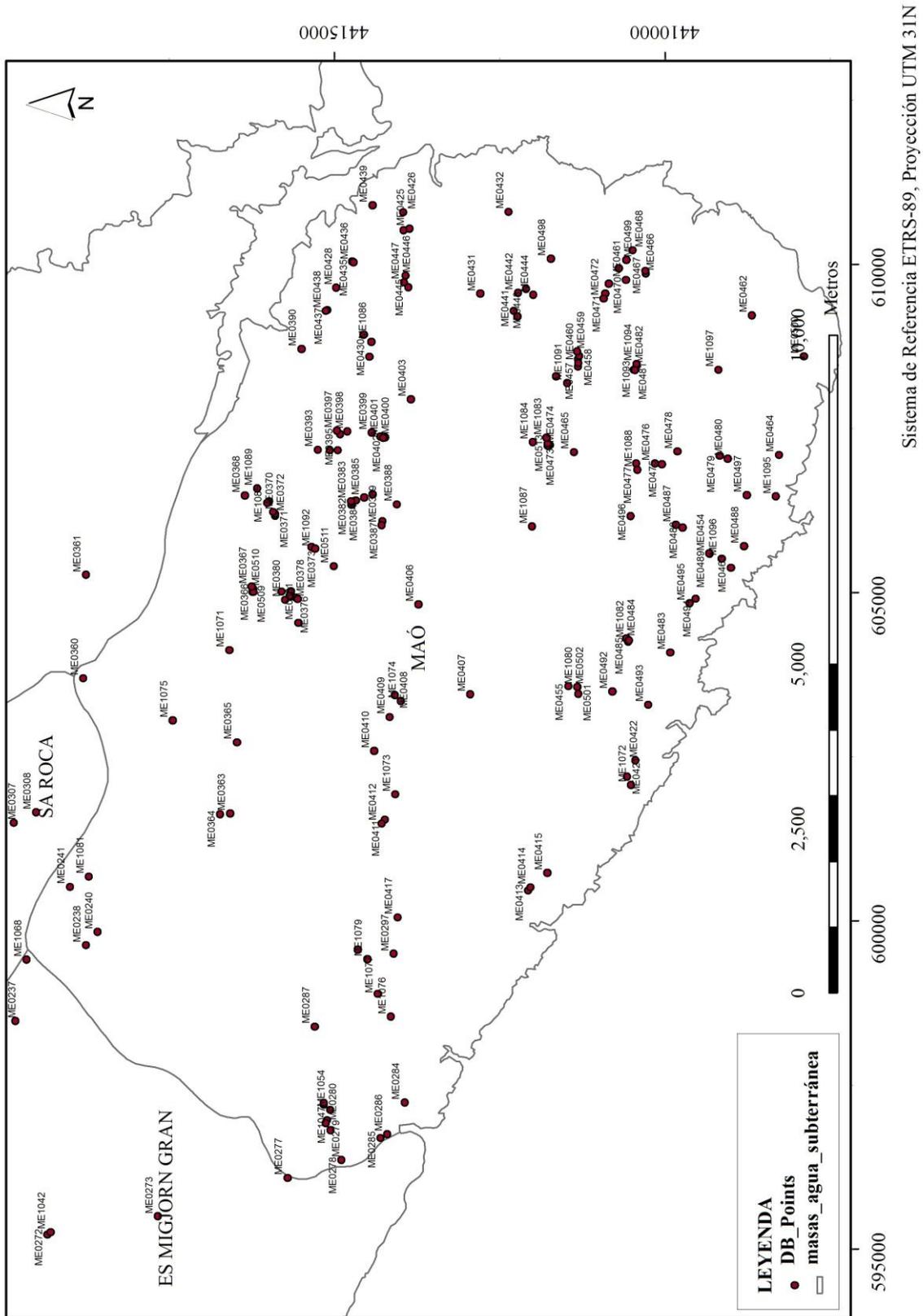
Ciutadella, DB Point (Puntos de Control, Hidroquímica, Hidrogeología):



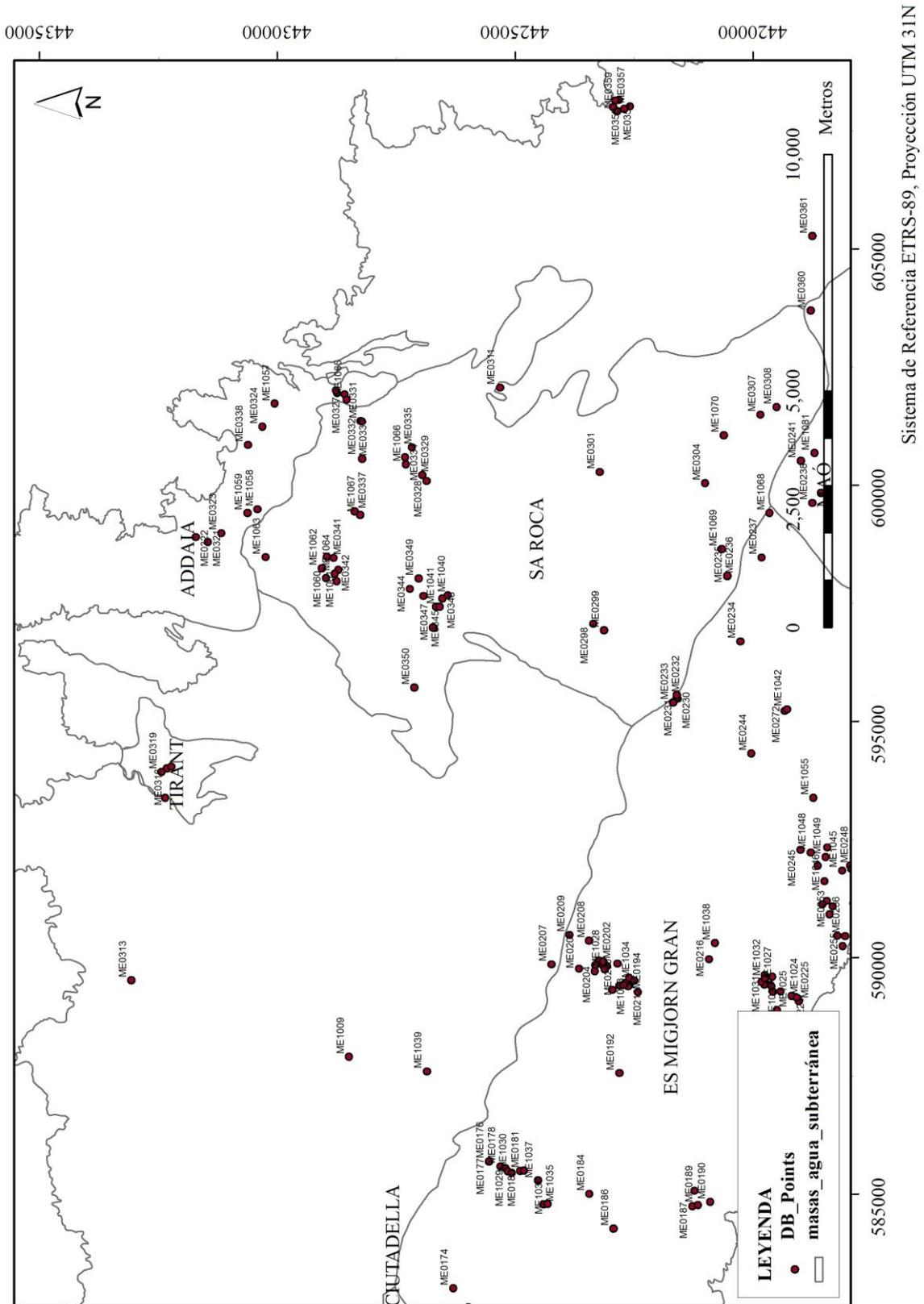
Es Migjorn Gran, DB Point (Puntos de Control, Hidroquímica, Hidrogeología):



Maó, DB Point (Puntos de Control, Hidroquímica, Hidrogeología):



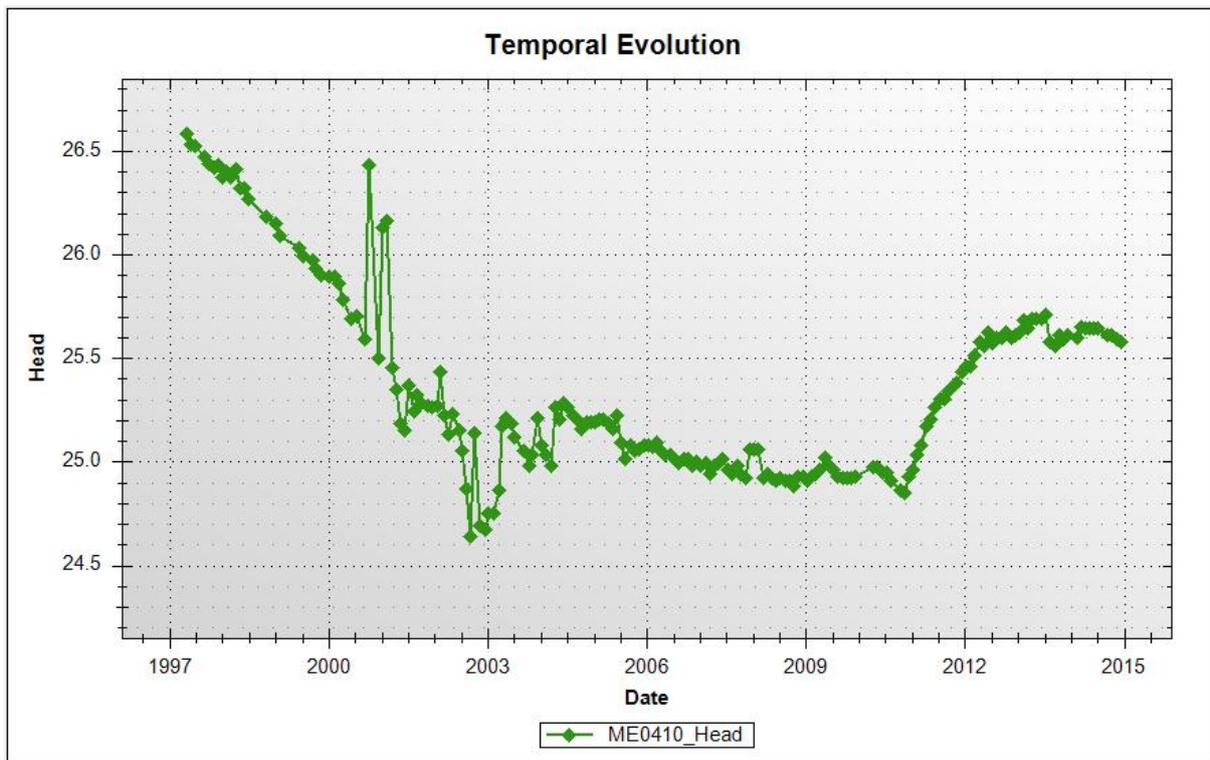
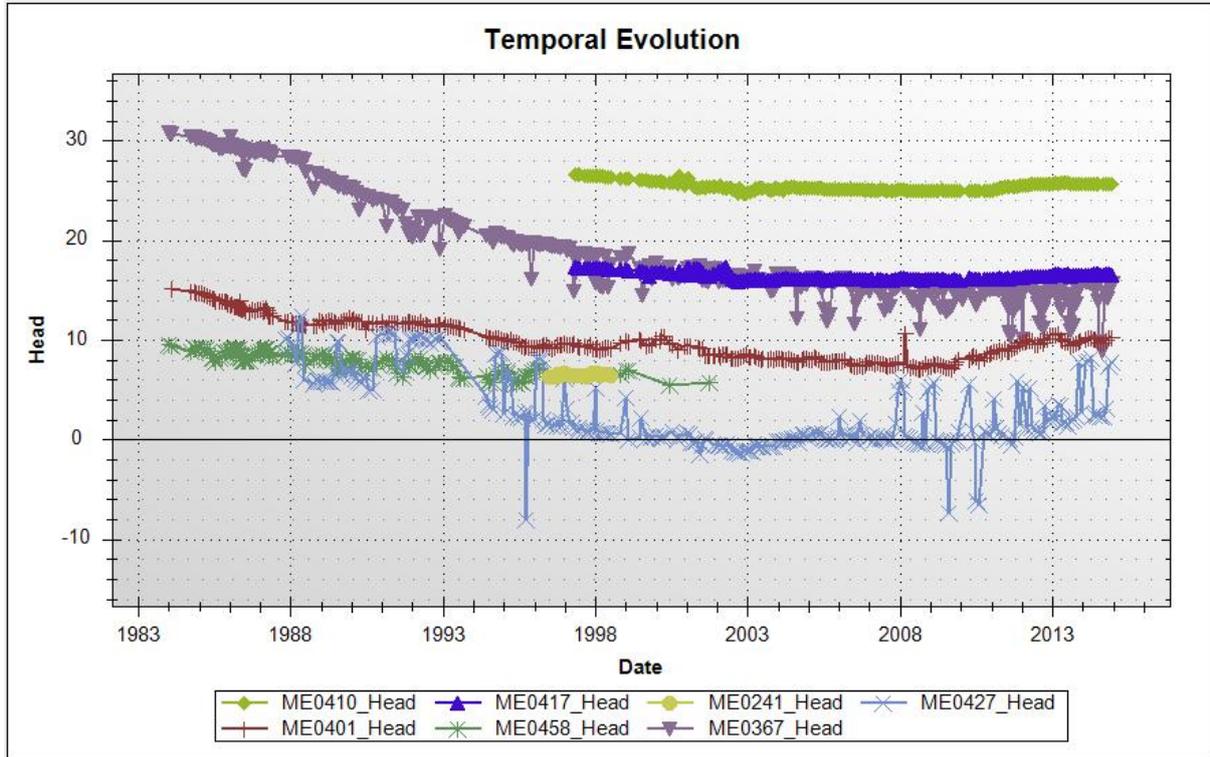
Sa Roca, Addaia y Tirant, DB Point (Puntos de Control, Hidroquímica, Hidrogeología):

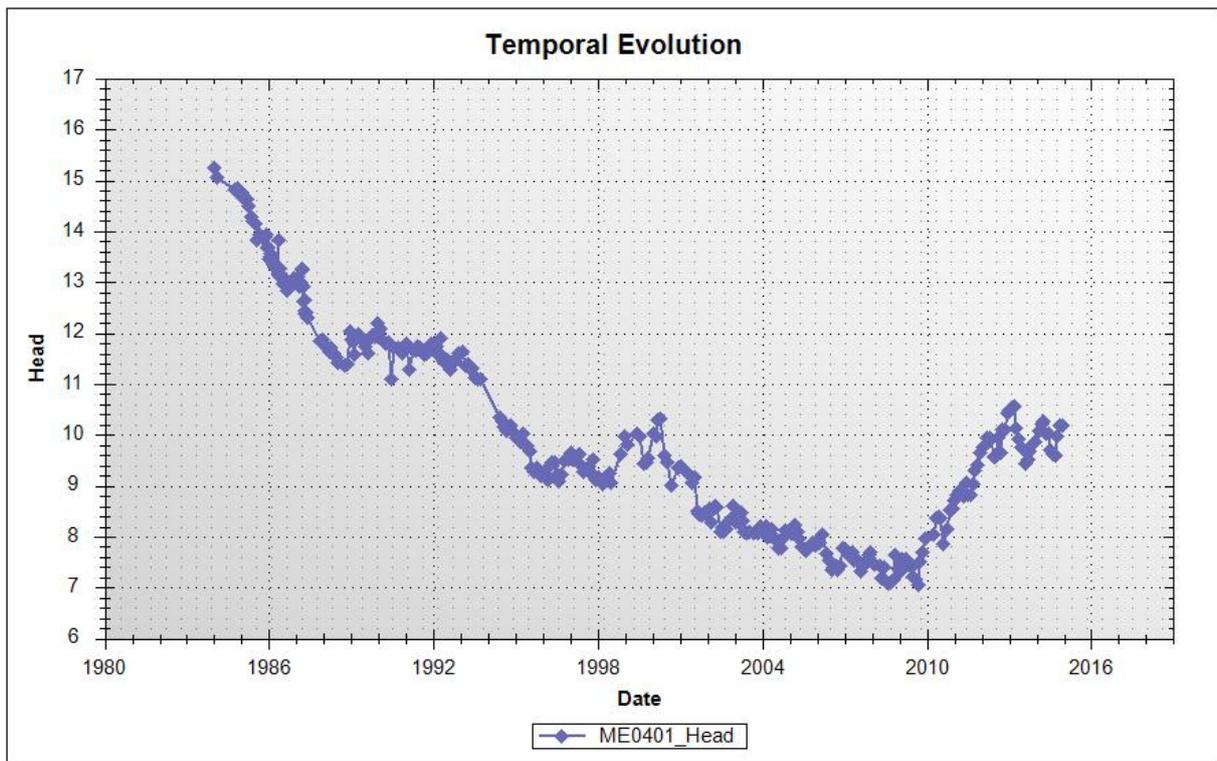
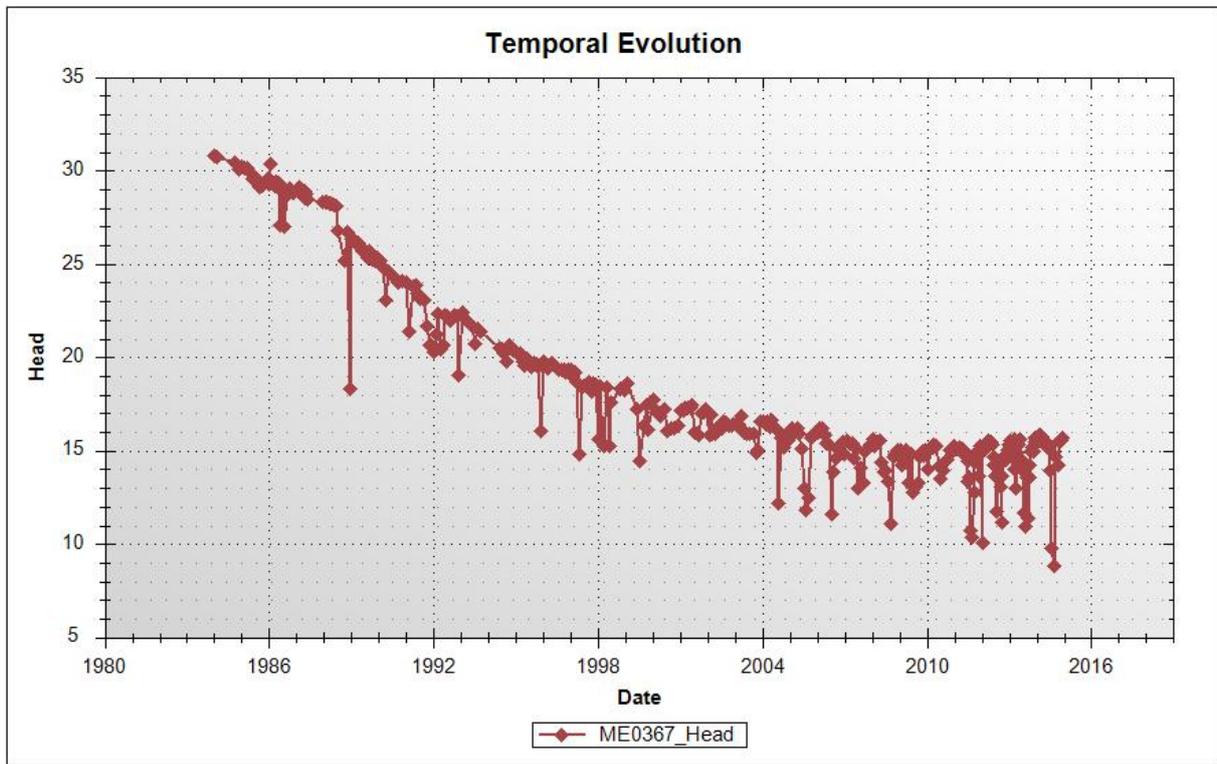


ANEXO 3. RESULTADOS HYYH

Temporal Evolution Head

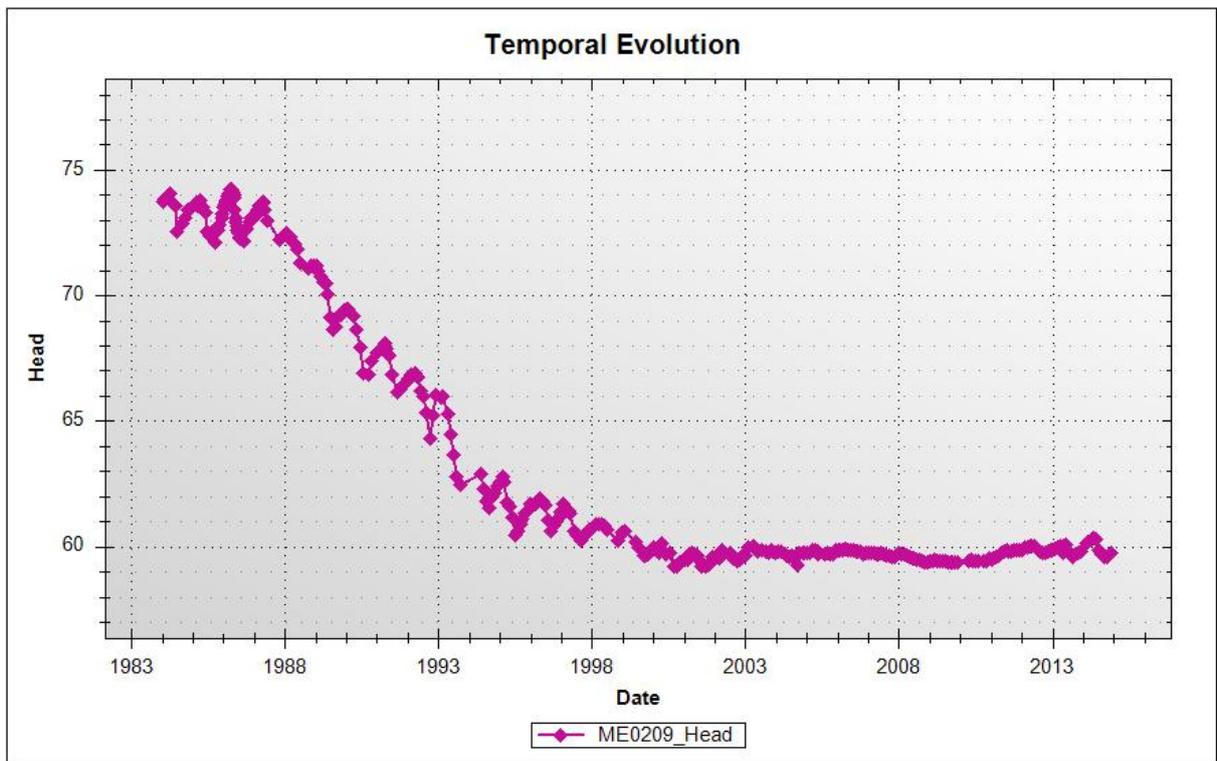
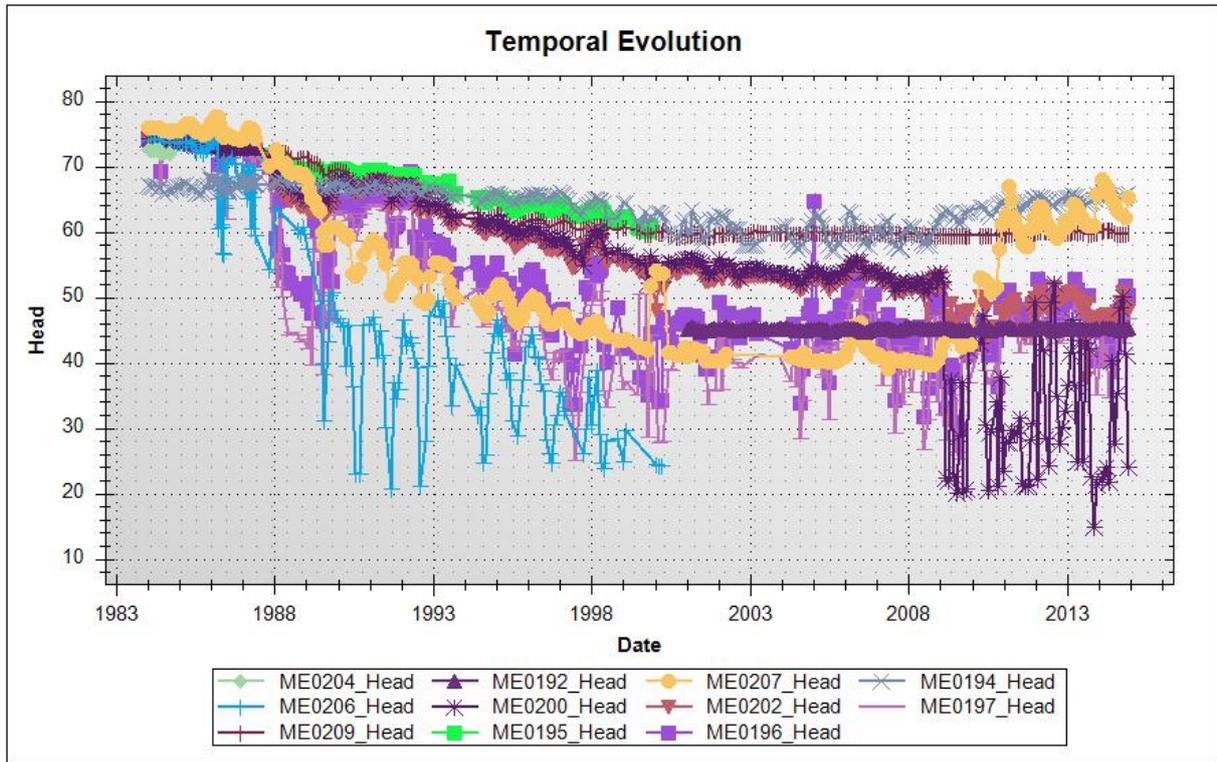
Maó 1901M1

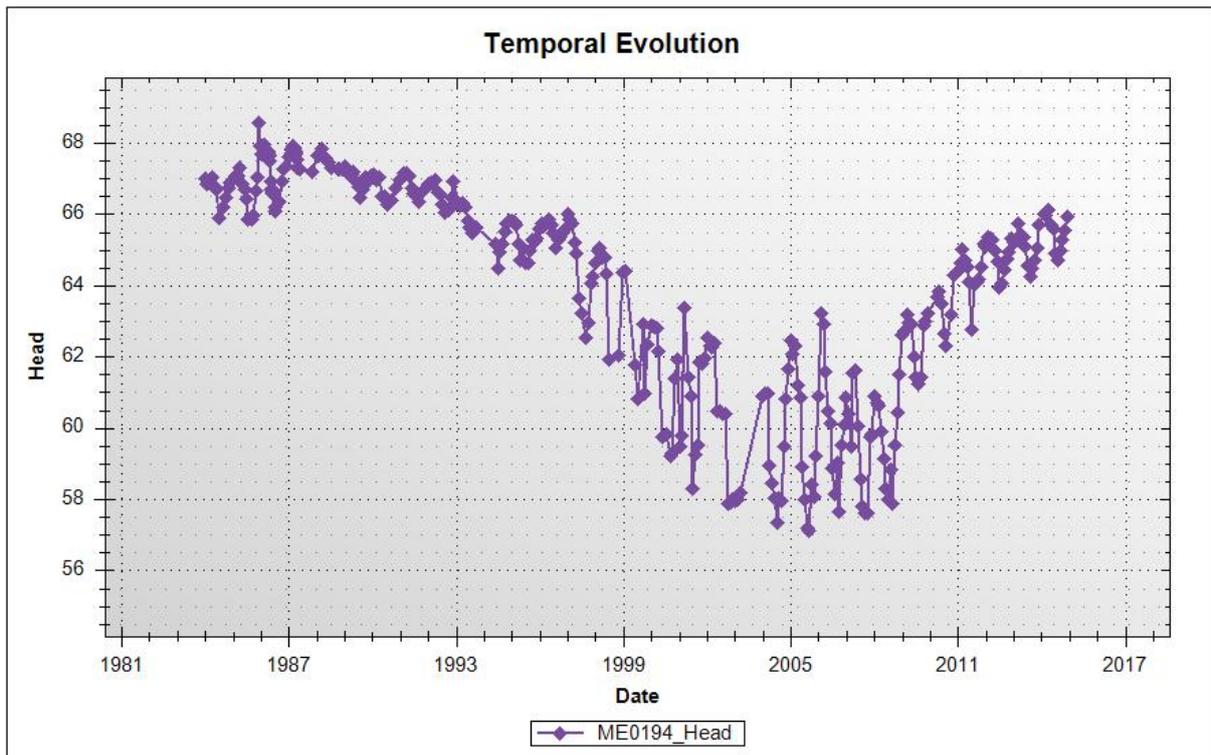




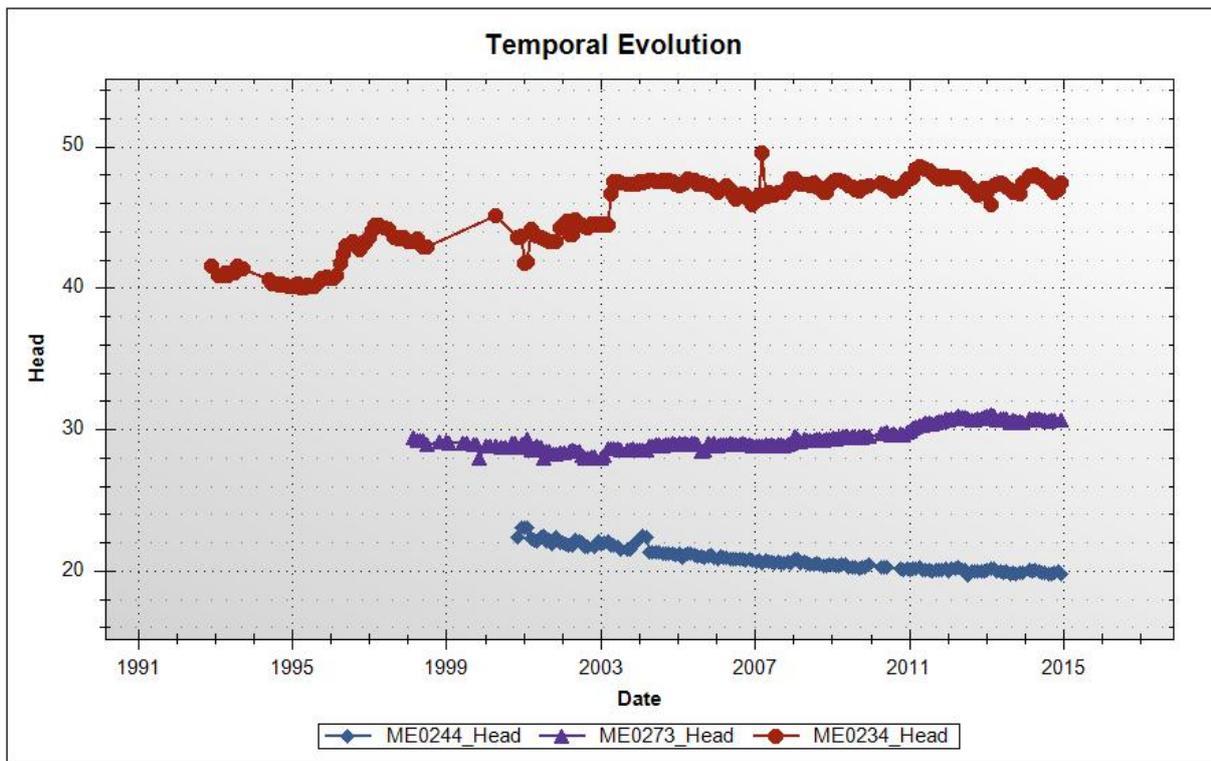
Es Migjorn Gran 1901M2

Zona Norte-Centro:

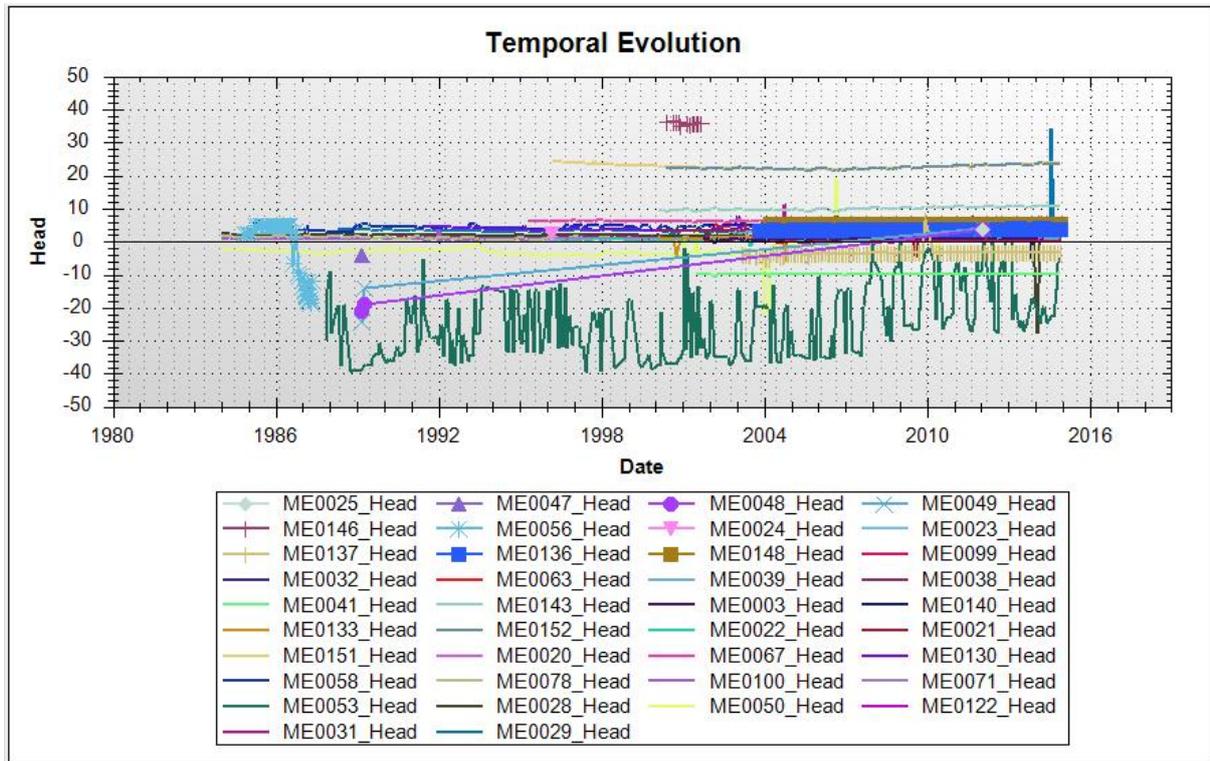




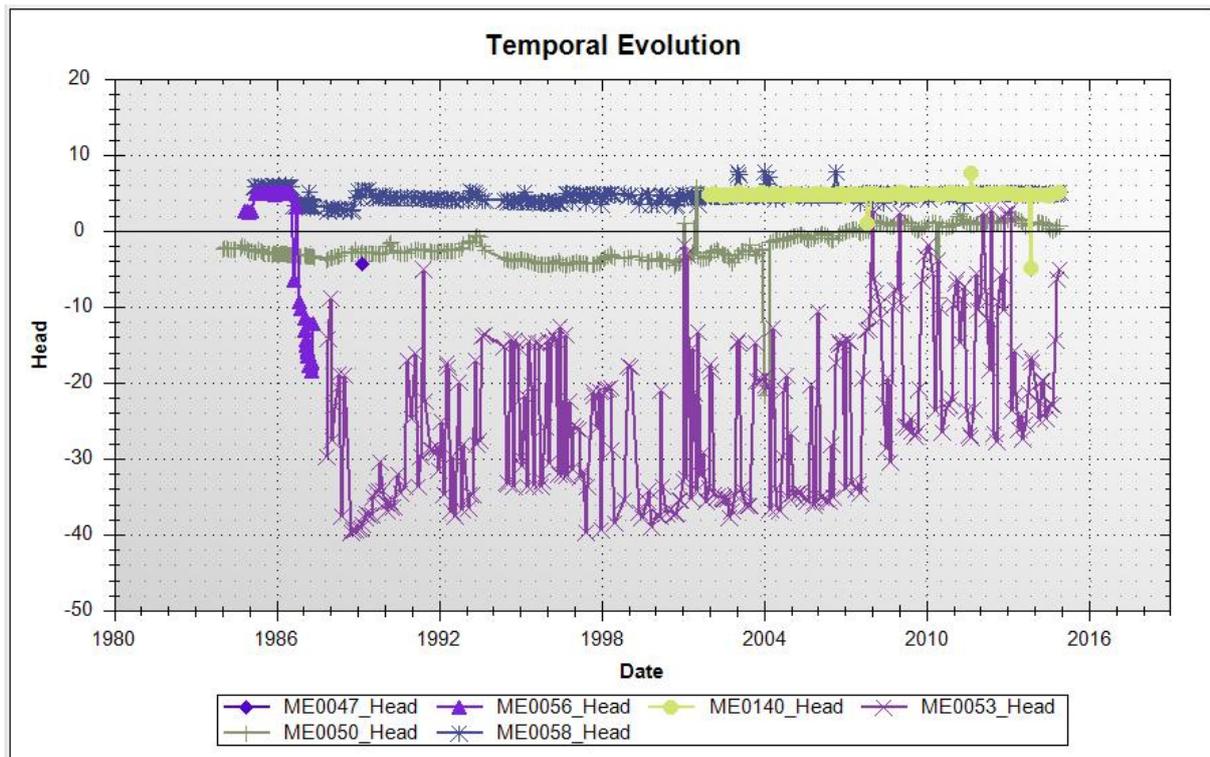
Zona límite con *Maó* 1901M1:



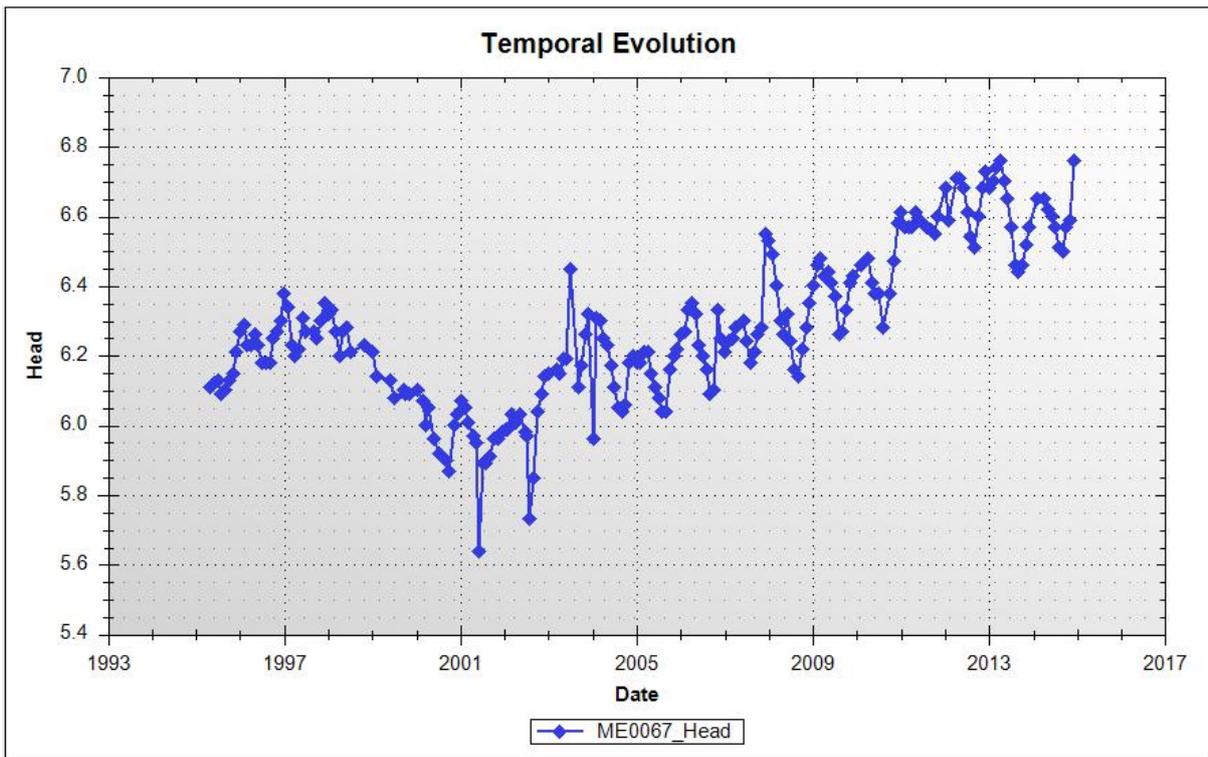
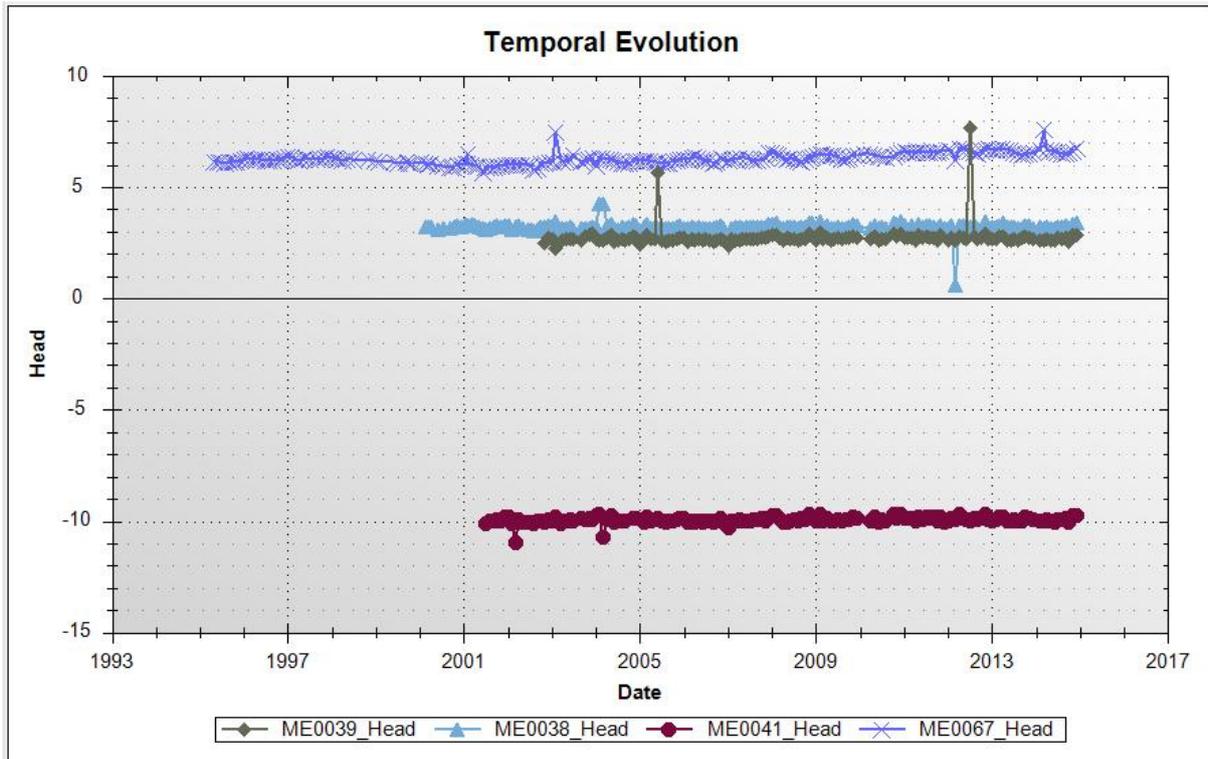
Ciudadella 1901M3

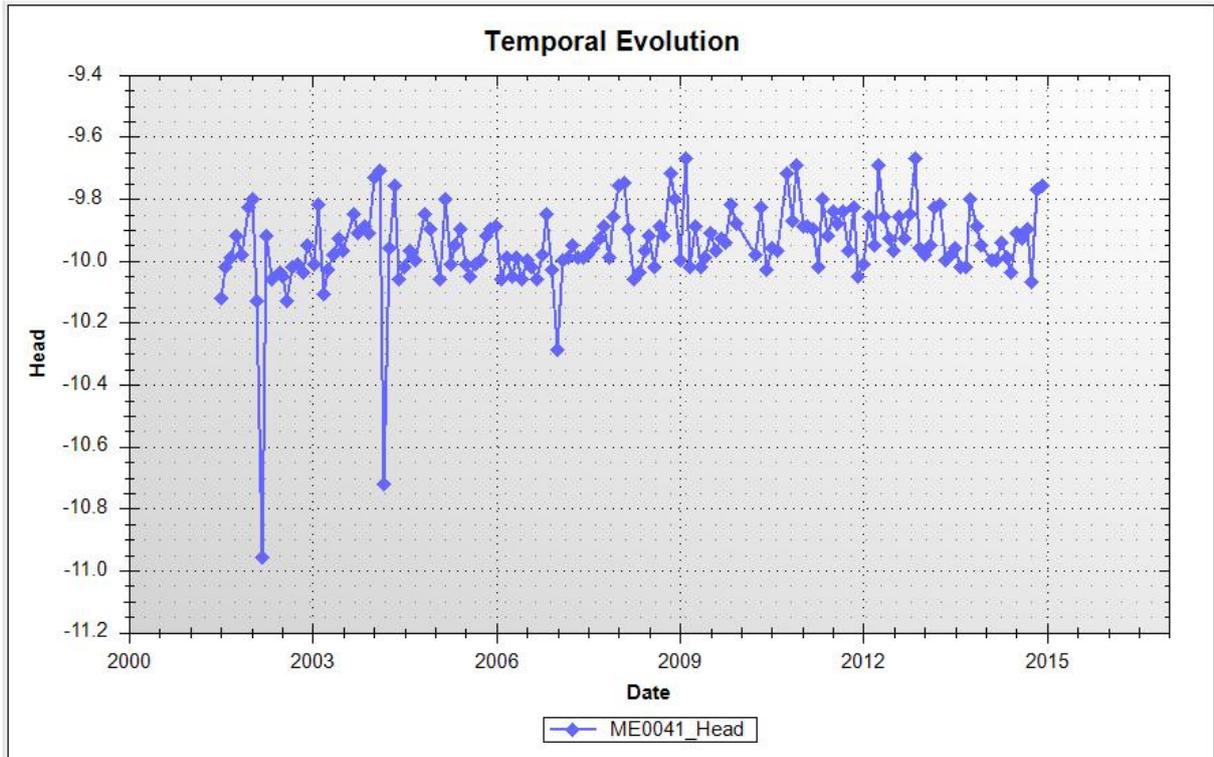


Zona Es Caragolí:

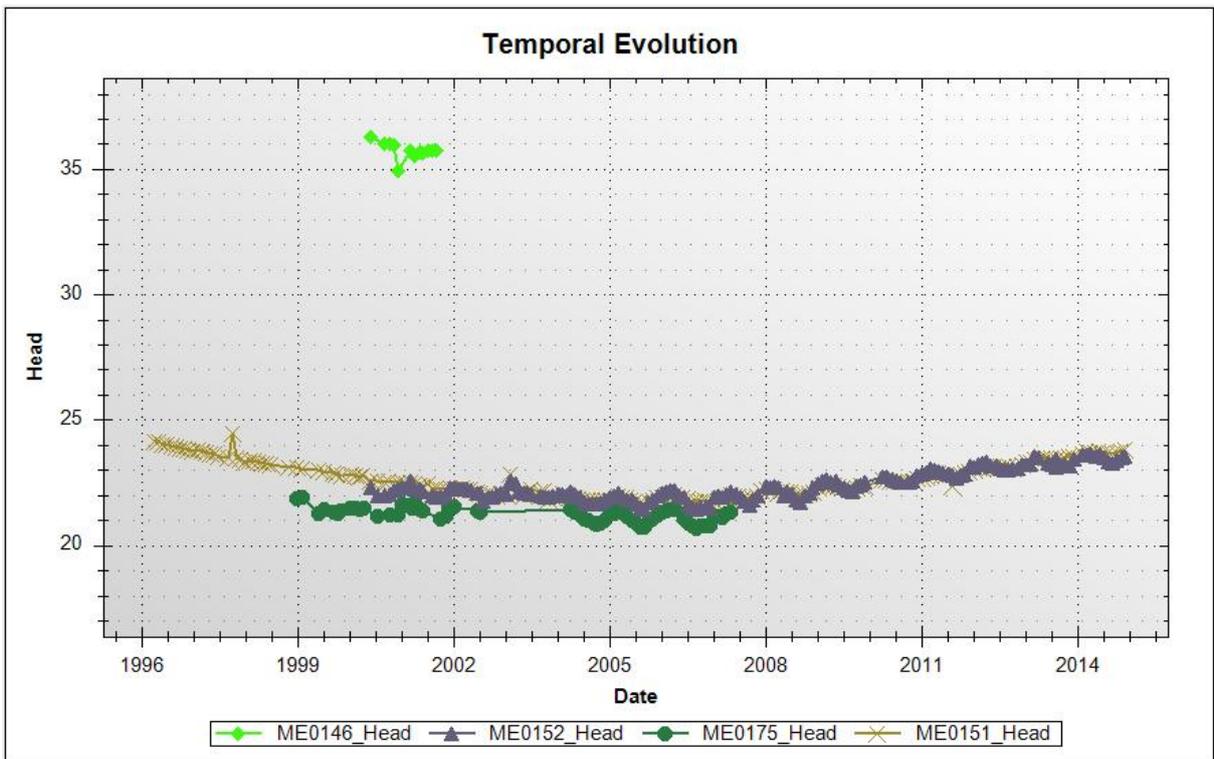


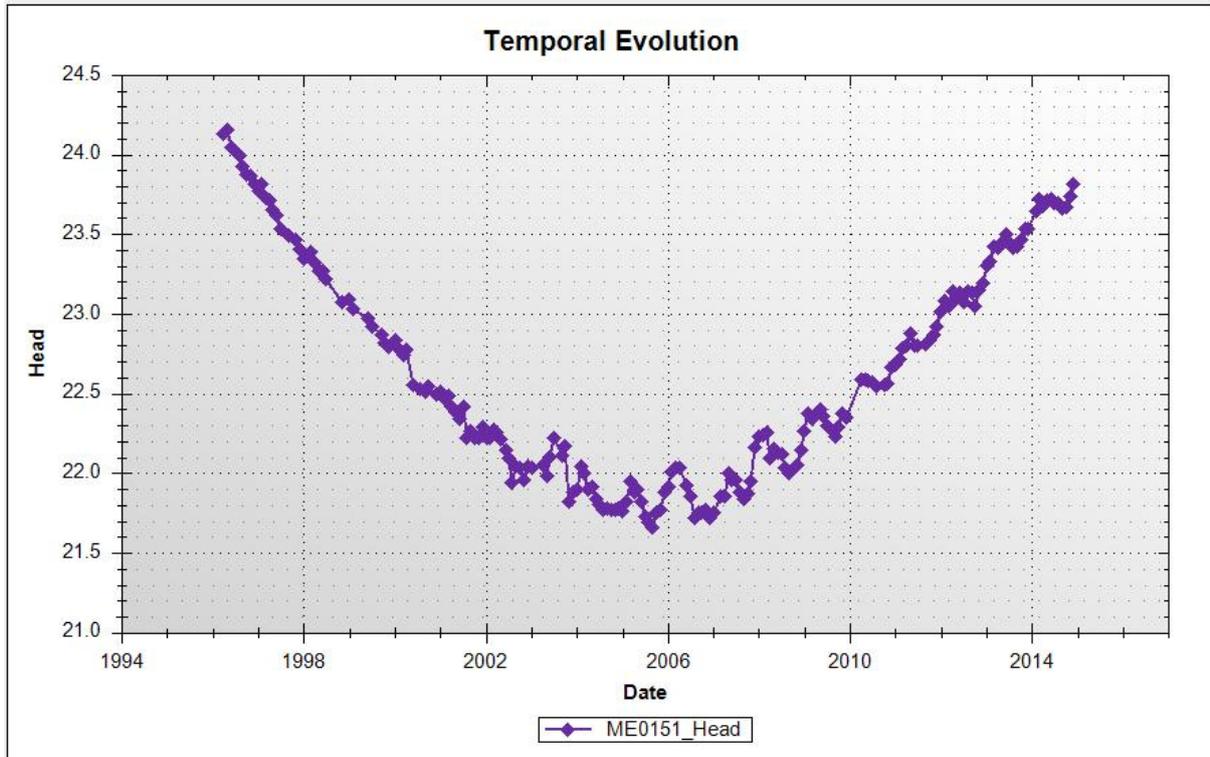
Zona Acuífero Jurásico:



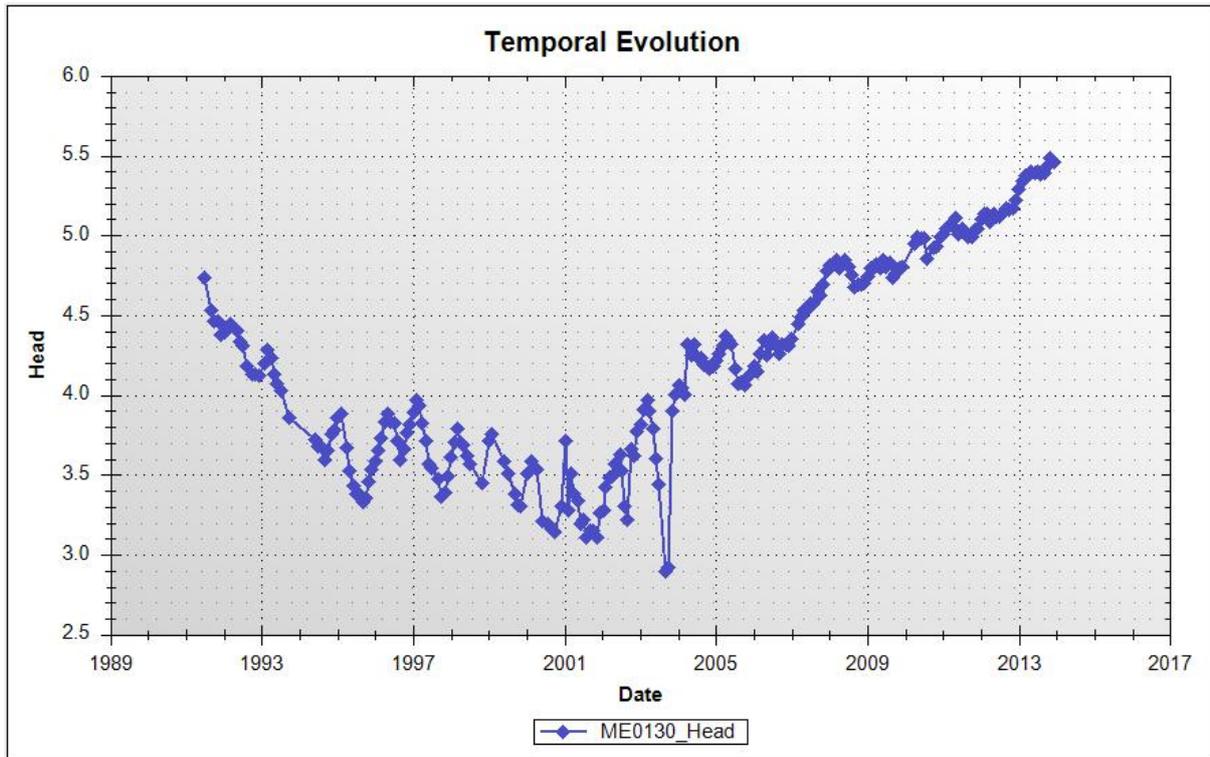


Zona límite con *Es Migjorn Gran*:

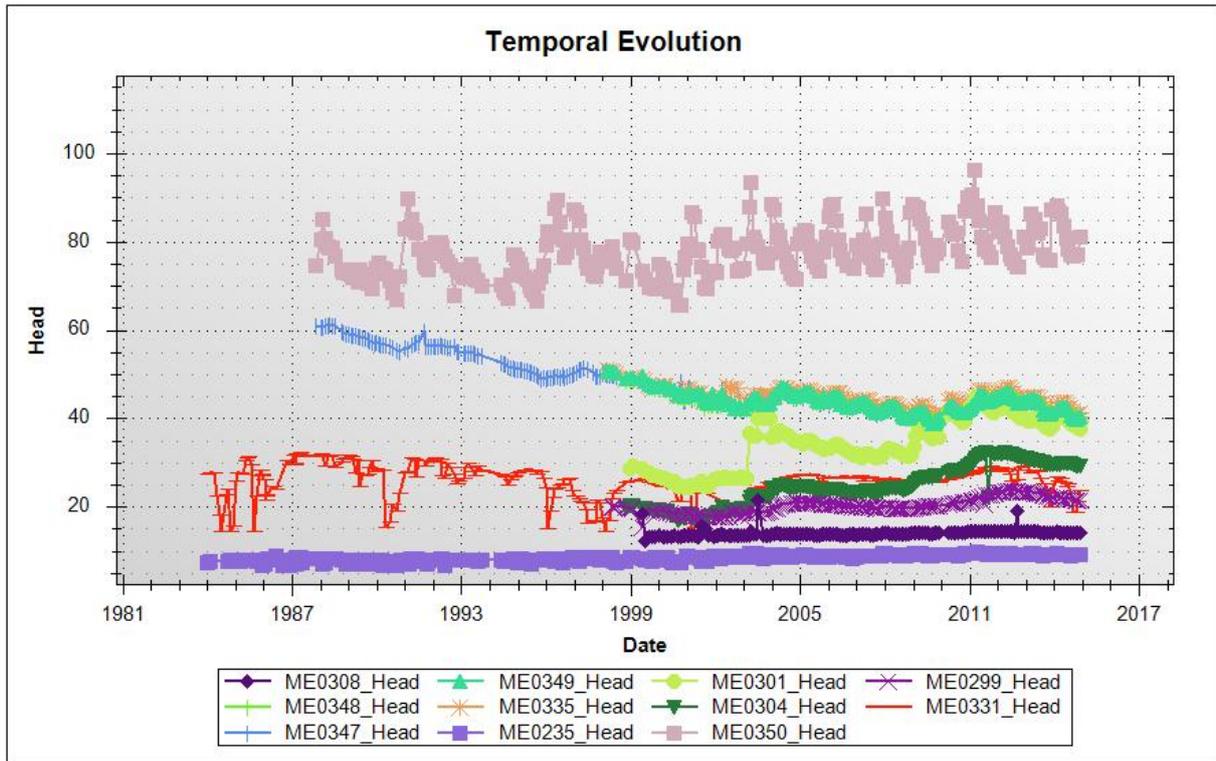




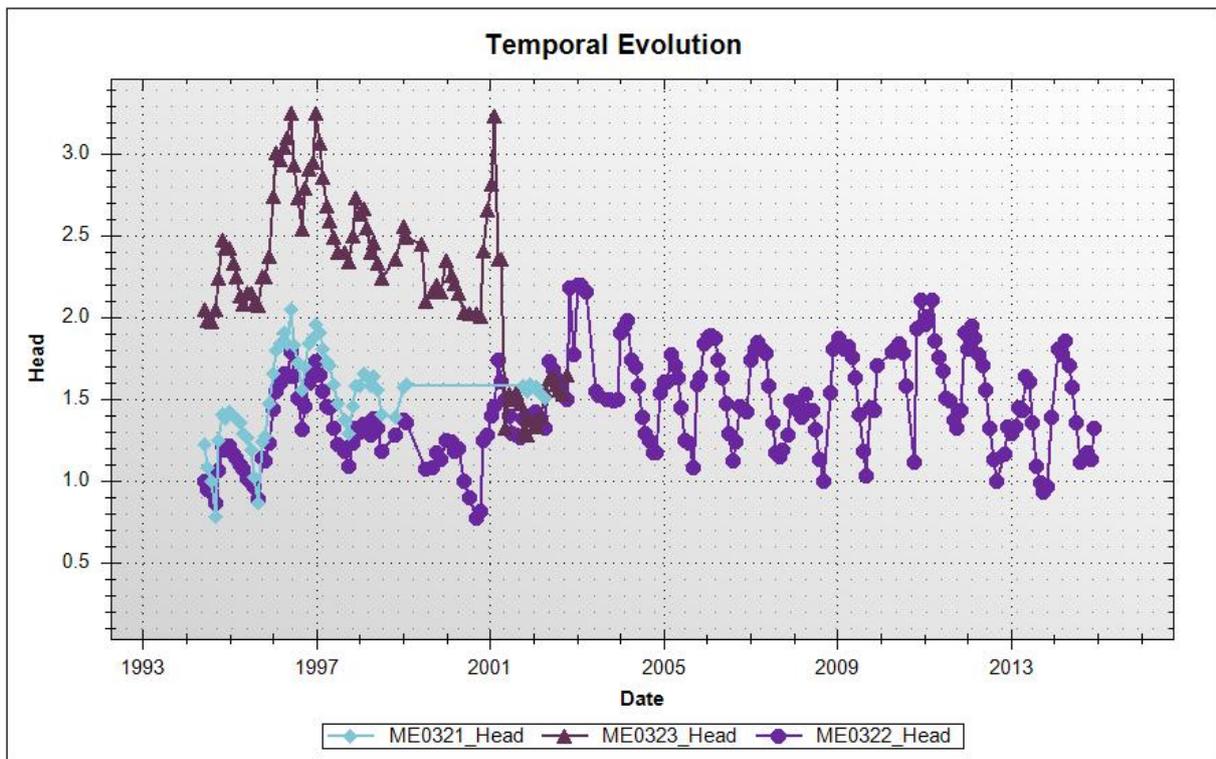
C18 San Juan de Missa



Sa Roca 1902M1

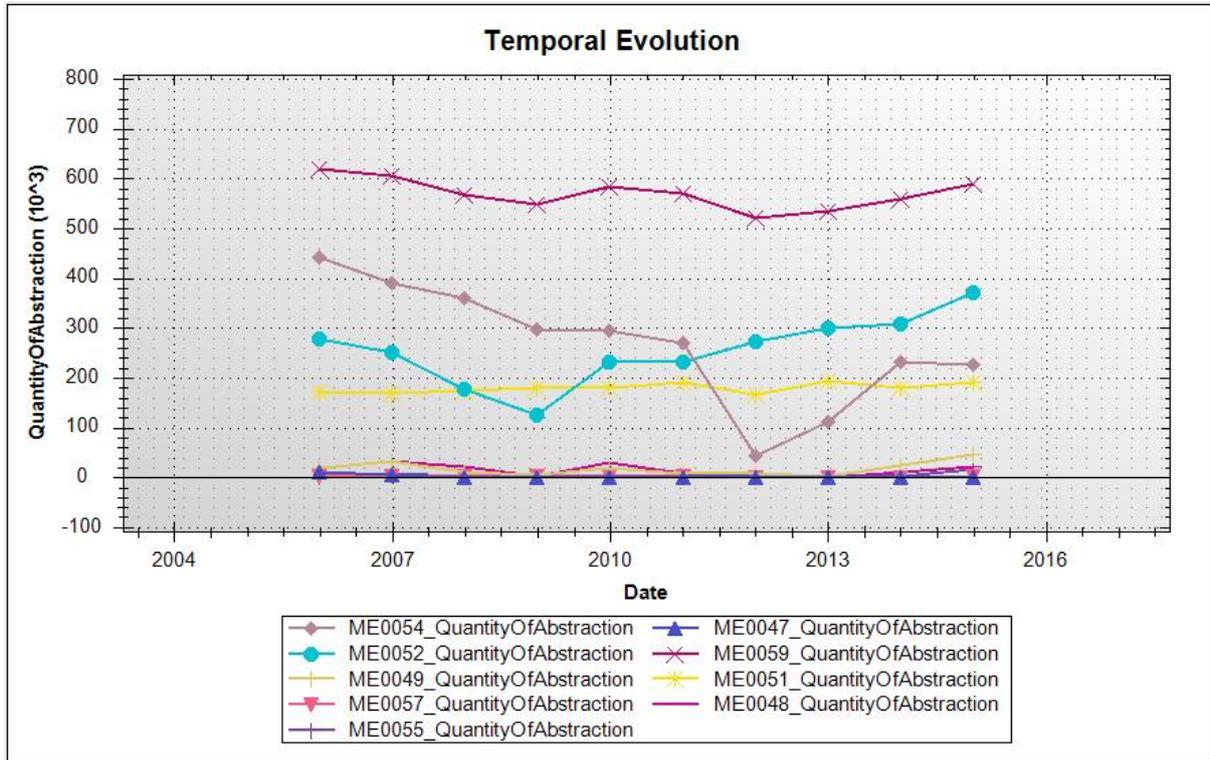


Adda 1903M1

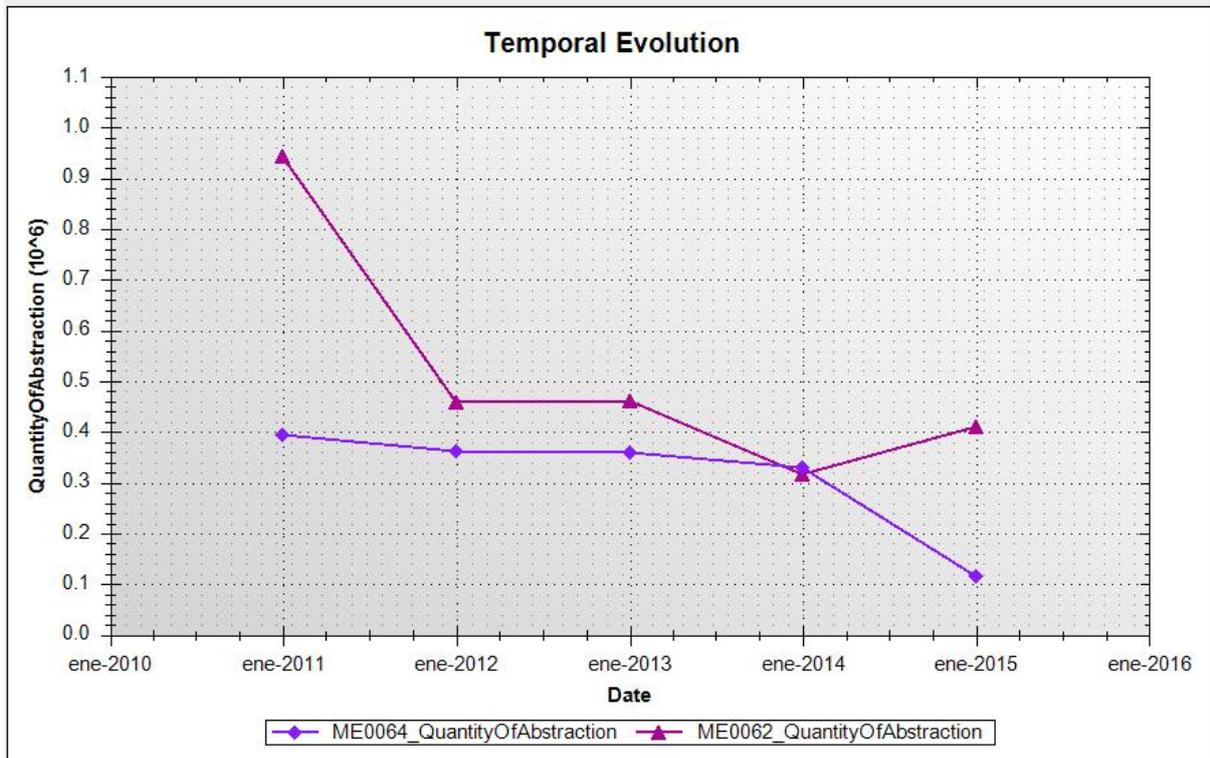


Temporal Evolution Abstraction

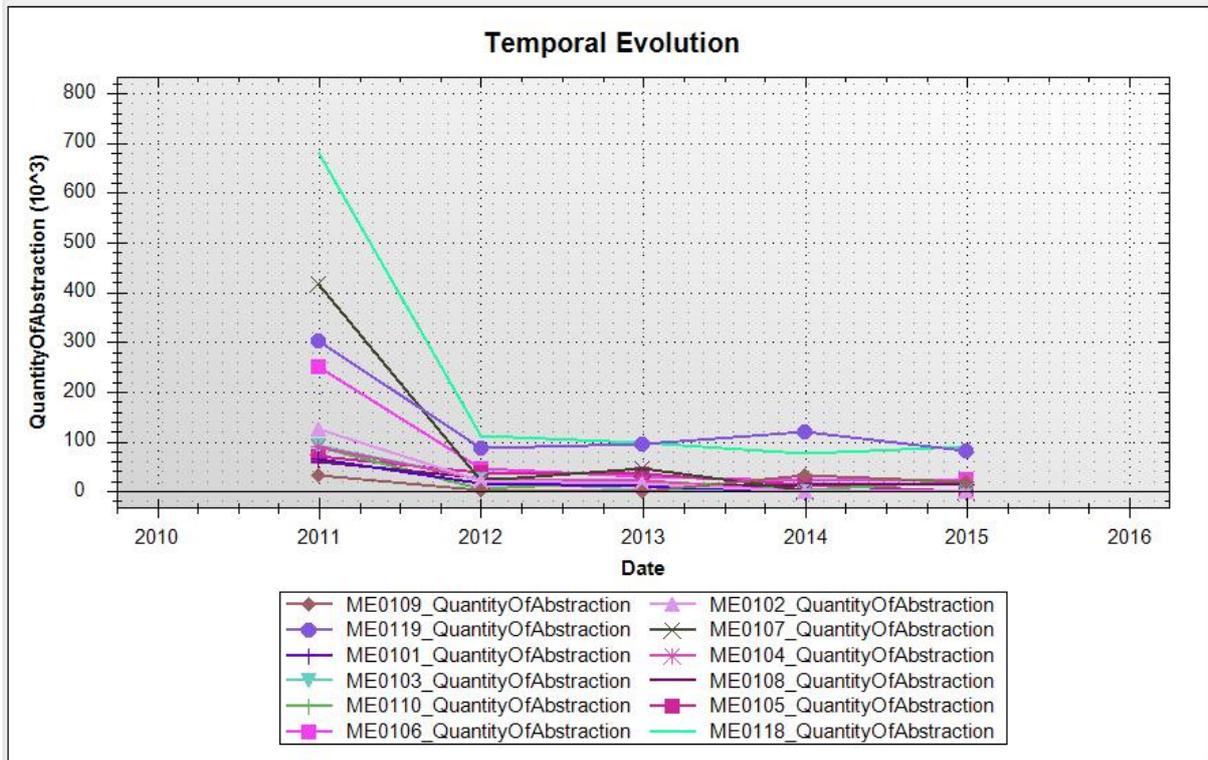
Evolución temporal de extracciones en Masa de Agua de *Ciudadella*, zona *Caragolí*.



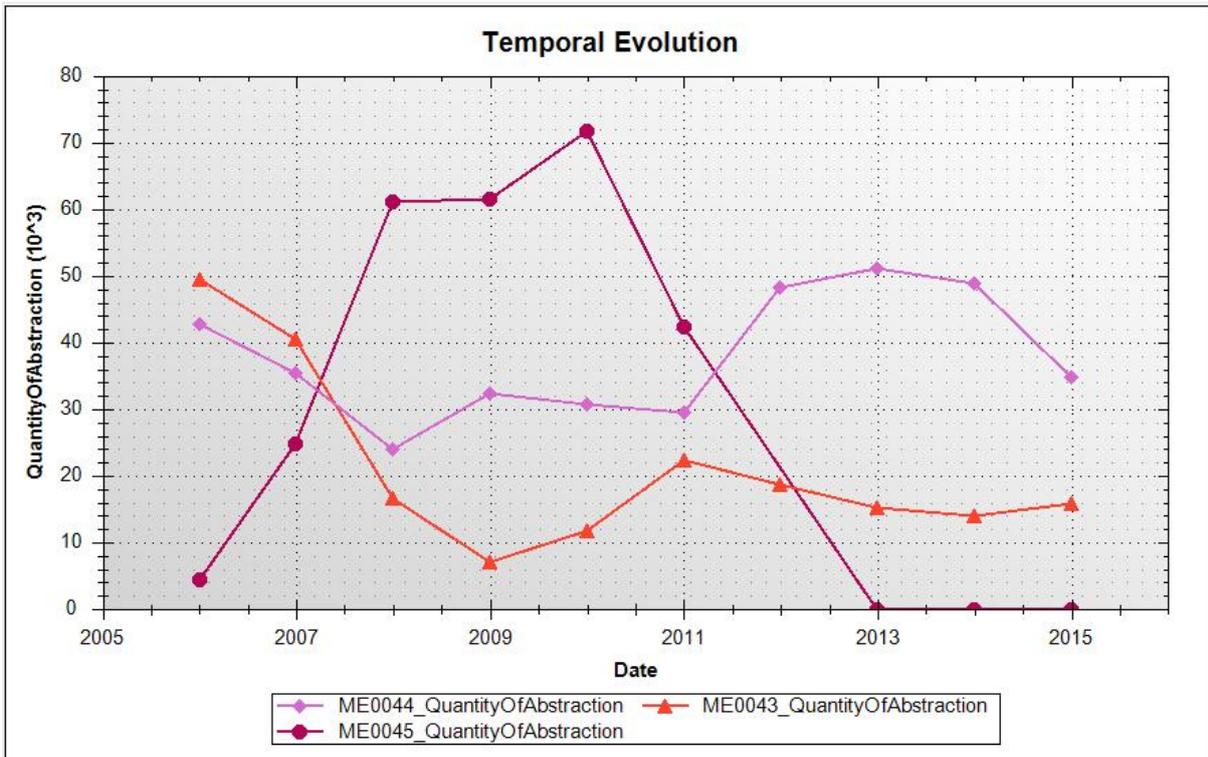
Evolución temporal de extracciones en Masa de Agua de *Ciudadella*, zona *Ses Arenes*.



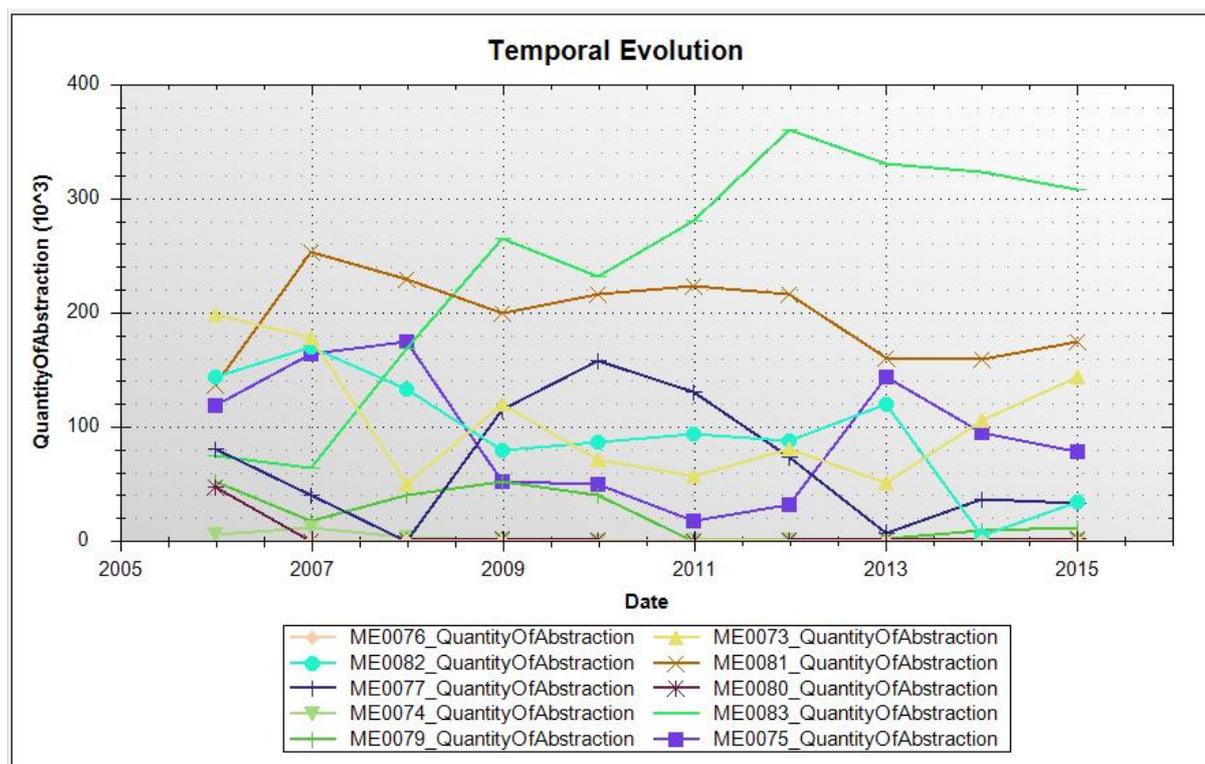
Evolución temporal de extracciones en Masa de Agua de *Ciudadella*, zona *Los Delfines*.



Evolución temporal de extracciones en Masa de Agua de *Ciudadella*, zona *Cala Morell*.



Evolución temporal de extracciones en Masa de Agua de *Ciudadella*, zona *Son Blanc*.



ANEXO 4. RESULTADOS QUIMET

Diagrama de Piper. Menorca. Octubre 2014.

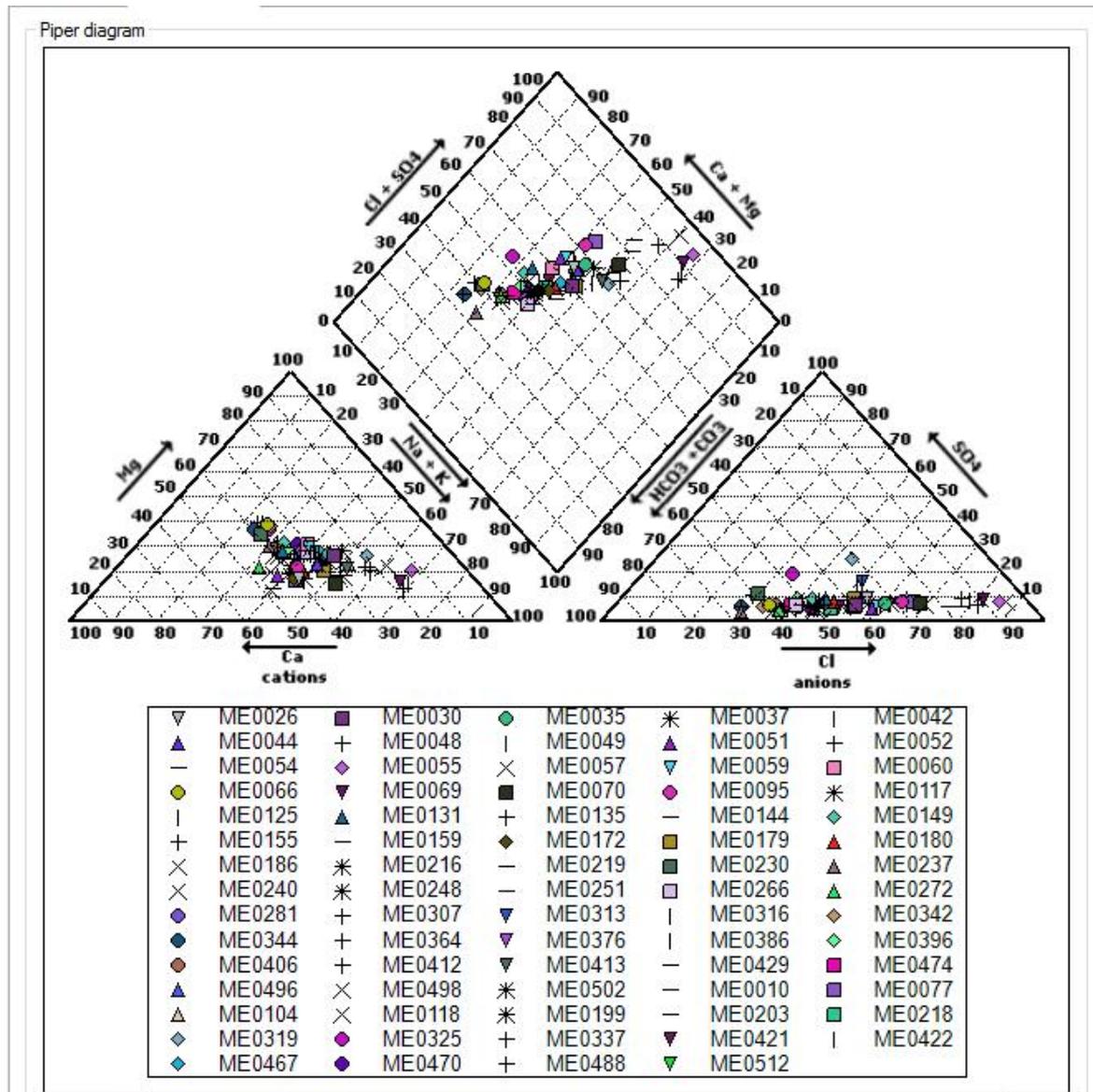


Diagrama de Piper. Masa de Agua *Ciutadella*. Octubre 2014.

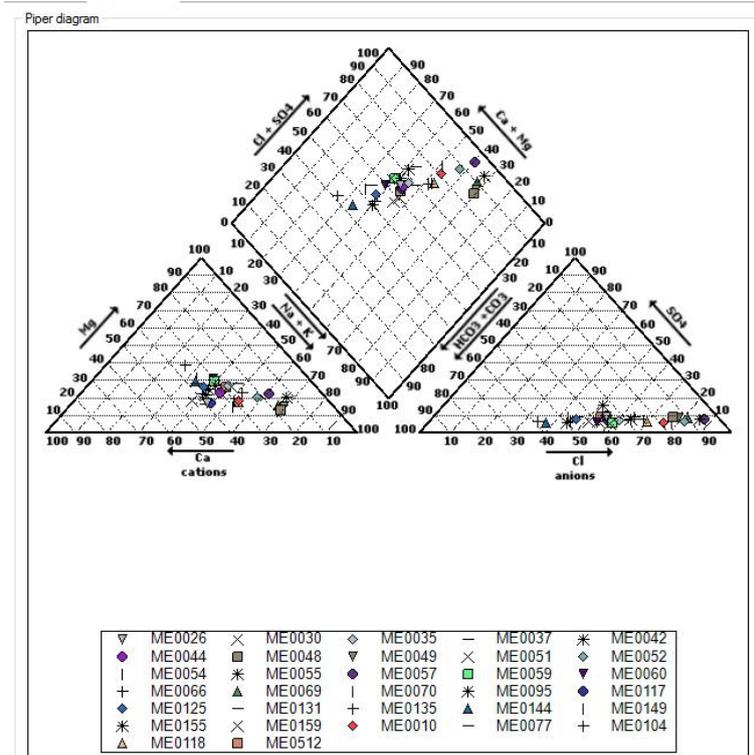


Diagrama de Piper. Masa de Agua *Es Migjorn Gran*. Octubre 2014.

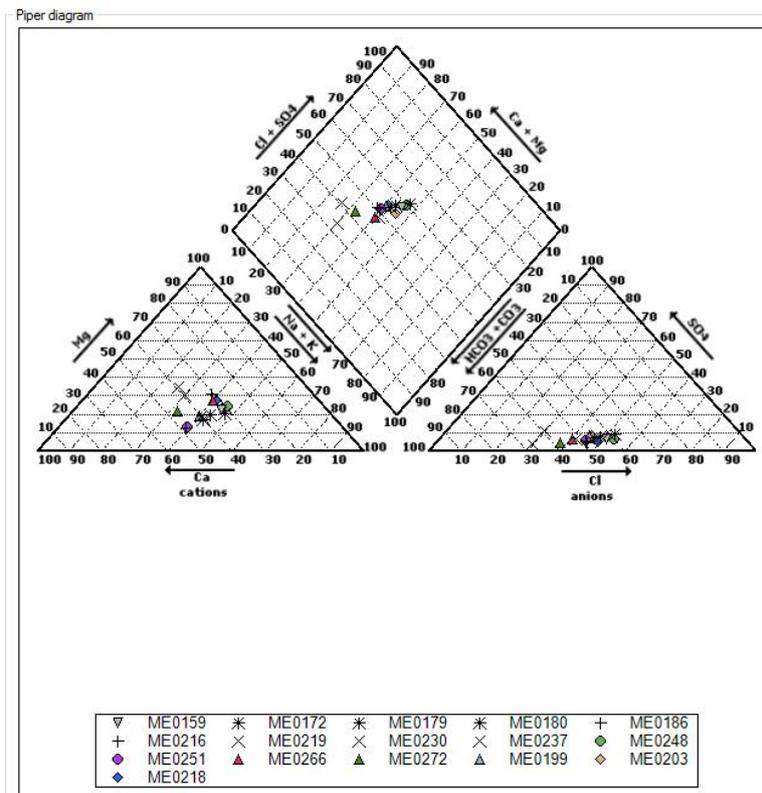


Diagrama de Piper. Masa de Agua Maó. Octubre 2014.

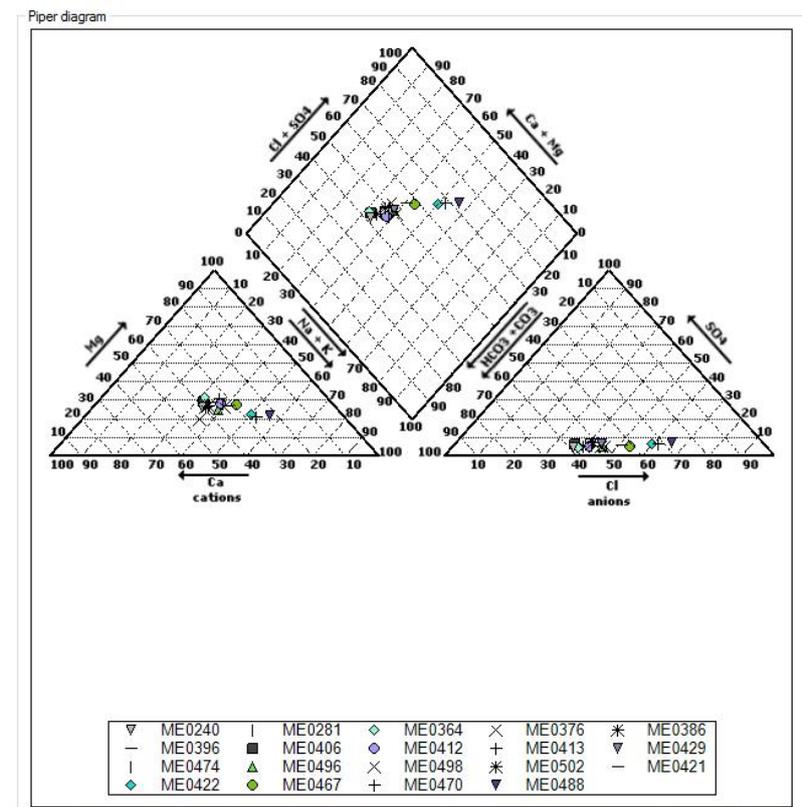


Diagrama de Piper. Masa de Agua Sa Roca. Octubre 2014.

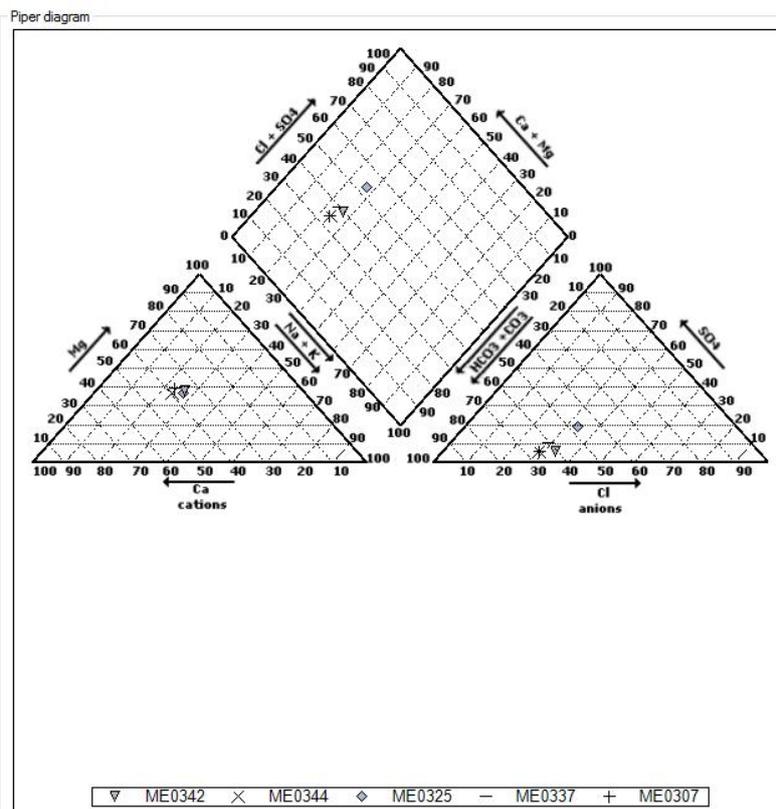


Diagrama de Piper. Masa de Agua *Addaia*. Octubre 2014.

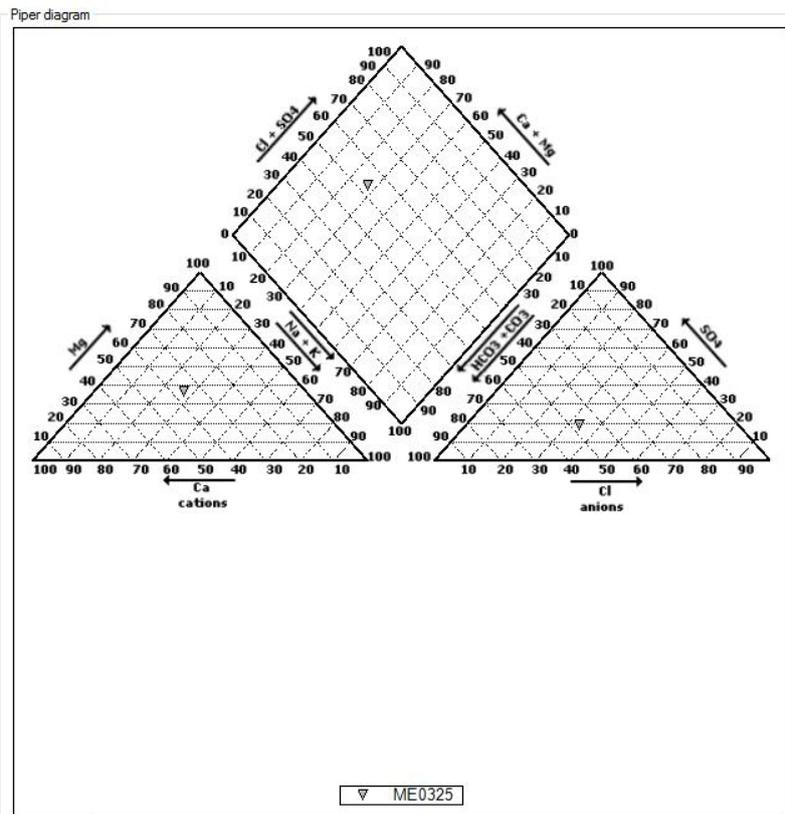


Diagrama de Piper. Masa de Agua *Tirant*. Octubre 2014.

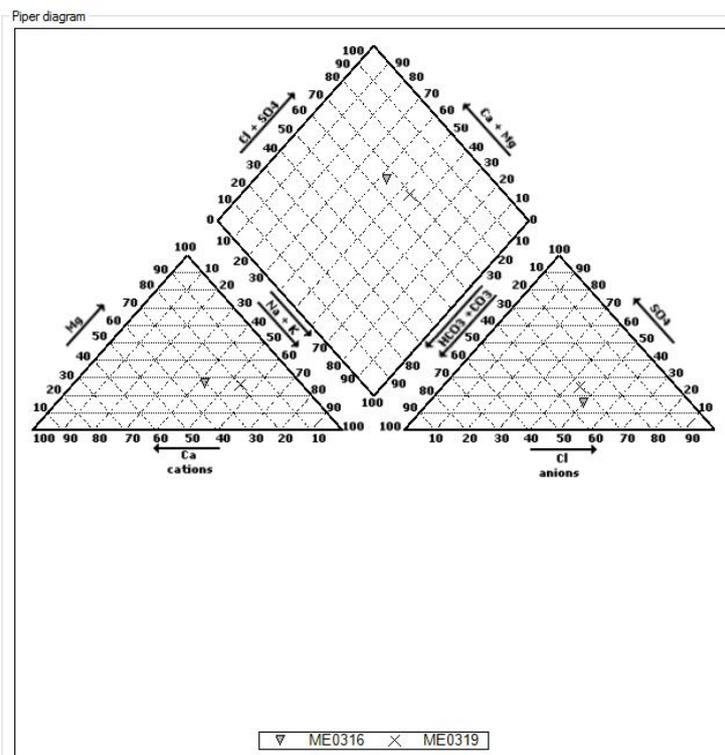


Diagrama de Piper. Masa de Agua *Ciudadella*, Zona *Es Caragolí*. Octubre 2014.

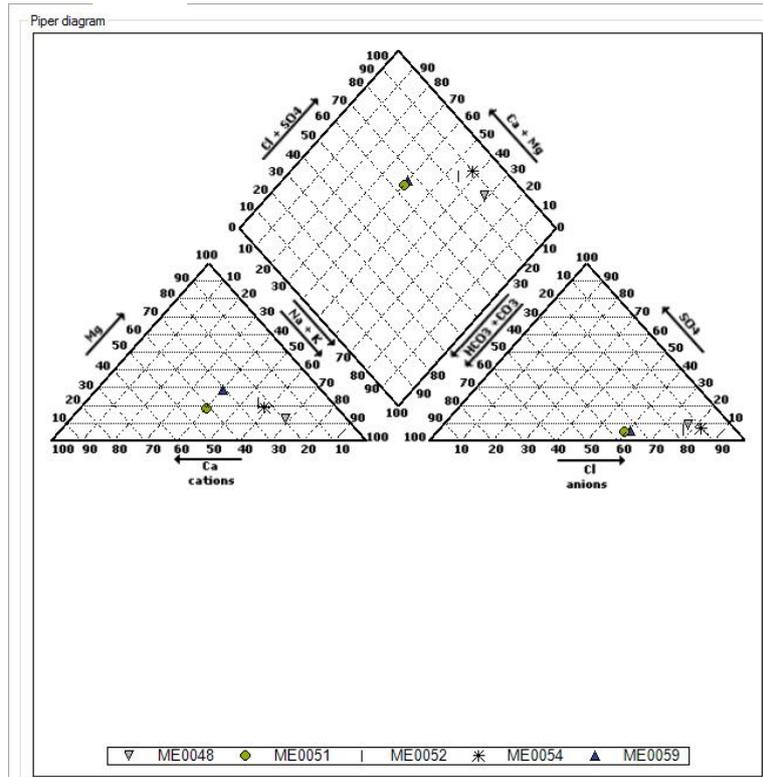


Diagrama de Piper. Masa de Agua *Ciudadella*, Zona contacto *Es Migjorn*. Octubre 2014.

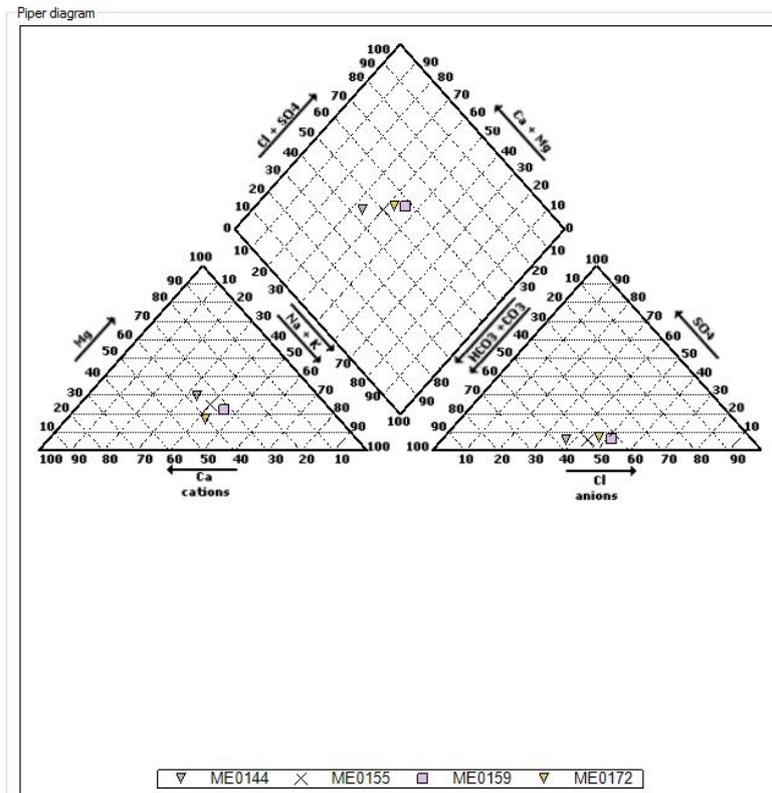


Diagrama de Piper. Masa de Agua *Ciudadella*, Zona Norte. Octubre 2014.

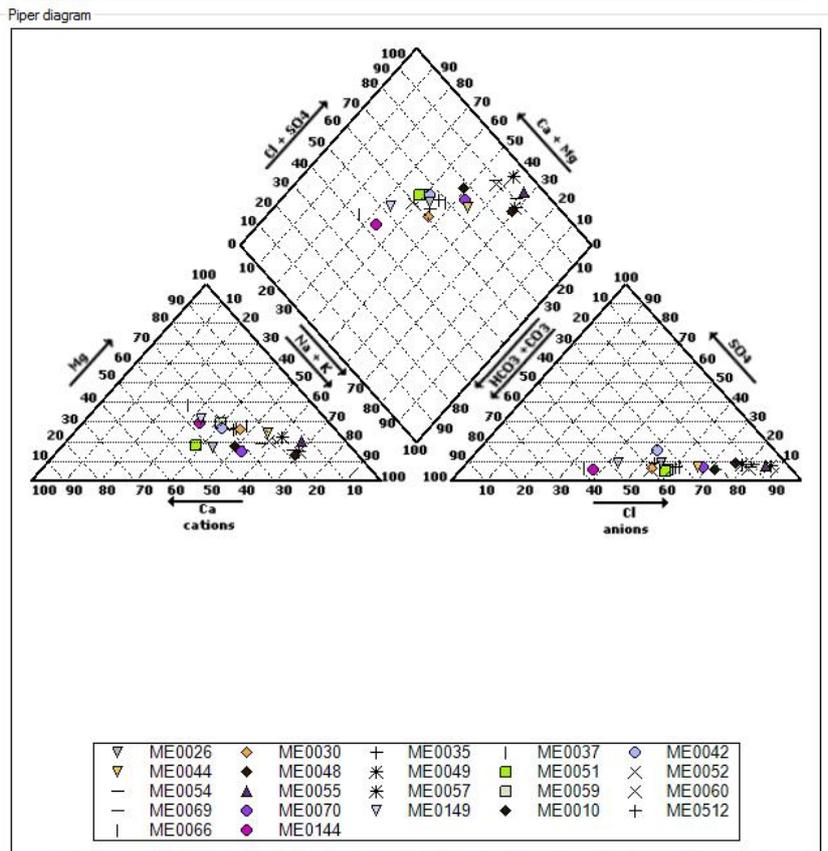
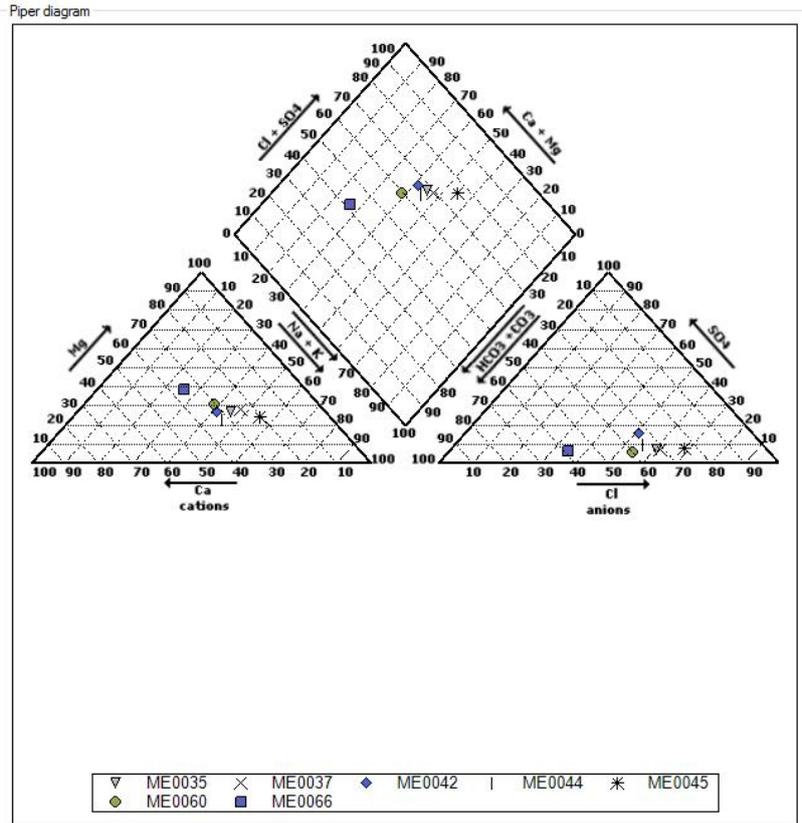


Diagrama de Schoeller-Berkaloff. Masa de Agua *Ciudadella*. Octubre 2014.

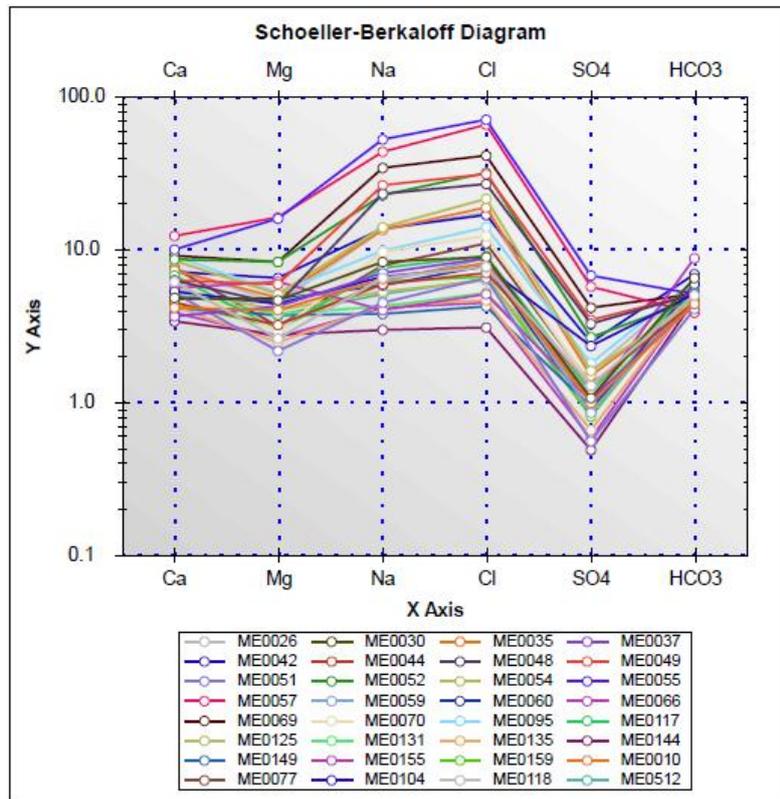


Diagrama de Schoeller-Berkaloff. Masa de Agua *Es Migjorn Gran*. Octubre 2014.

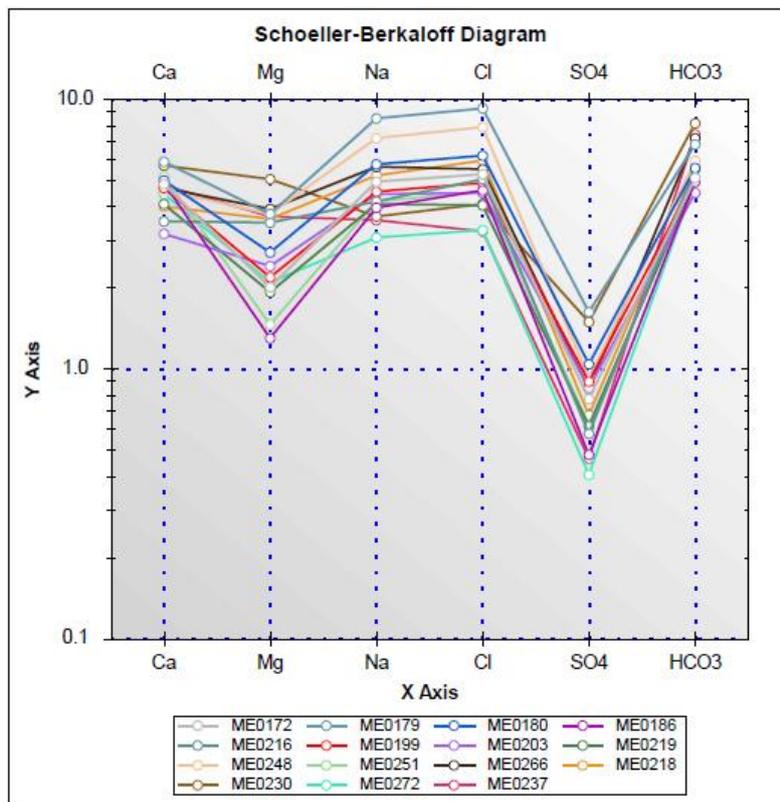


Diagrama de Schoeller-Berkaloff. Masa de Agua *Maó*. Octubre 2014.

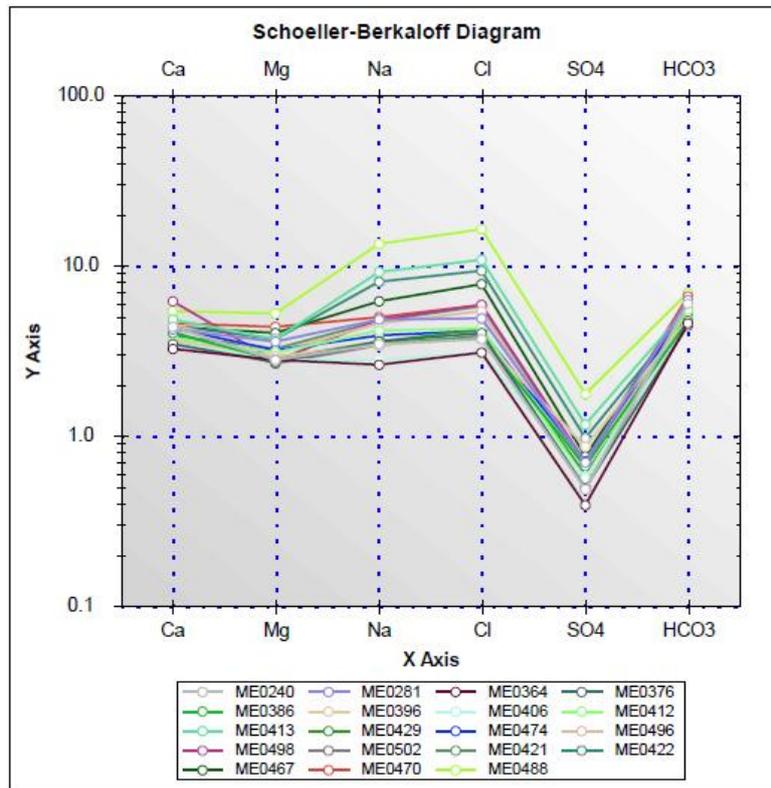


Diagrama de Schoeller-Berkaloff. Masa de Agua *Sa Roca*. Octubre 2014.

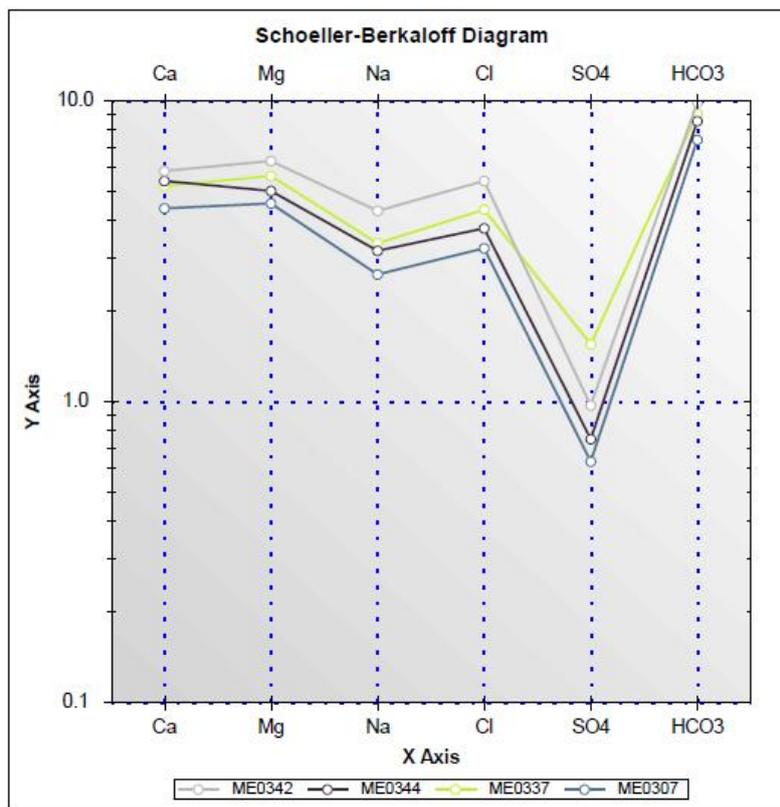


Diagrama de Schoeller-Berkaloff. Masa de Agua Ciutadella, Zona Caragolí. Octubre 2014.

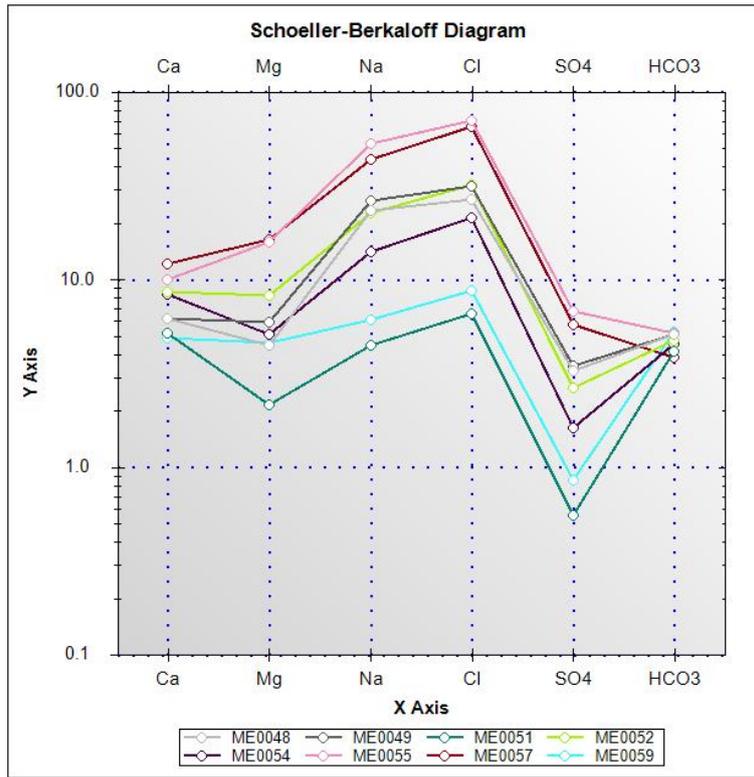
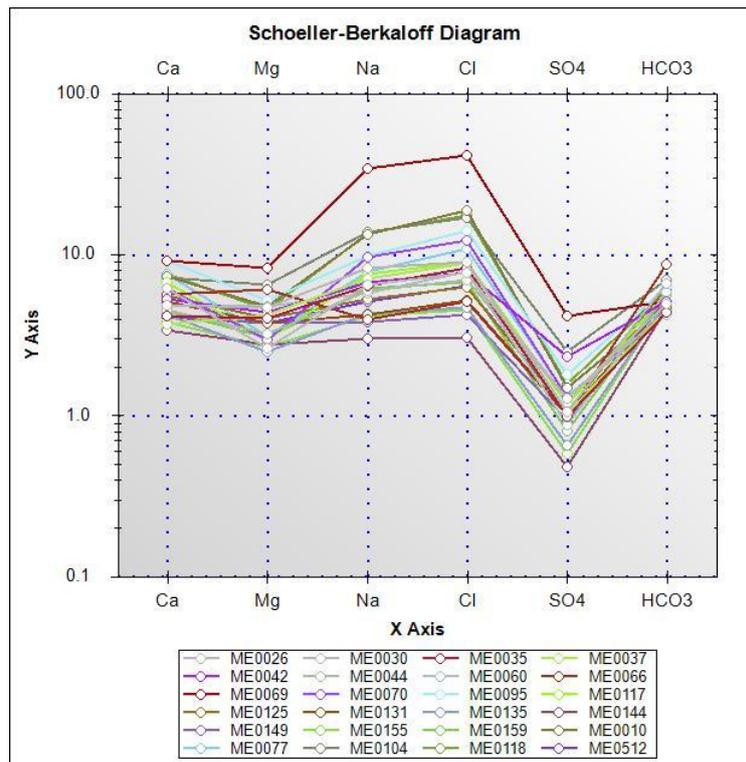
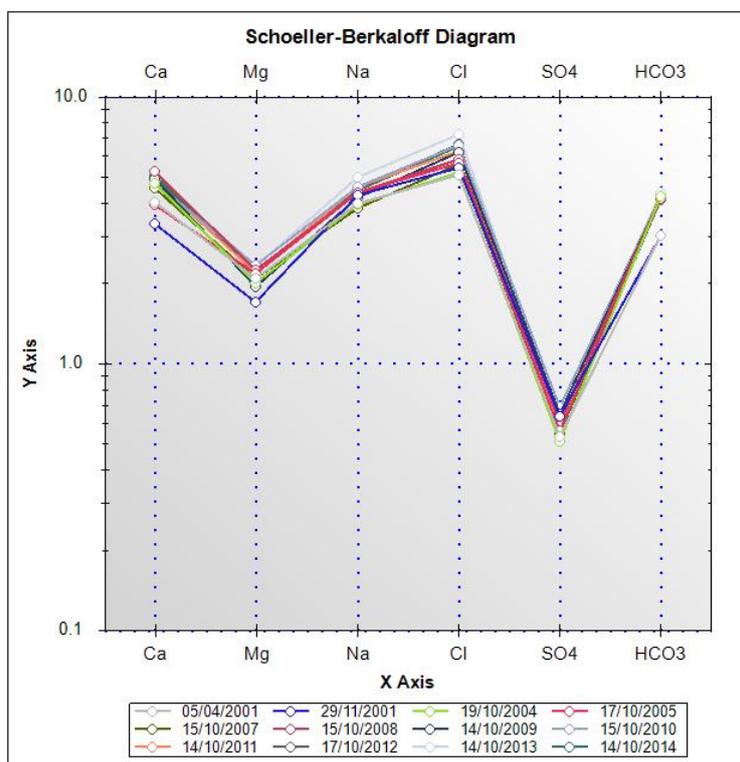


Diagrama de Schoeller-Berkaloff. Masa de Agua Ciutadella, sin Zona Caragolí. Oct.2014.

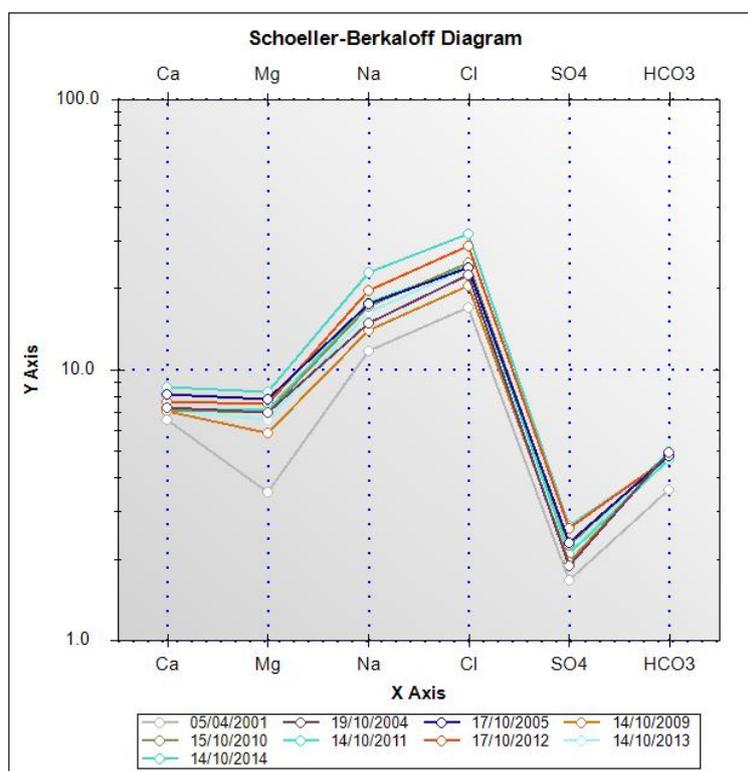


Diagramas de Schoeller-Berkaloff de Evolución en un mismo punto de control, pertenecientes a la Masa de Agua Ciutadella.

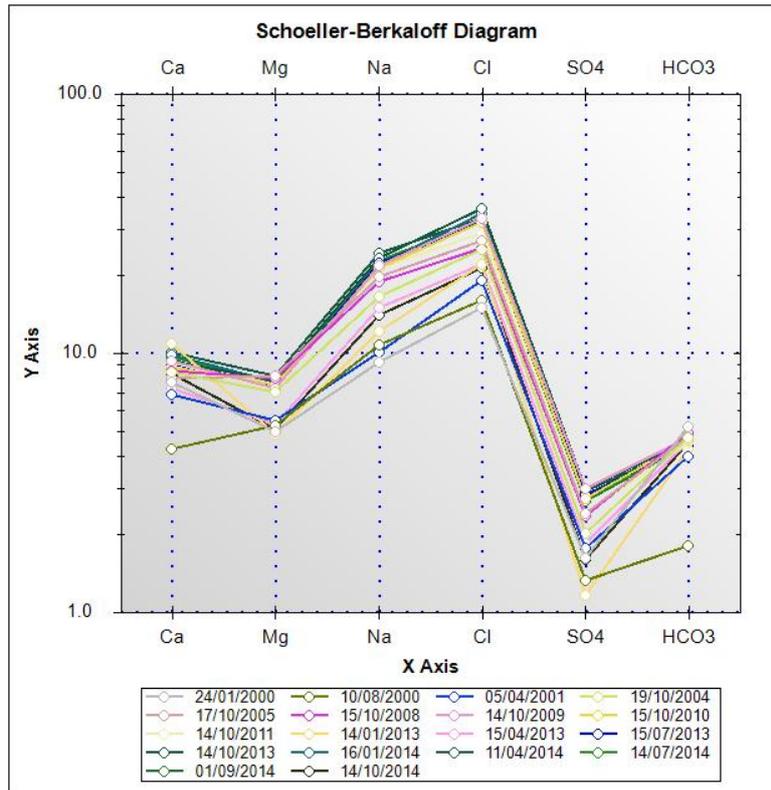
ME0051



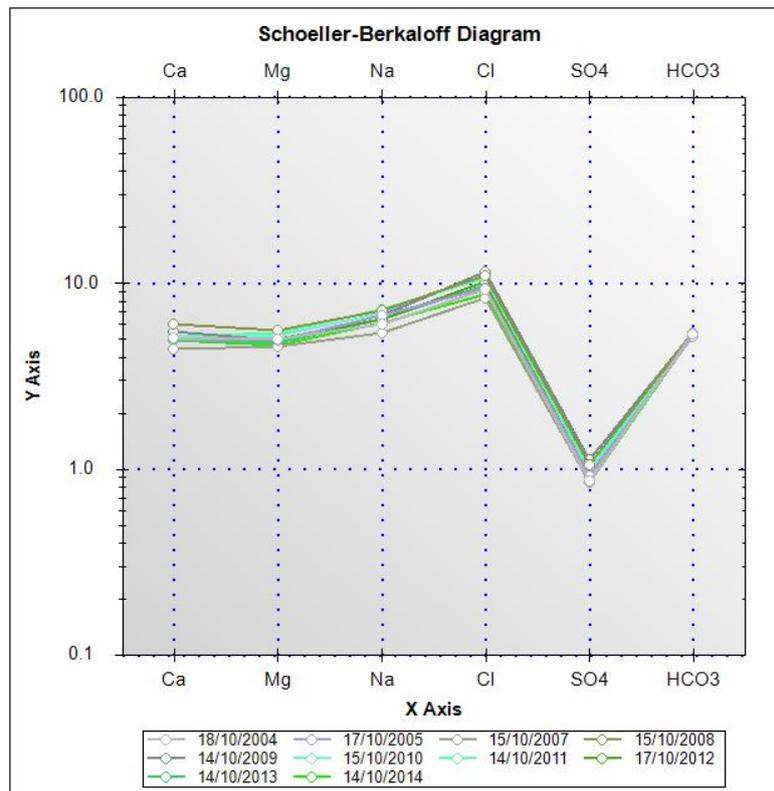
ME0052



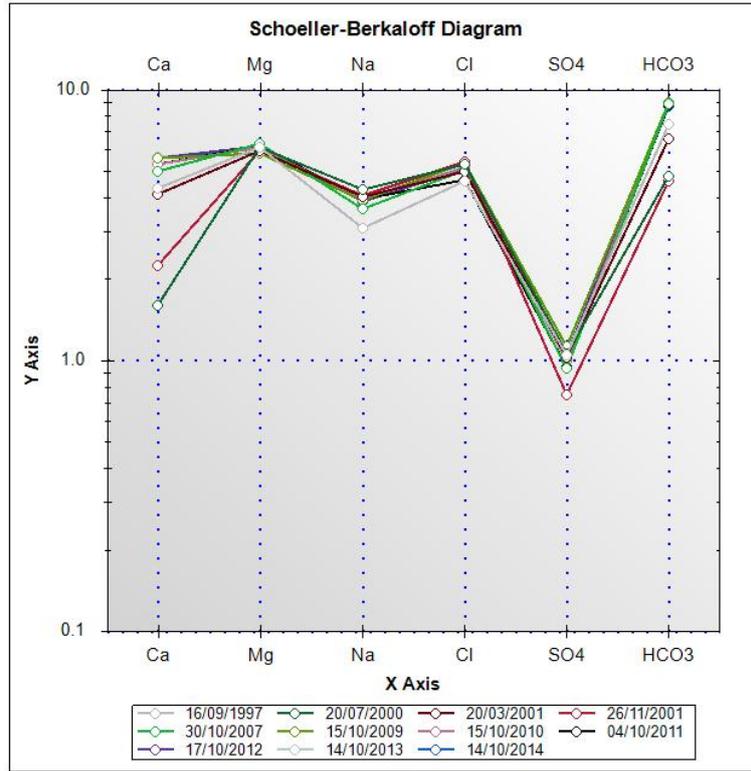
ME0054



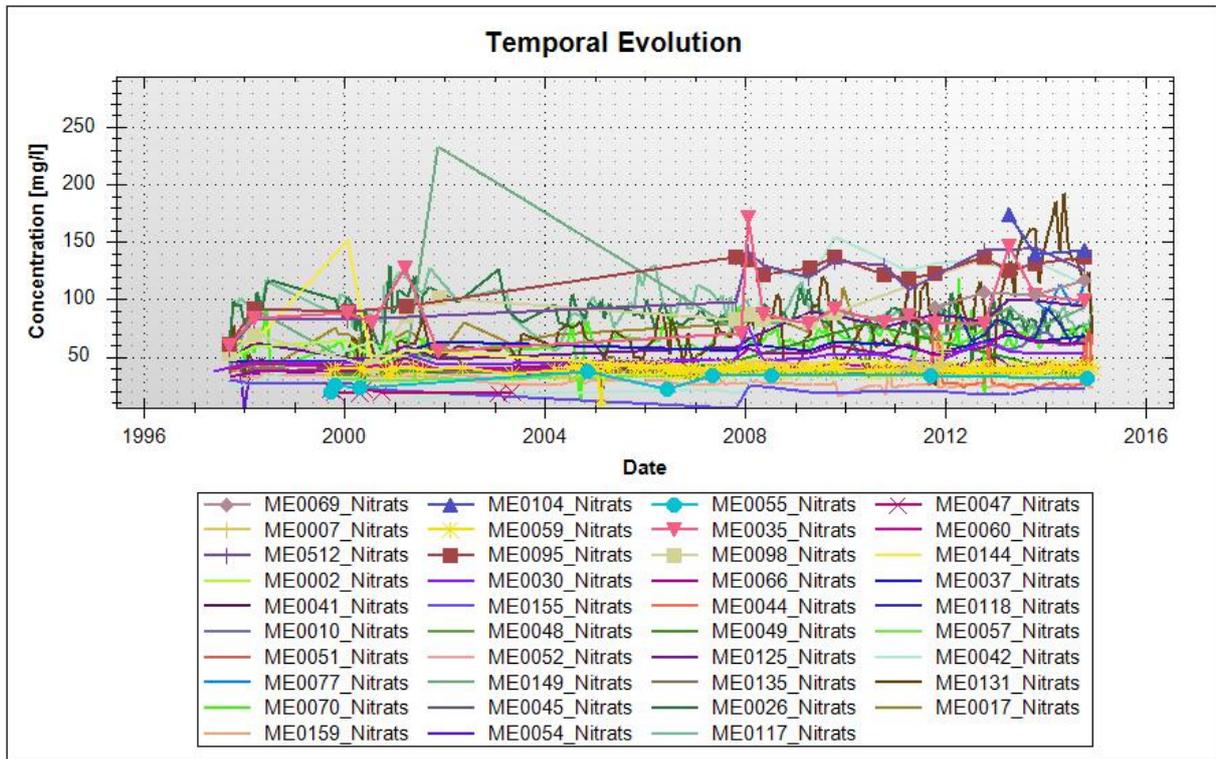
ME0059



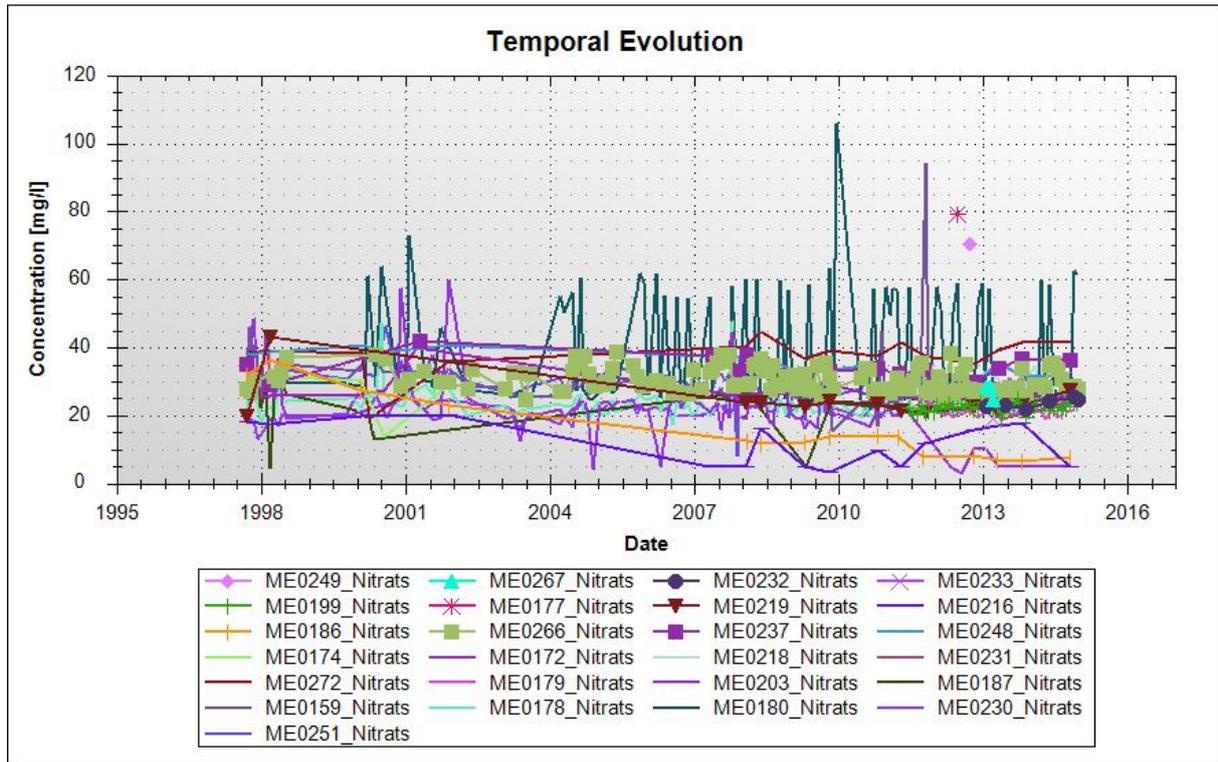
ME0066, Zona Ses Arenes



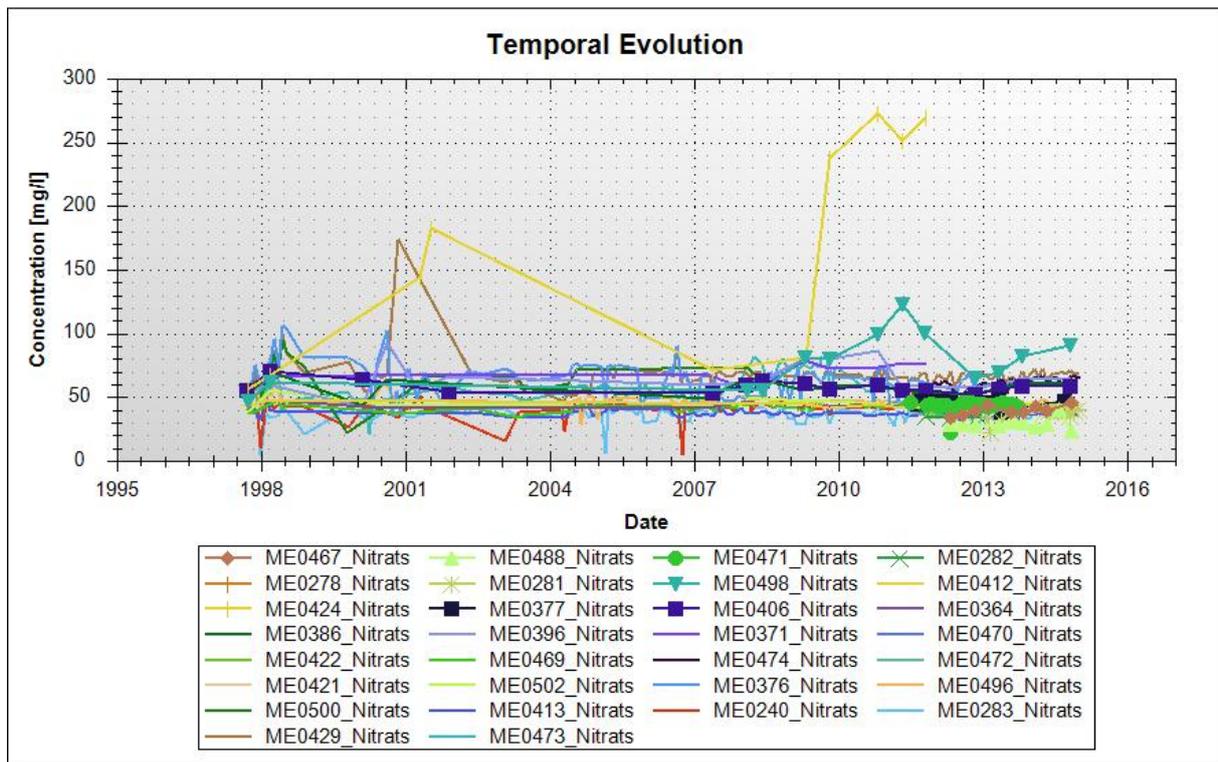
Evolución temporal del contenido en nitratos, en la Masa de Agua Ciutadella (1984-2014):

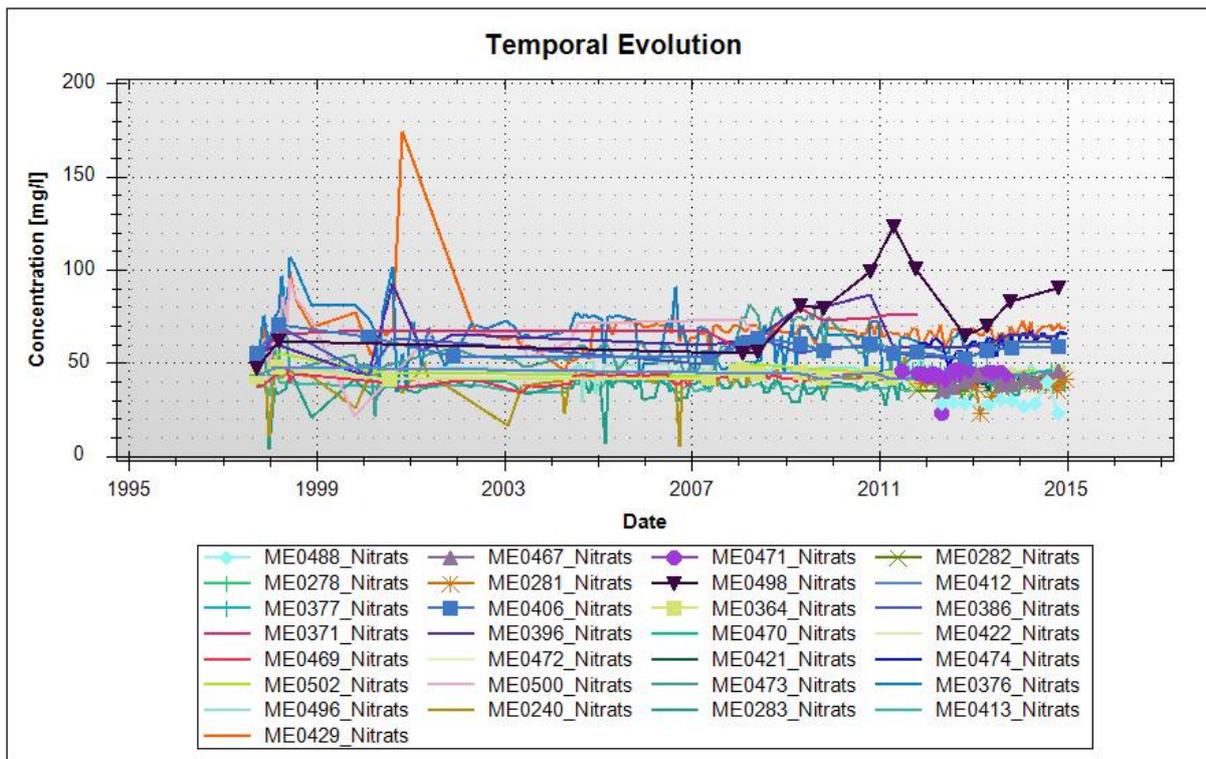


Evolución temporal del contenido en nitratos, en la Masa de Agua *Es Migjorn* (1984-2014):

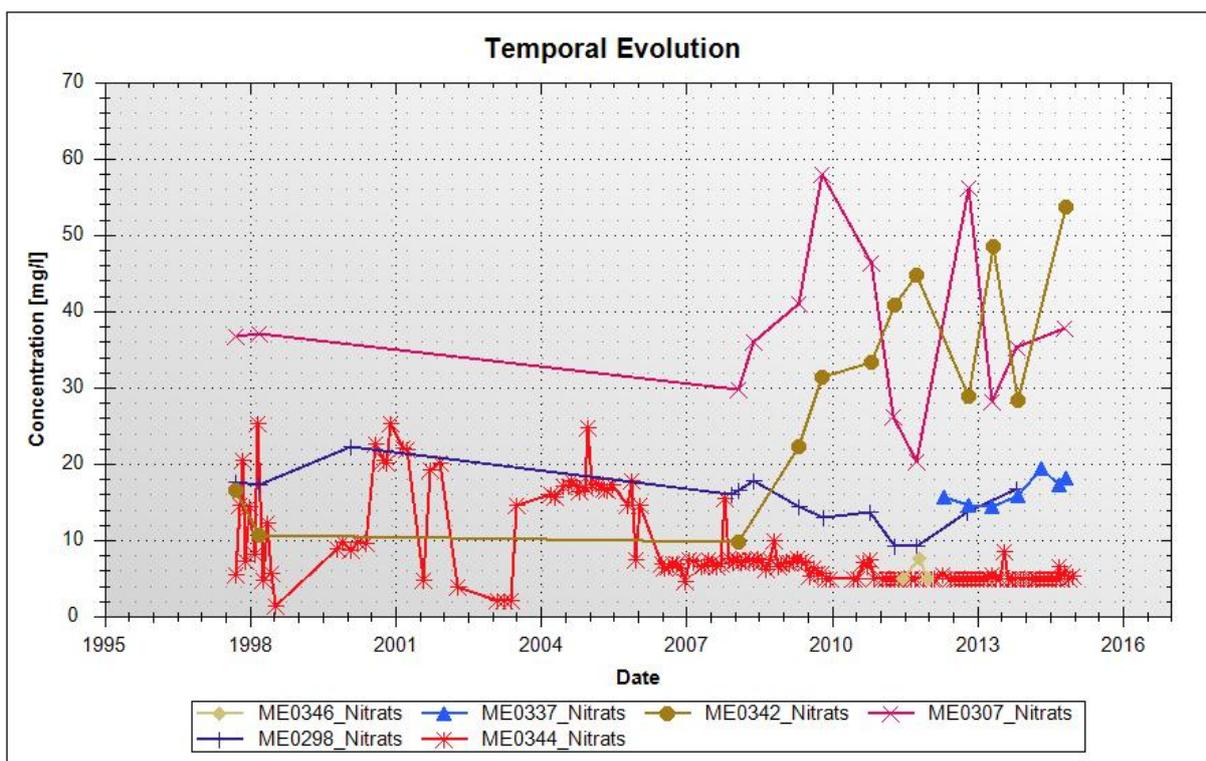


Evolución temporal del contenido en nitratos, en la Masa de Agua *Maó* (1984-2014):

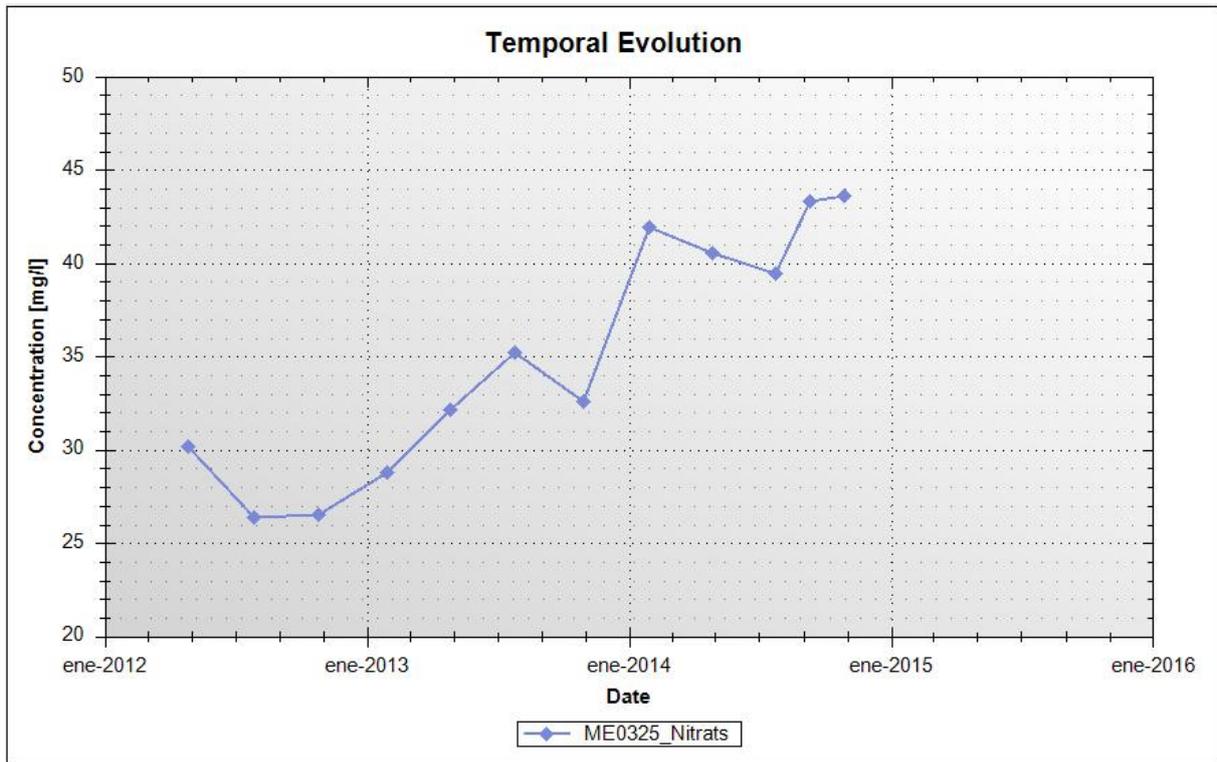




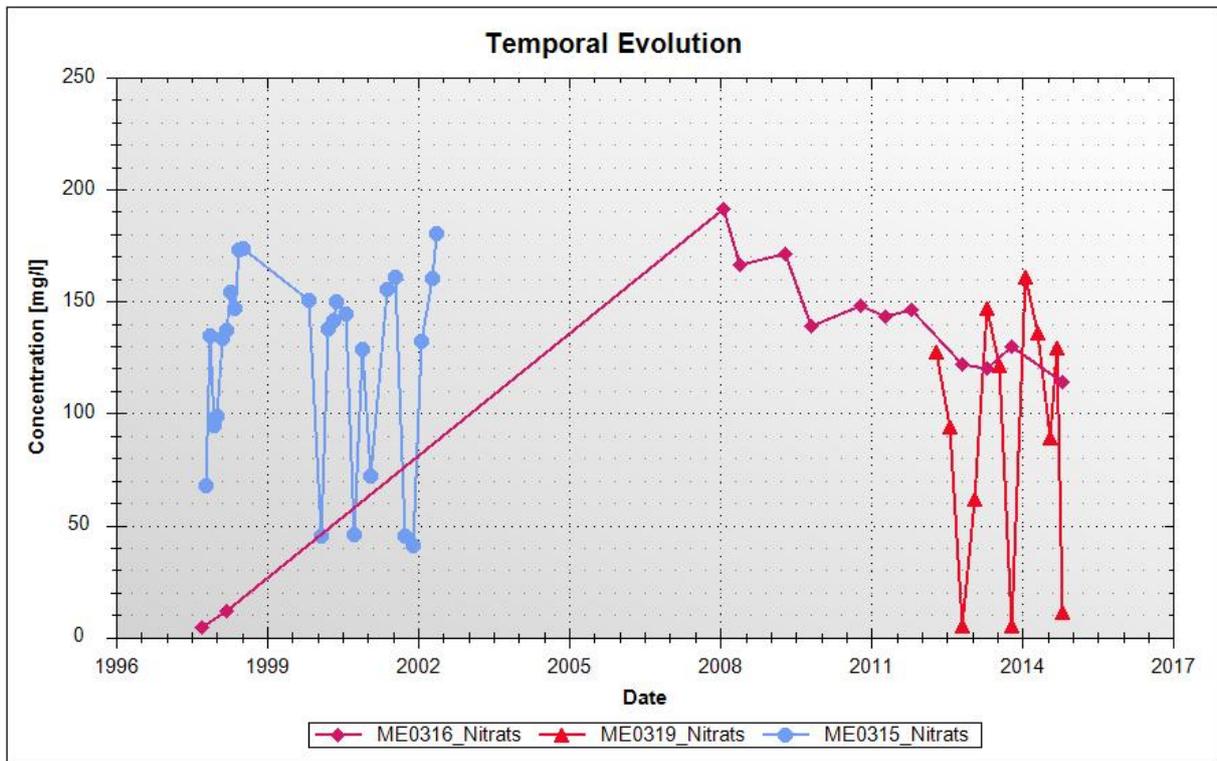
Evolución temporal del contenido en nitratos, en la Masa de Agua *Sa Roca* (1984-2014):



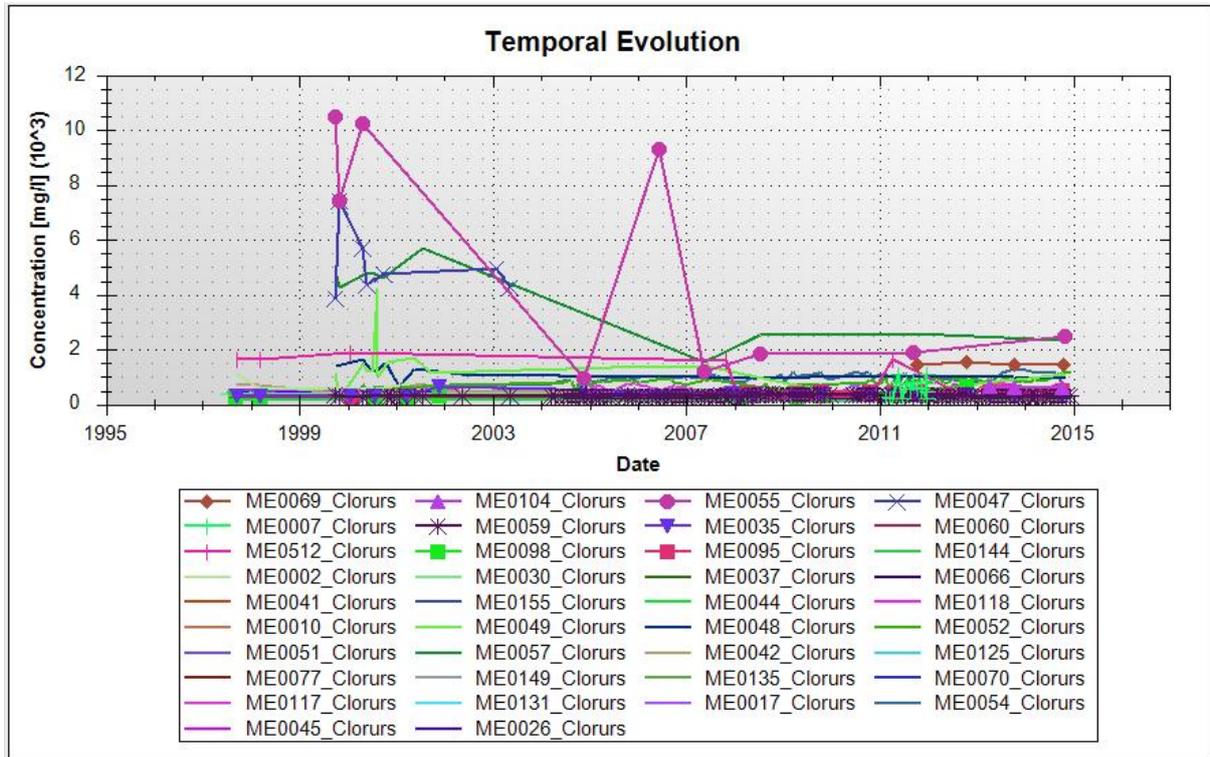
Evolución temporal del contenido en nitratos, en la Masa de Agua *Addaia* (1984-2014):



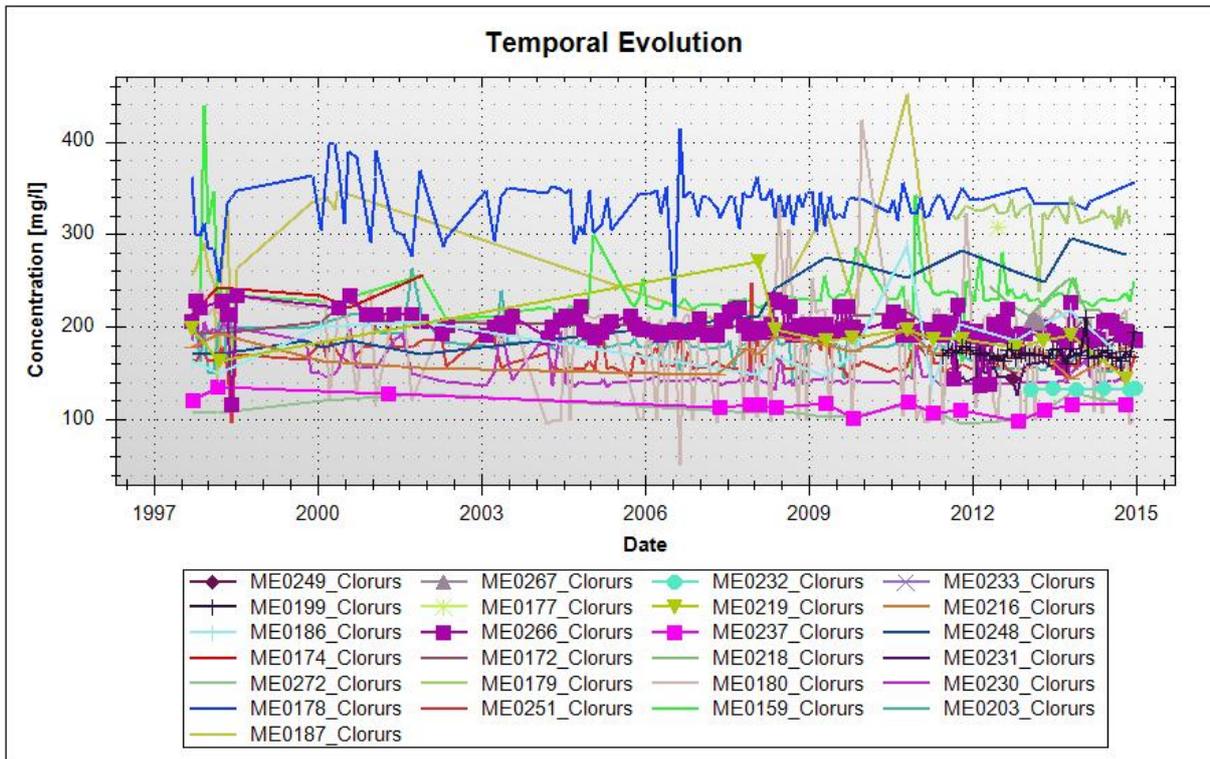
Evolución temporal del contenido en nitratos, en la Masa de Agua *Tirant* (1984-2014):



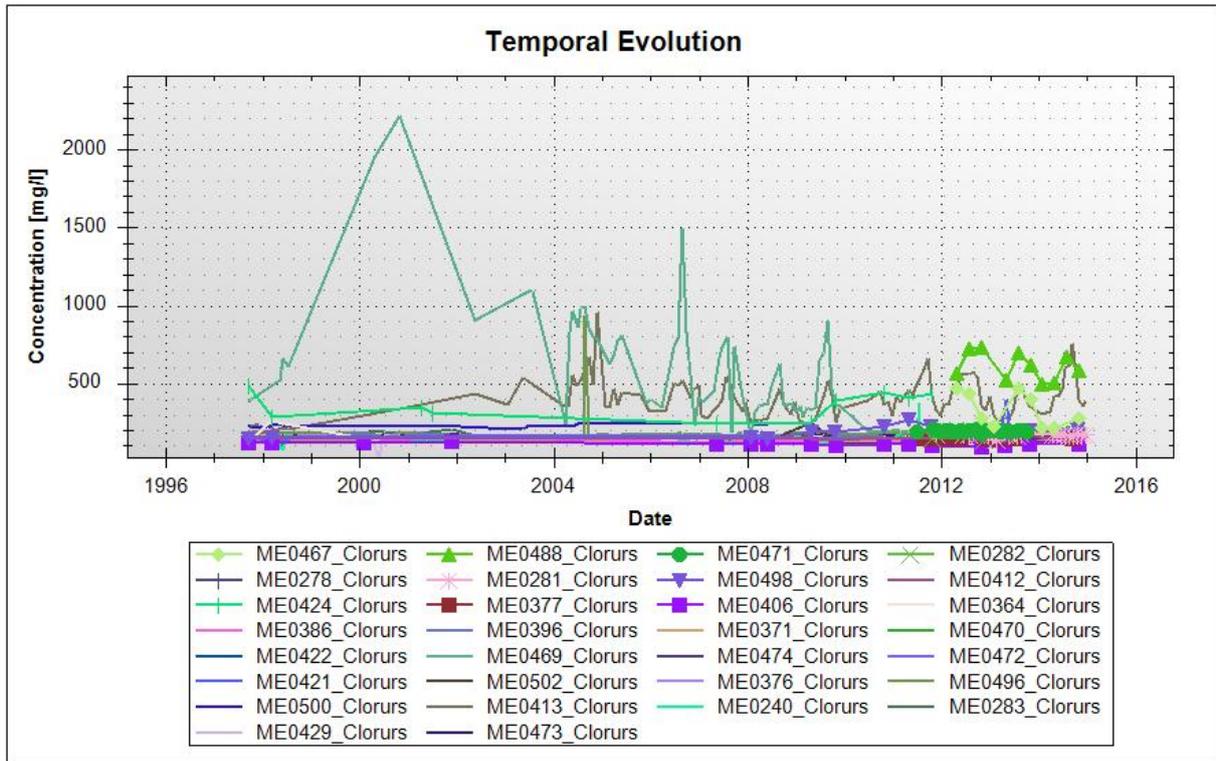
Evolución temporal del contenido en cloruros, en la Masa de Agua *Ciudadella* (1984-2014):



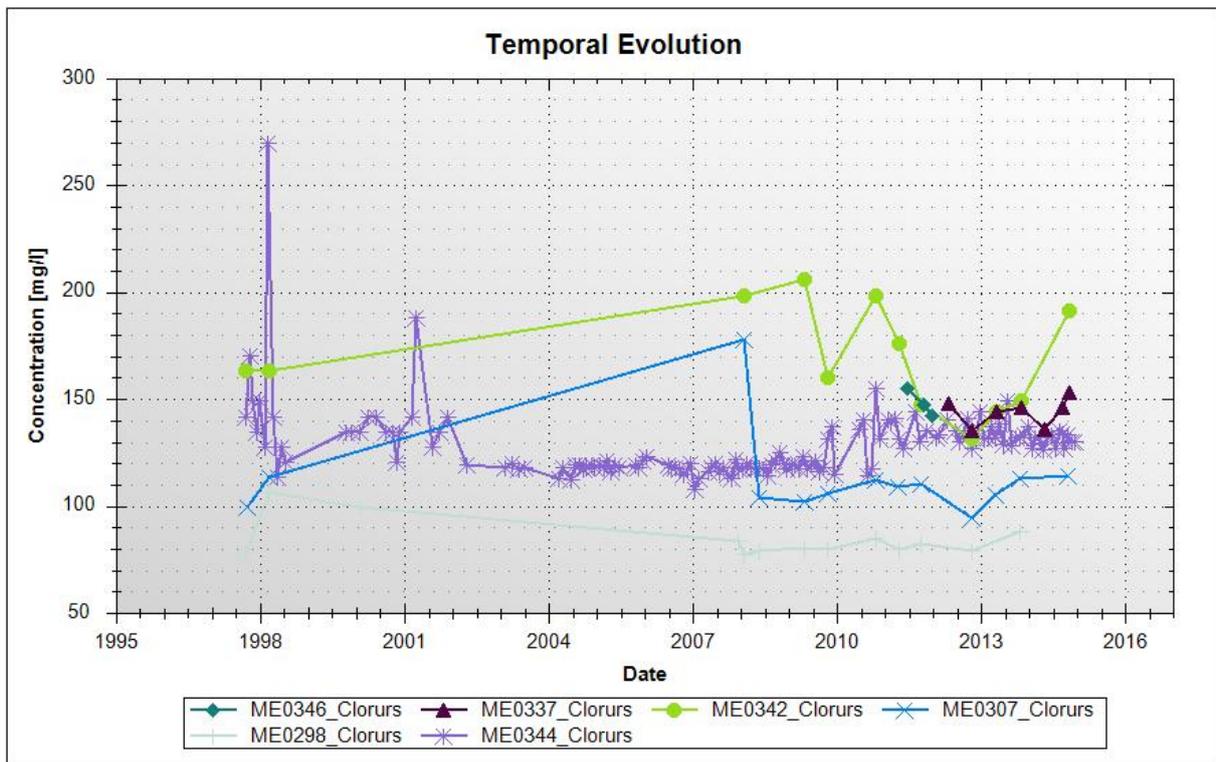
Evolución temporal del contenido en cloruros, en la Masa de Agua *Es Migjorn* (1984-2014):



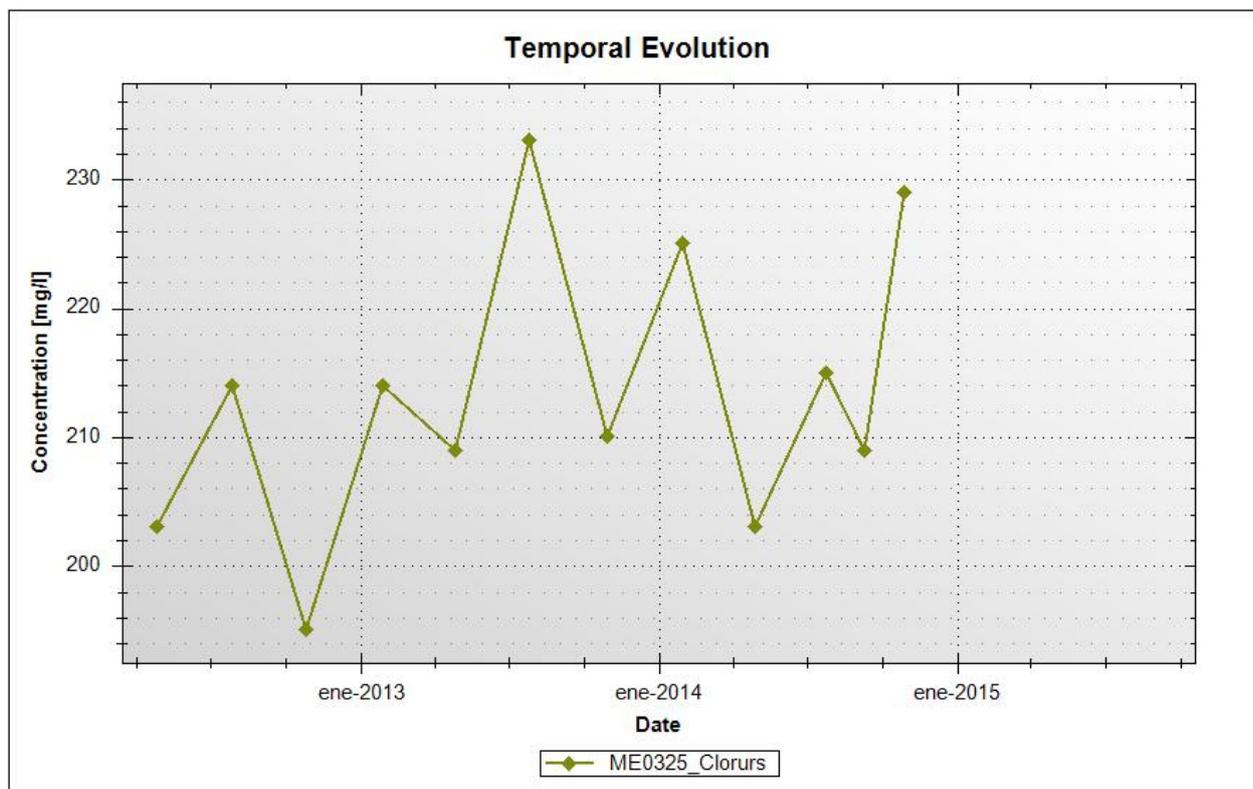
Evolución temporal del contenido en cloruros, en la Masa de Agua *Maó* (1984-2014):



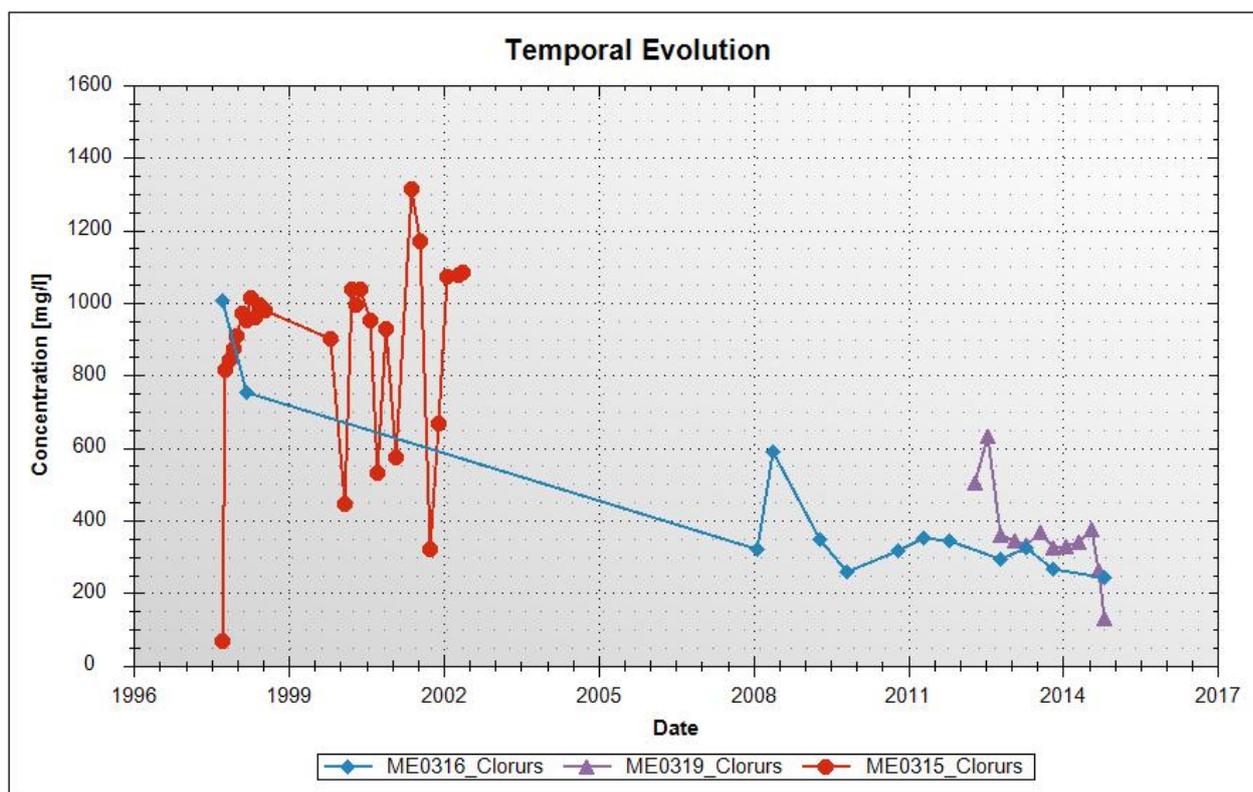
Evolución temporal del contenido en cloruros, en la Masa de Agua *Sa Roca* (1984-2014):



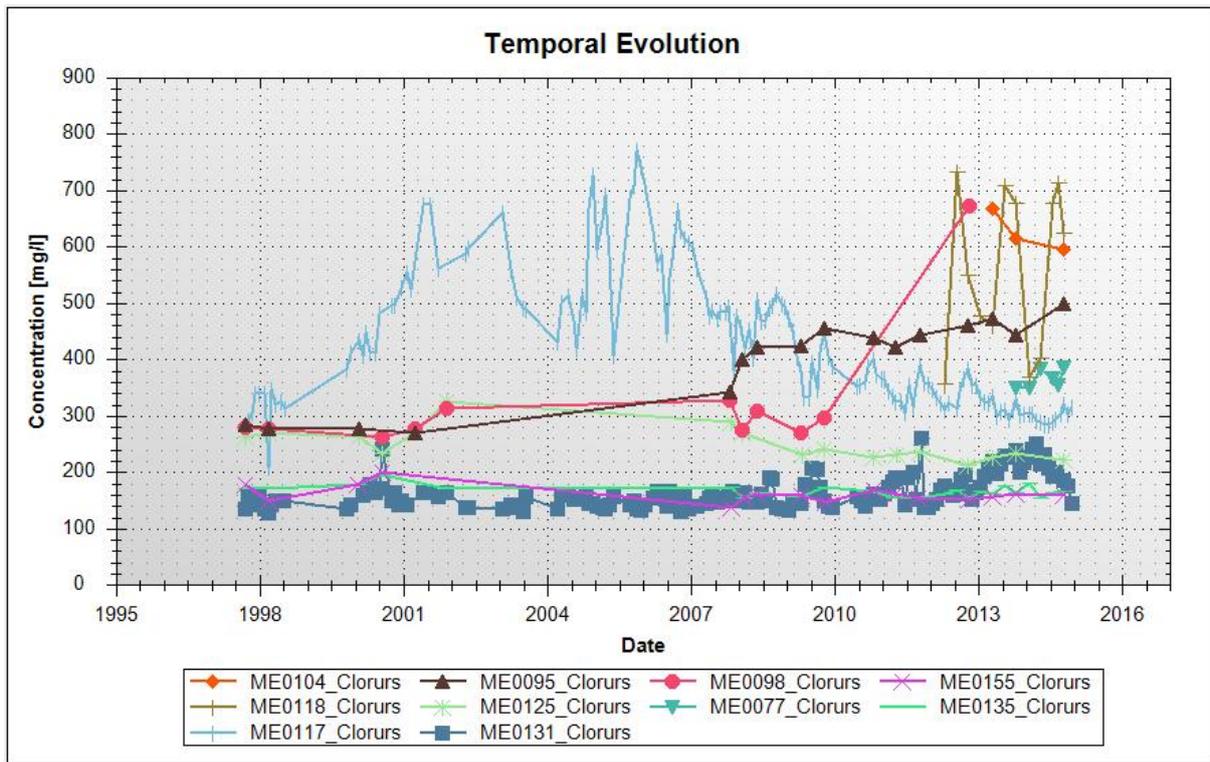
Evolución temporal del contenido en cloruros, en la Masa de Agua *Addaia* (1984-2014):



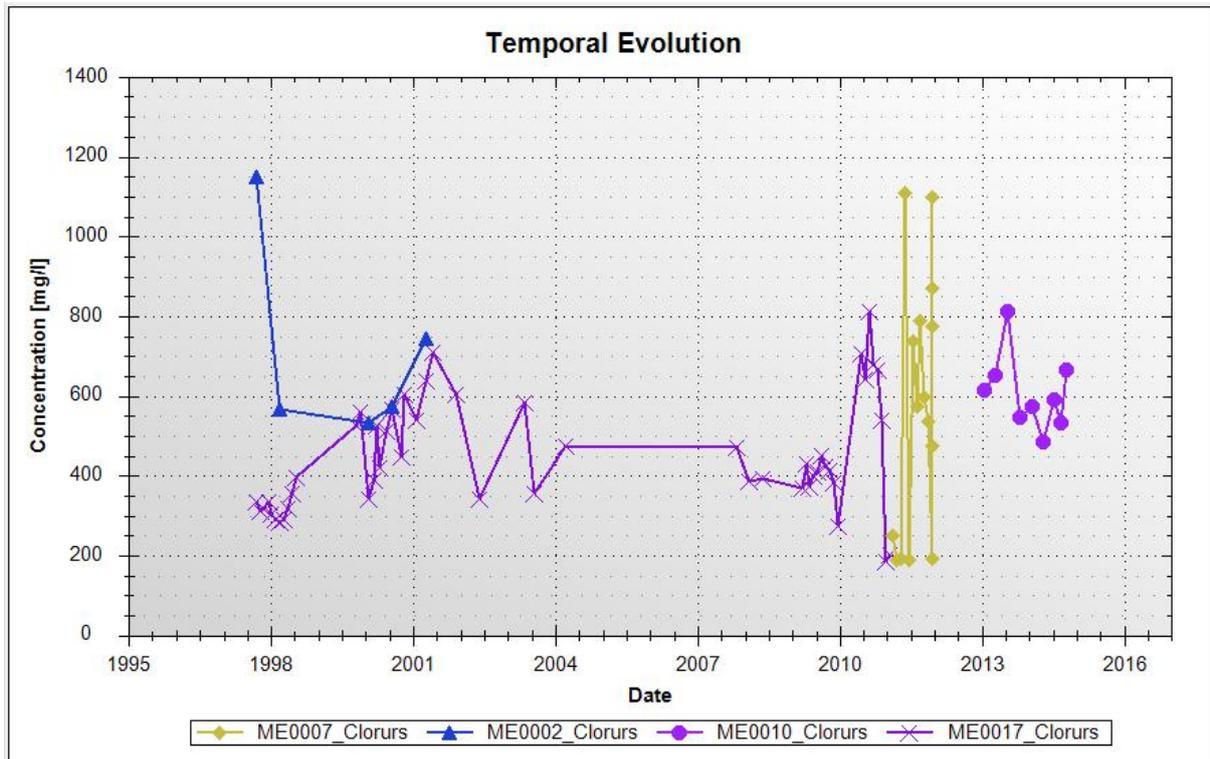
Evolución temporal del contenido en cloruros, en la Masa de Agua *Tirant* (1984-2014):



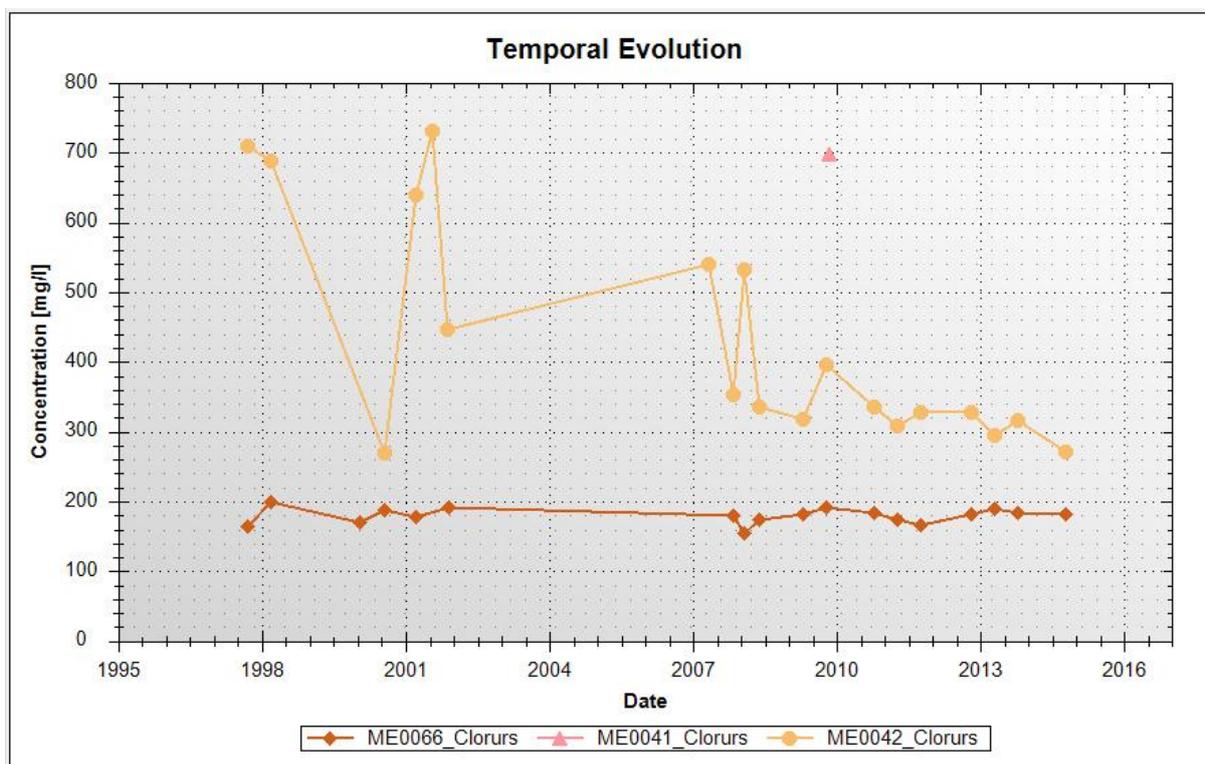
Evolución temporal del contenido en cloruros, en la Masa de Agua Ciutadella, Zona Sud (1984-2014):



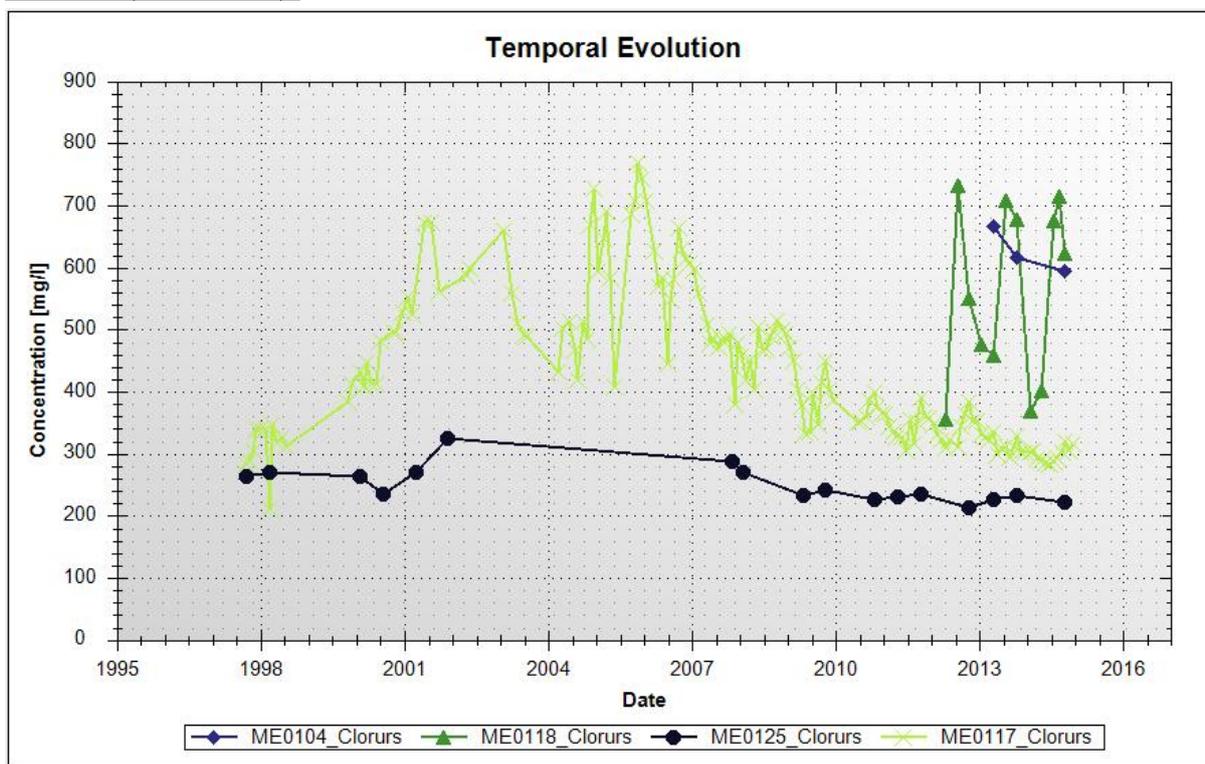
Evolución temporal del contenido en cloruros, en la Masa de Agua Ciutadella, Zona Los Delfines (1984-2014):



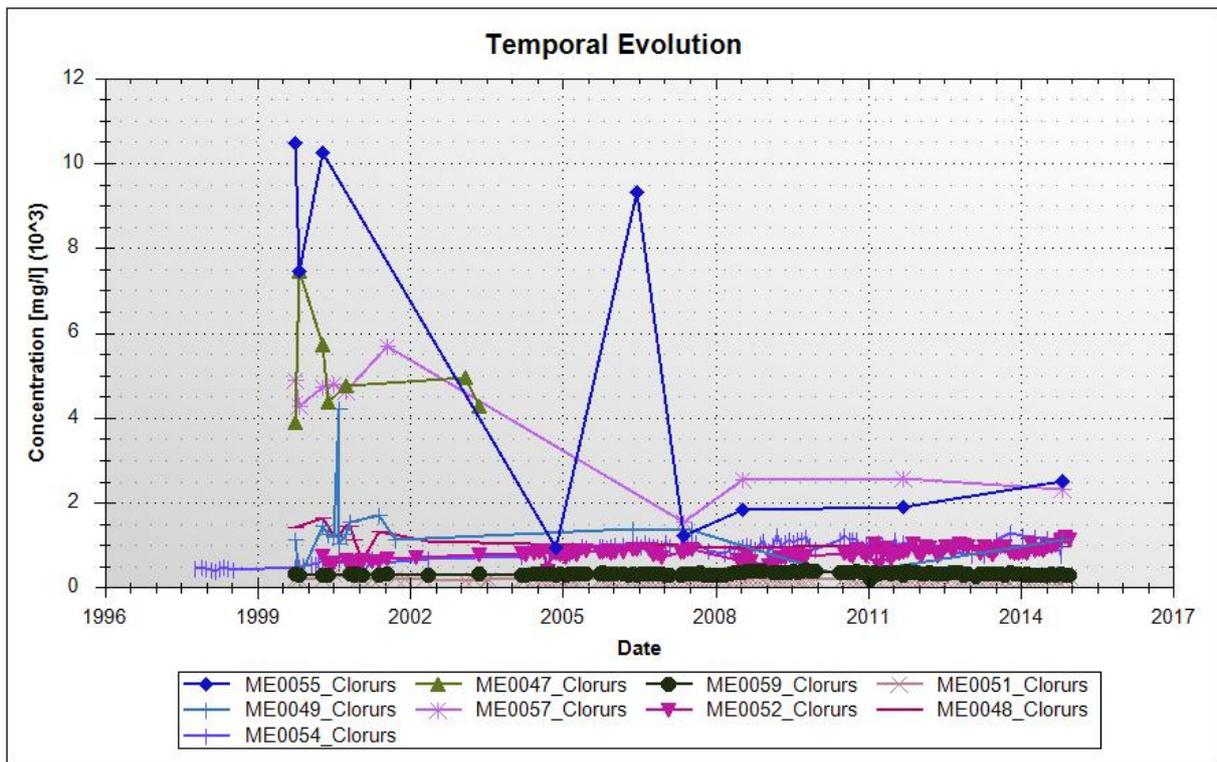
Evolución temporal del contenido en cloruros, en la Masa de Agua *Ciudadella*, Zona acuífero Jurásico (1984-2014):



Evolución temporal del contenido en cloruros, en la Masa de Agua *Ciudadella*, Zona Cap d'Artuitx (1984-2014):

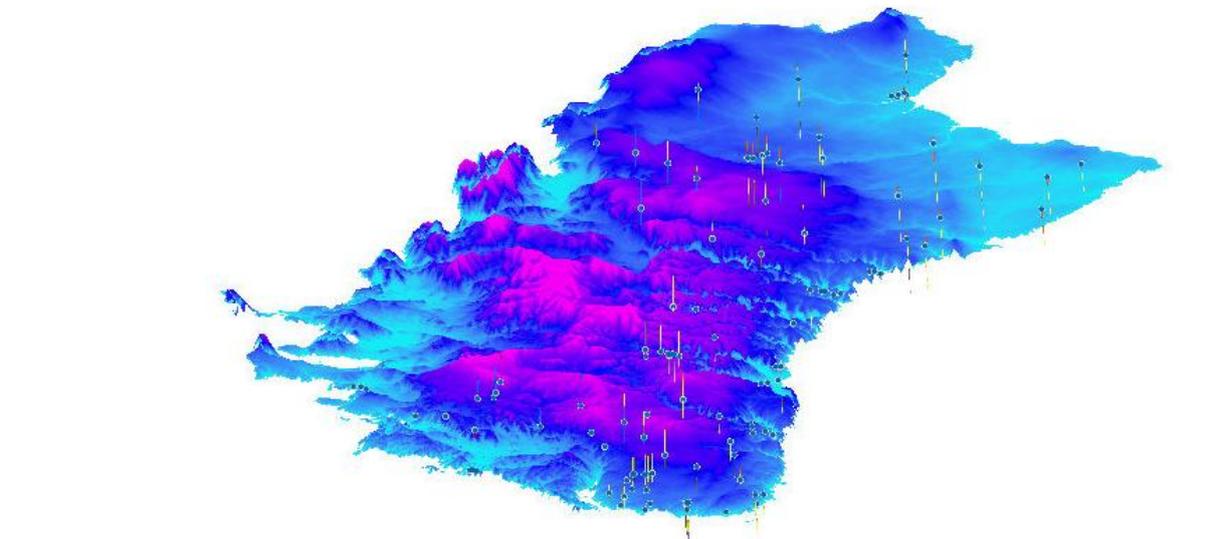
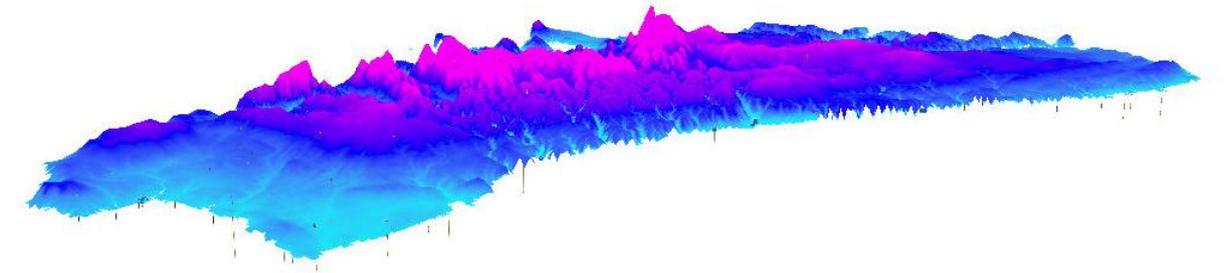
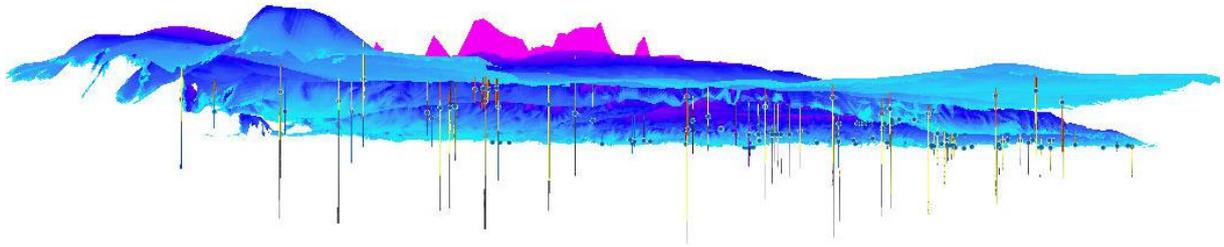


Evolución temporal del contenido en cloruros, en la Masa de Agua *Ciudadella*, Zona *Es Caragolí* (1984-2014):



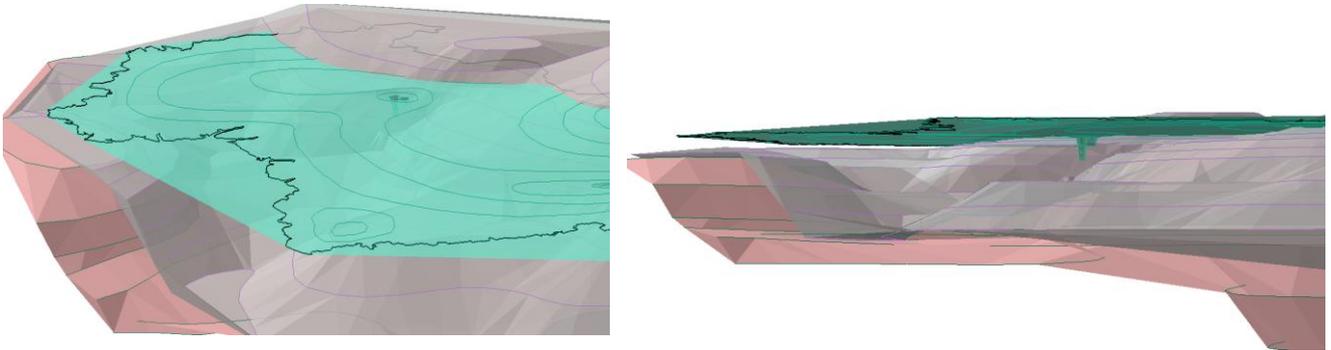
ANEXO 5. RESULTADOS HEROS

Vistas 3D de *Interpretation Tubes*, para la isla de Menorca

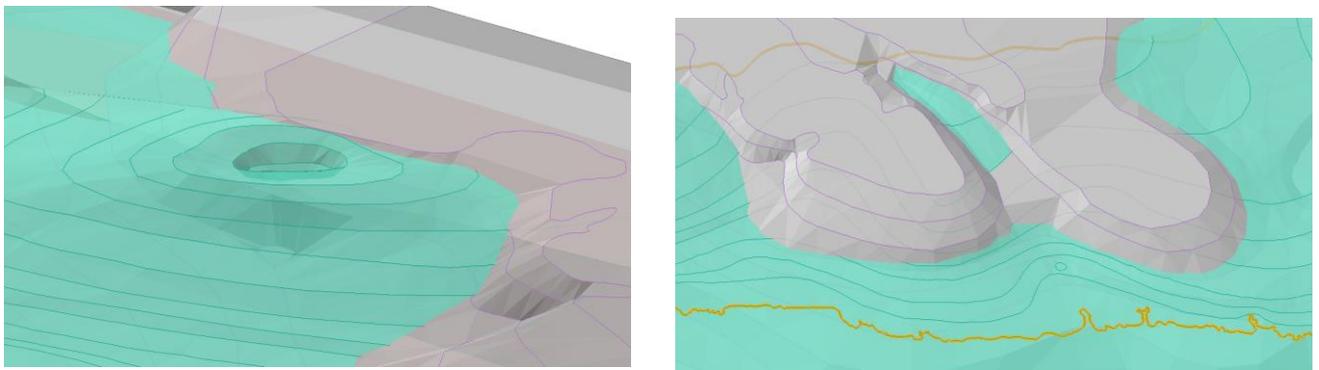


Vistas 3D de detalle, Intersección de la Piezometría con la superficie del techo T1-T2, Unidad Basal

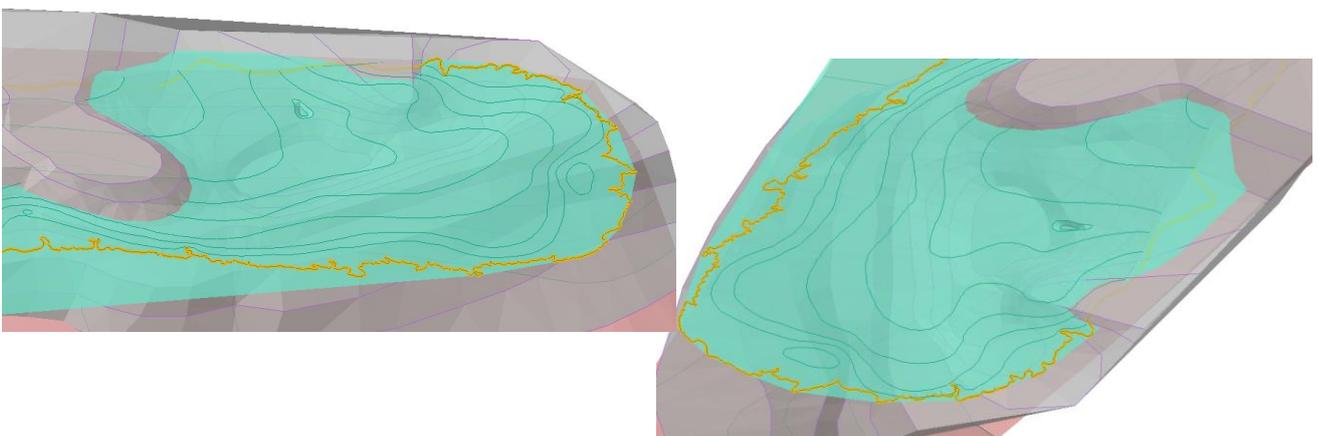
Ciudadella, vista del cono de bombeo (extracciones Ayuntamiento Ciudadella) e intersección de la piezometría con la Subunidad T1, al Nor-Este de la Masa:



Es Migjorn Gran, cono de bombeo zona centro-Norte (extracciones Ayuntamiento Es Migjorn) y zona Este (piezometría en Subunidad T1):



Maó, vista del cono de bombeo (extracciones Ayuntamiento de Maó) y base T1-T2:

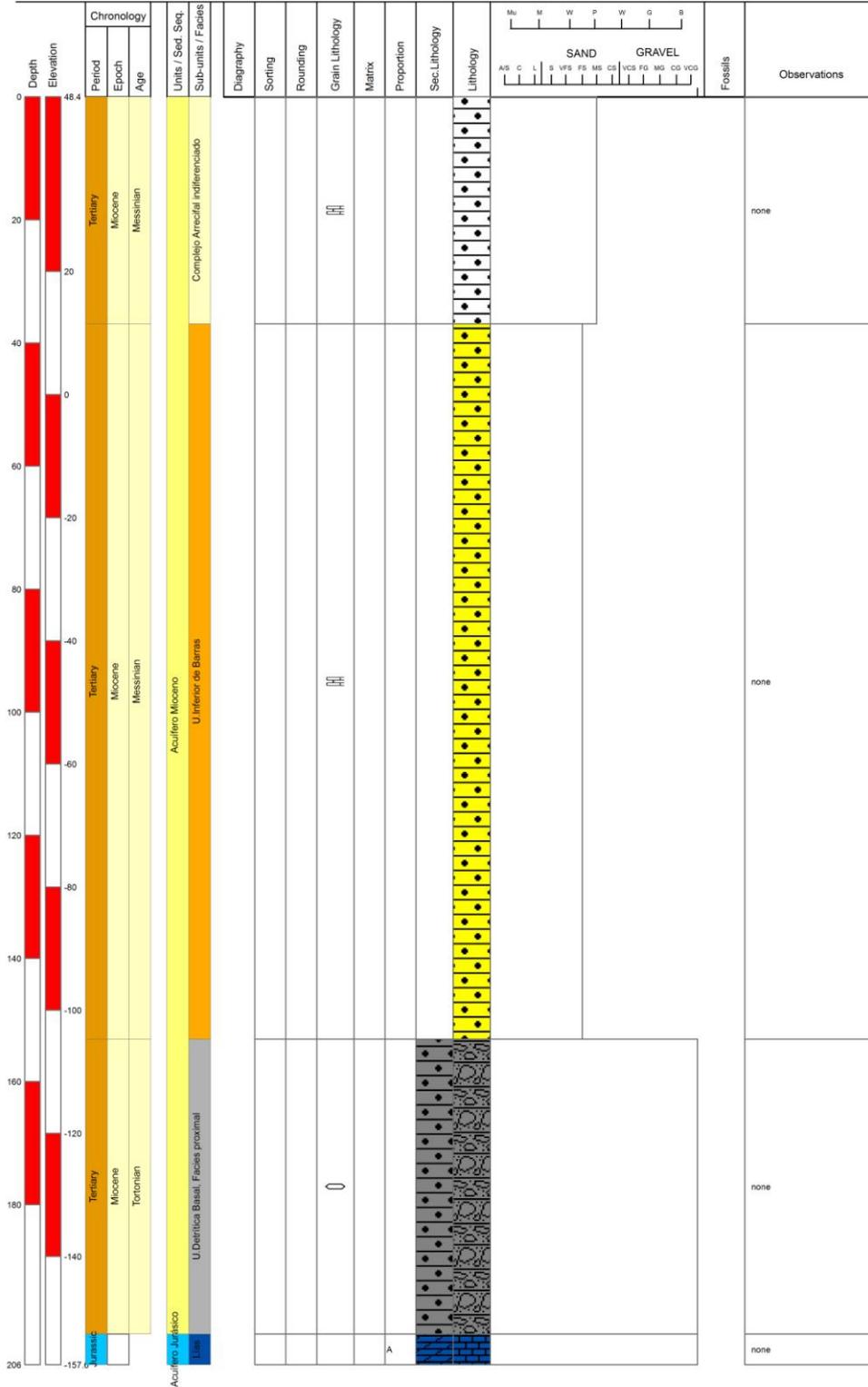


Borehole Diagram, para algunos representativos de la Masa de Agua Ciutadella

Name/Reference: C13 Es Caragoli
 BoreID: 10058
 Coordinates (UTM): ETRS_1989_UTM_Zone_31N
 X: 575132
 Y: 4429516
 Z: 48.4
 Depth (m): 206
 Core Recovery: N

Date:
 Author: BARÓN.A.

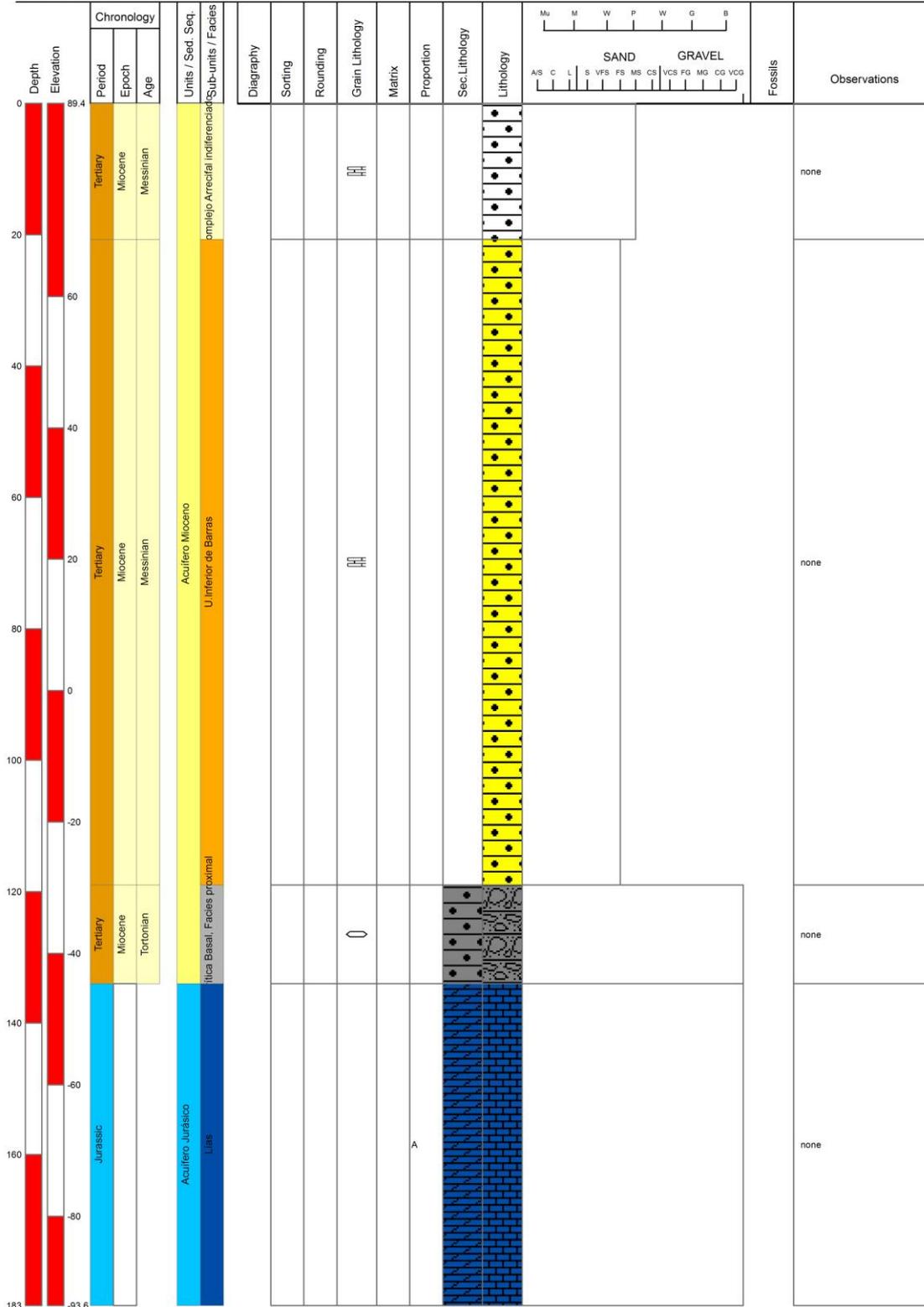
Vertical Scale: 1:500



Name/Reference: C15 Son Bernardi
 BoreID: 10031
 Coordinates (UTM): ETRS_1989_UTM_Zone_31N
 X: 572569
 Y: 4432600
 Z: 89.4
 Depth (m): 183
 Core Recovery: N

Date:
 Author: BARÓN, A.

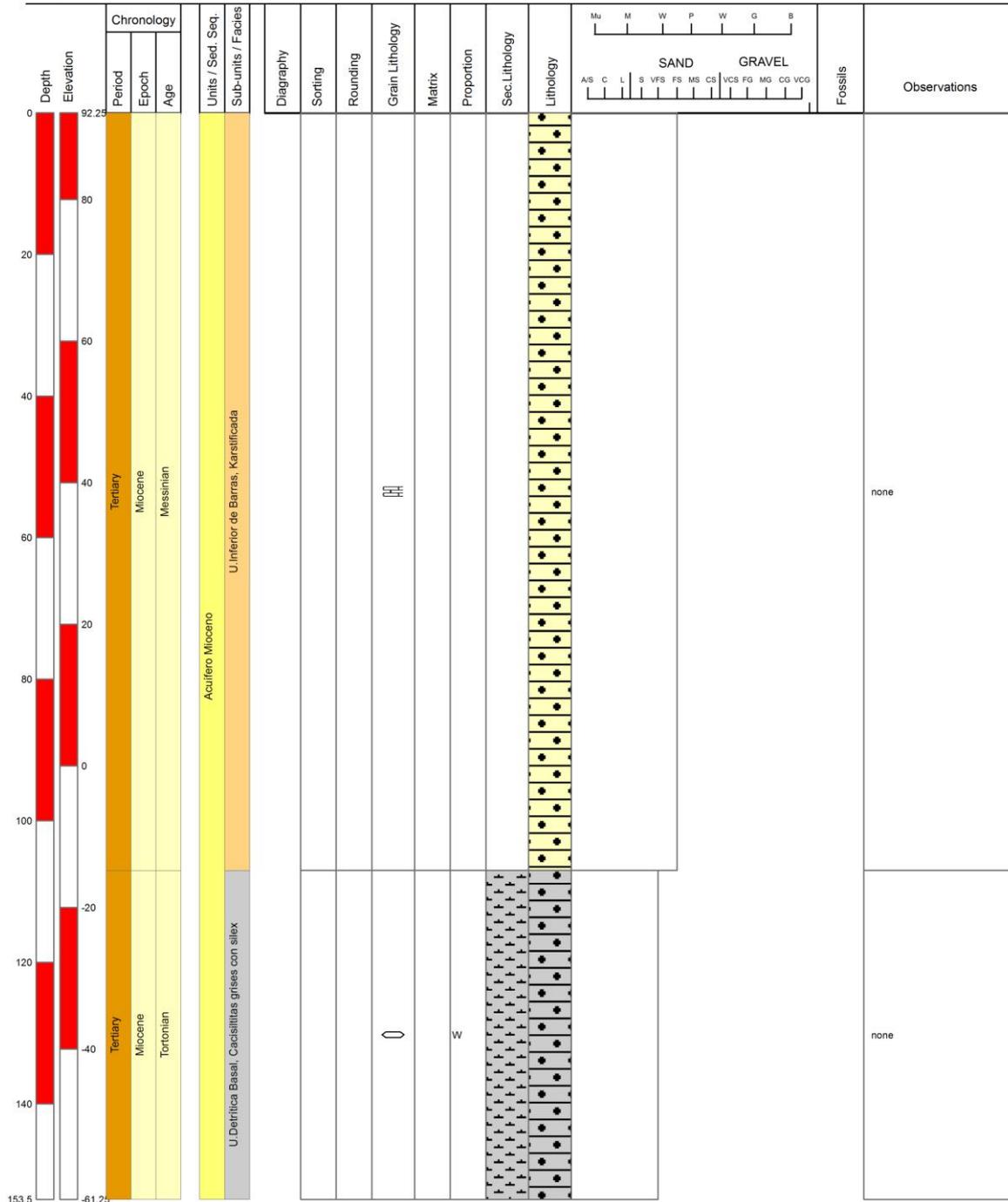
Vertical Scale: 1:500



Name/Reference: C28 Bella Ventura
 BoreID: 10151
 Coordinates (UTM): ETRS_1989_UTM_Zone_31N
 X: 578573
 Y: 4425320
 Z: 92.25
 Depth (m): 153.5
 Core Recovery: N

Date:
 Author: BARÓN,A.

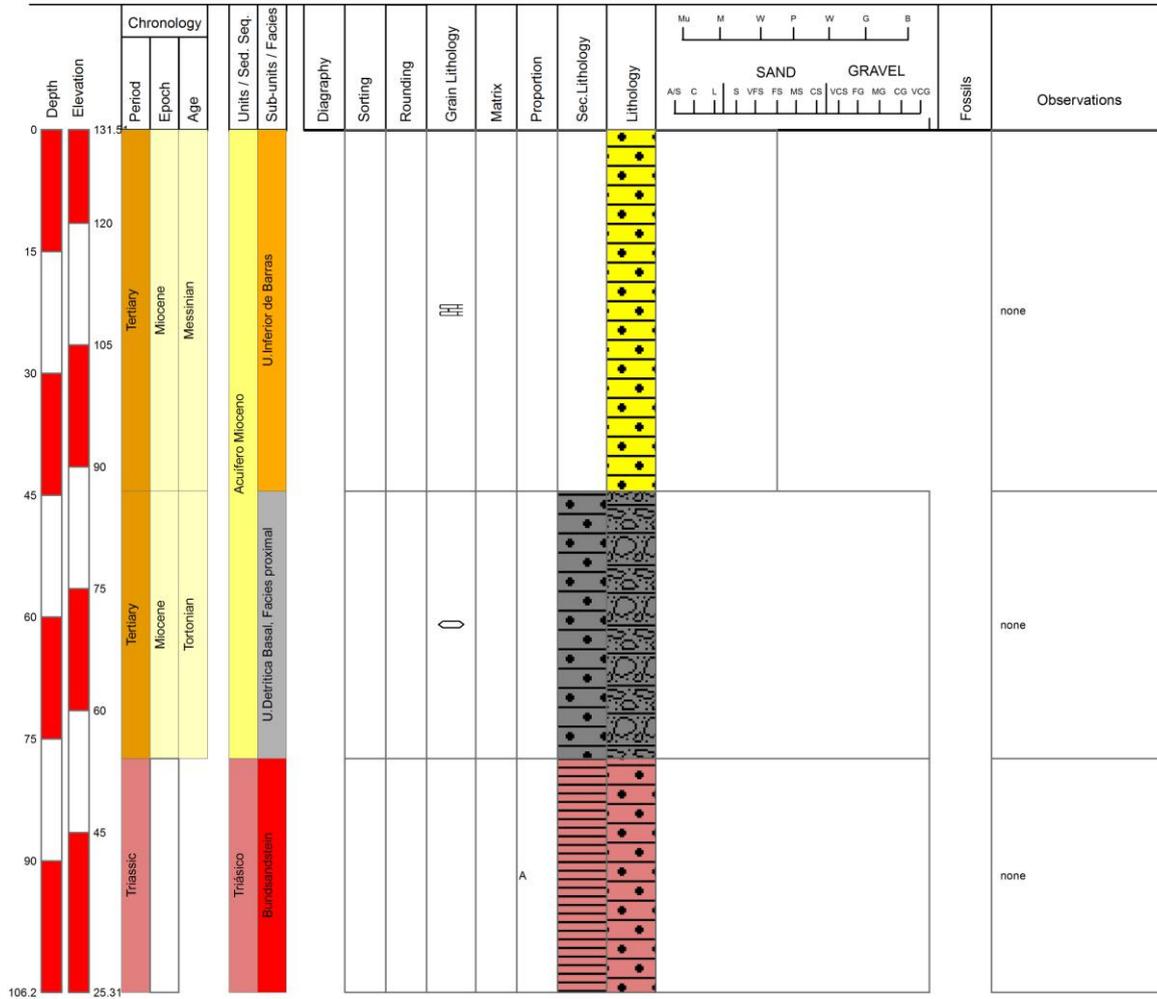
Vertical Scale: 1:500



Name/Reference: C38 Son Aparets
 BoreID: 10146
 Coordinates (UTM): ETRS_1989_UTM_Zone_31N
 X: 580228
 Y: 4427446
 Z: 131.51
 Depth (m): 106.2
 Core Recovery: N

Date:
 Author: BARÓN,A.

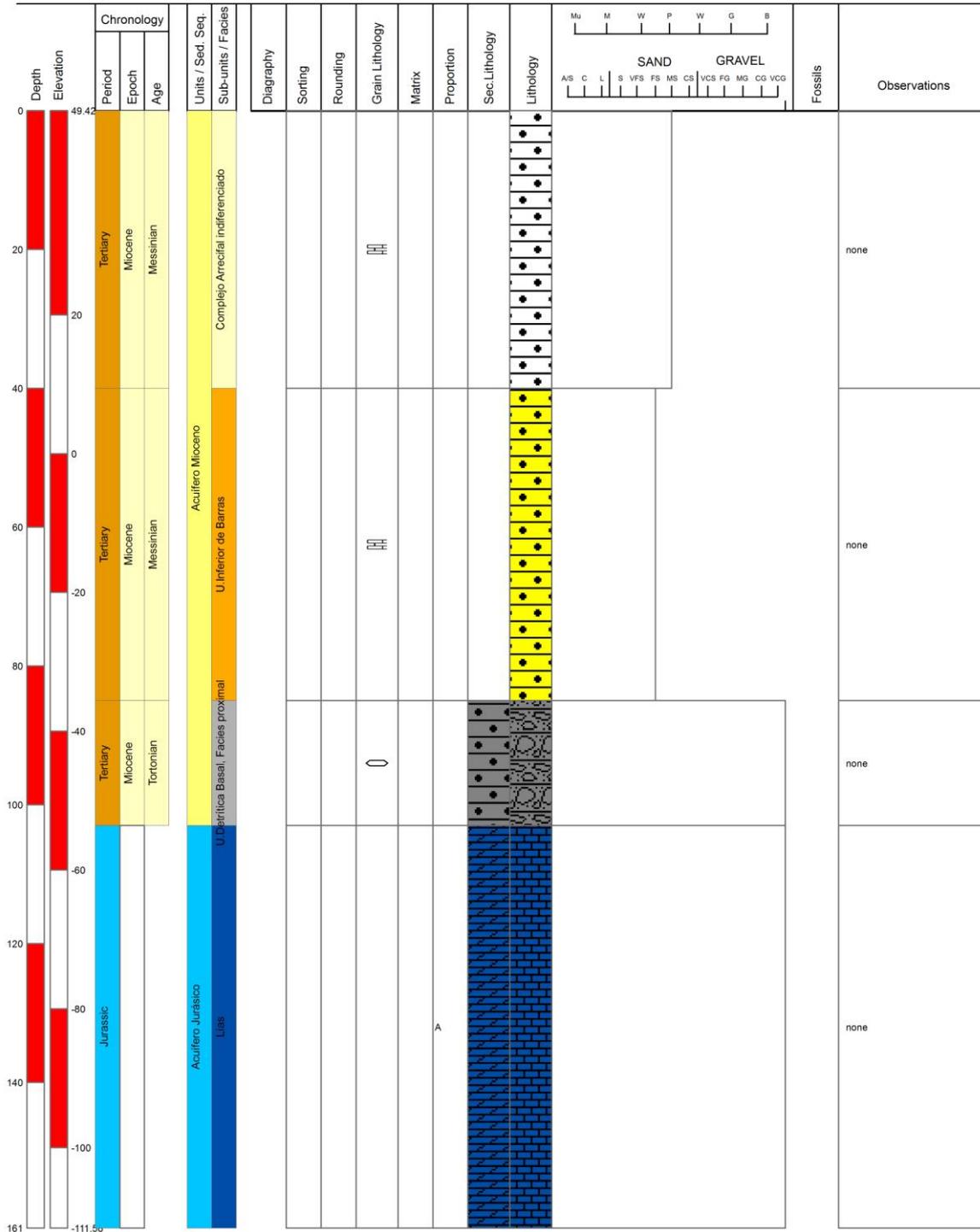
Vertical Scale: 1:500



Name/Reference: C41 Vinya Gran
 BoreID: 10140
 Coordinates (UTM): ETRS_1989_UTM_Zone_31N
 X: 574984
 Y: 4428610
 Z: 49.42
 Depth (m): 161
 Core Recovery: N

Date:
 Author: BARÓN, A.

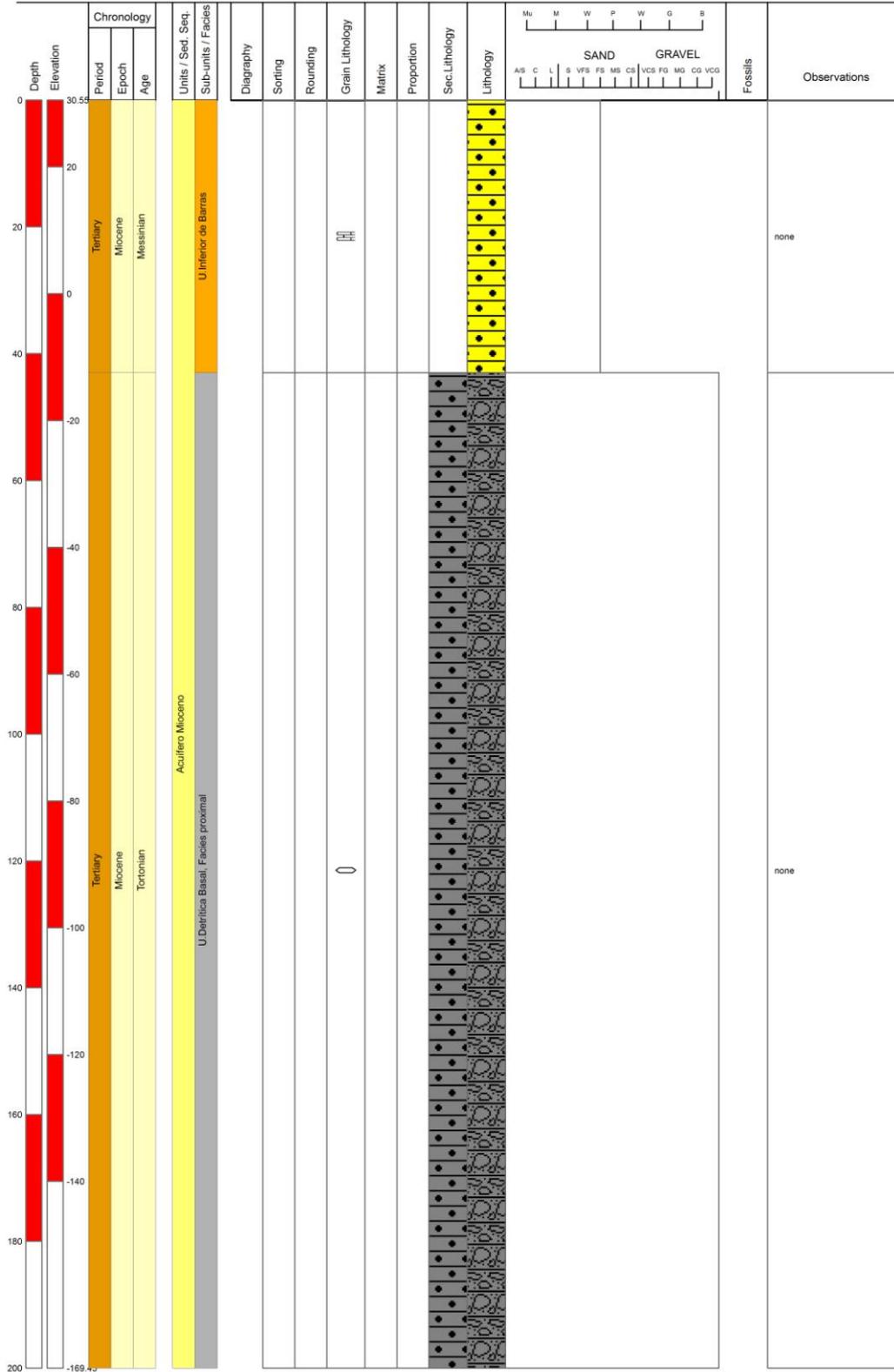
Vertical Scale: 1:500



Name/Reference: C43 Son Anglado
 BoreID: 10032
 Coordinates (UTM): ETRS_1989_UTM_Zone_31N
 X: 573089
 Y: 4430587
 Z: 30.55
 Depth (m): 200
 Core Recovery: N

Date:
 Author: BARÓN, A.

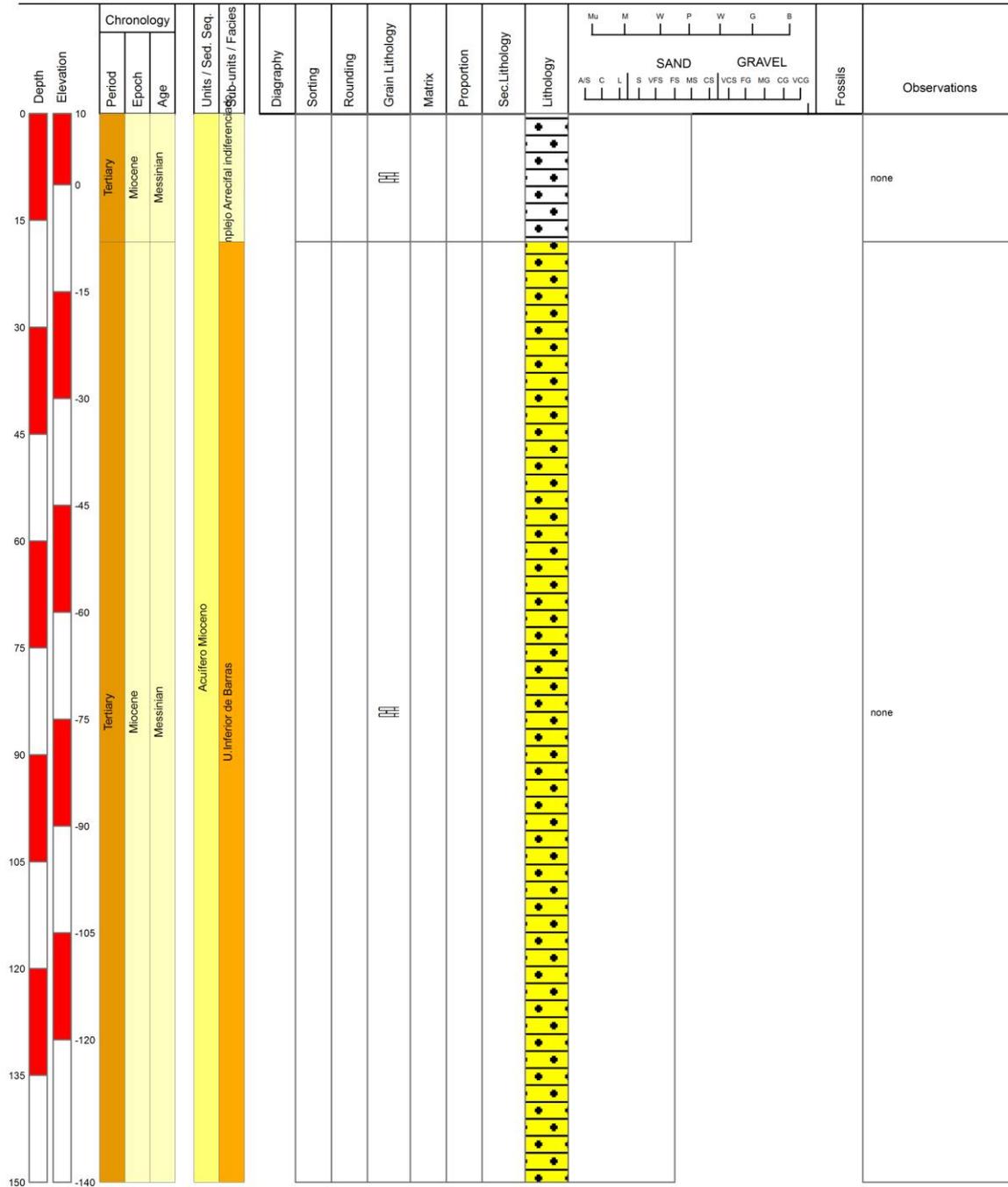
Vertical Scale: 1:500



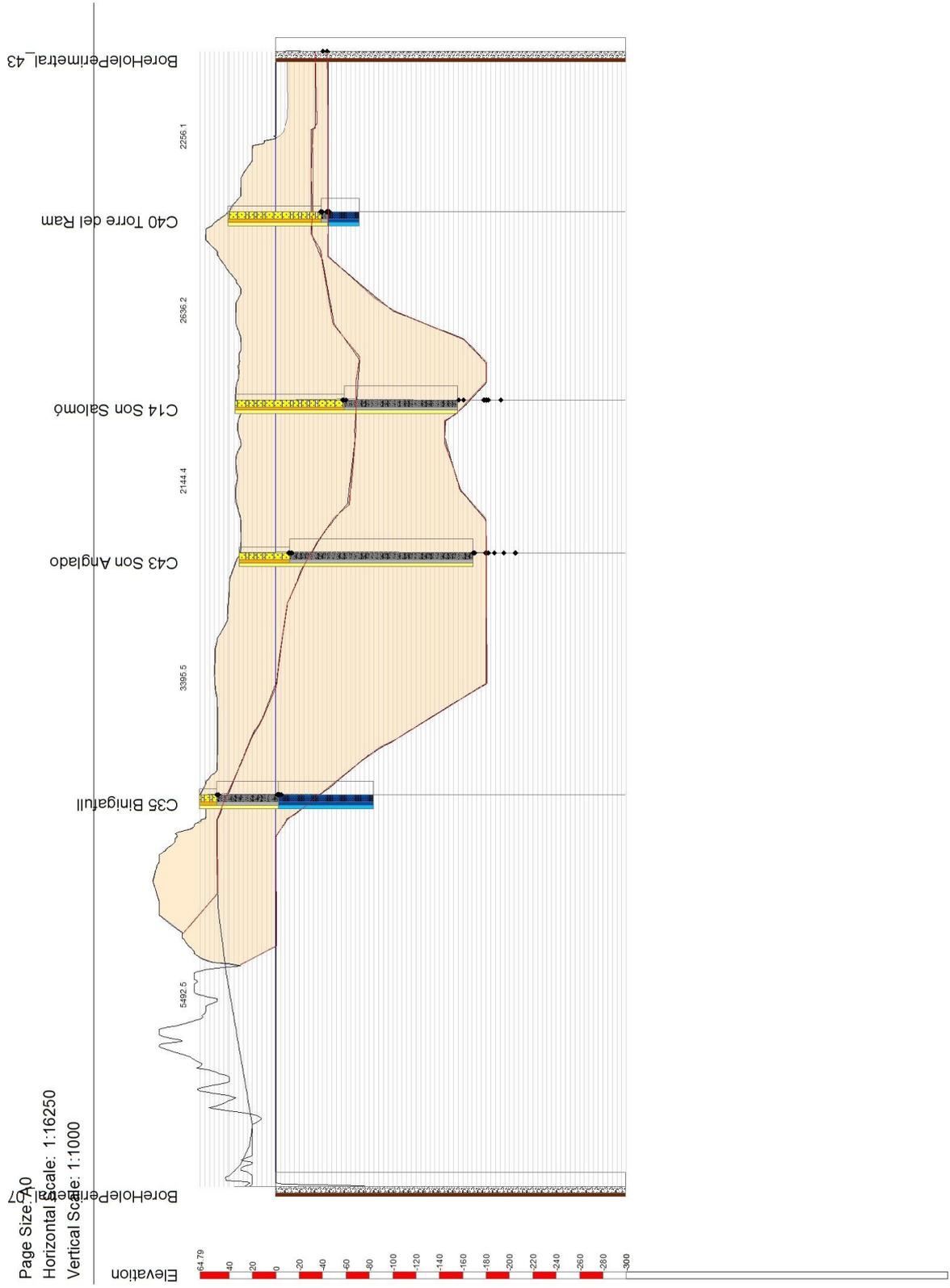
Name/Reference: C48 Son Olivar Vell
 BoreID: 10099
 Coordinates (UTM): ETRS_1989_UTM_Zone_31N
 X: 572200
 Y: 4421839
 Z: 10
 Depth (m): 150
 Core Recovery: N

Date:
 Author: BARÓN,A.

Vertical Scale: 1:500



Profile 1

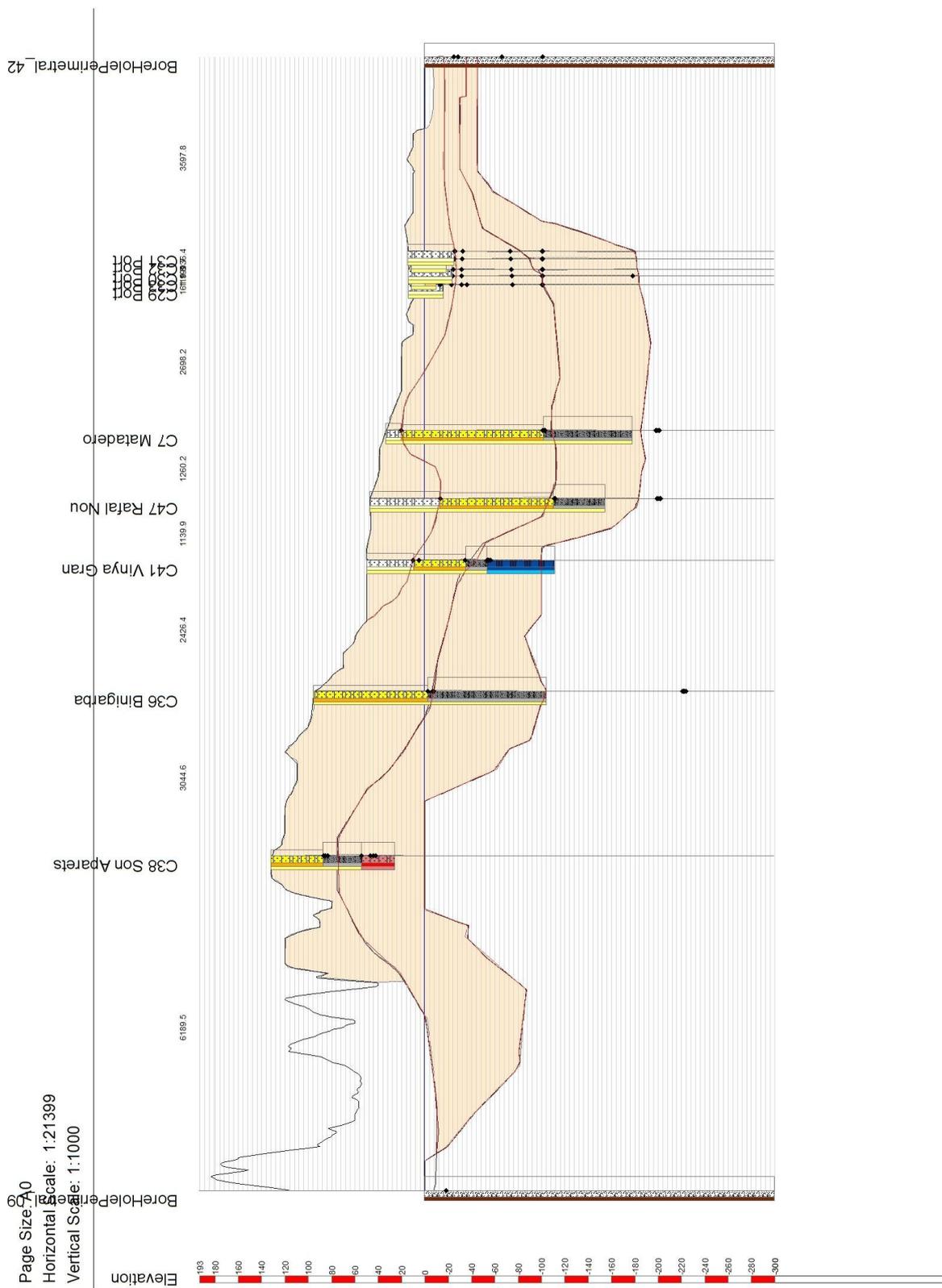


Page Size 510

Horizontal Scale: 1:16250

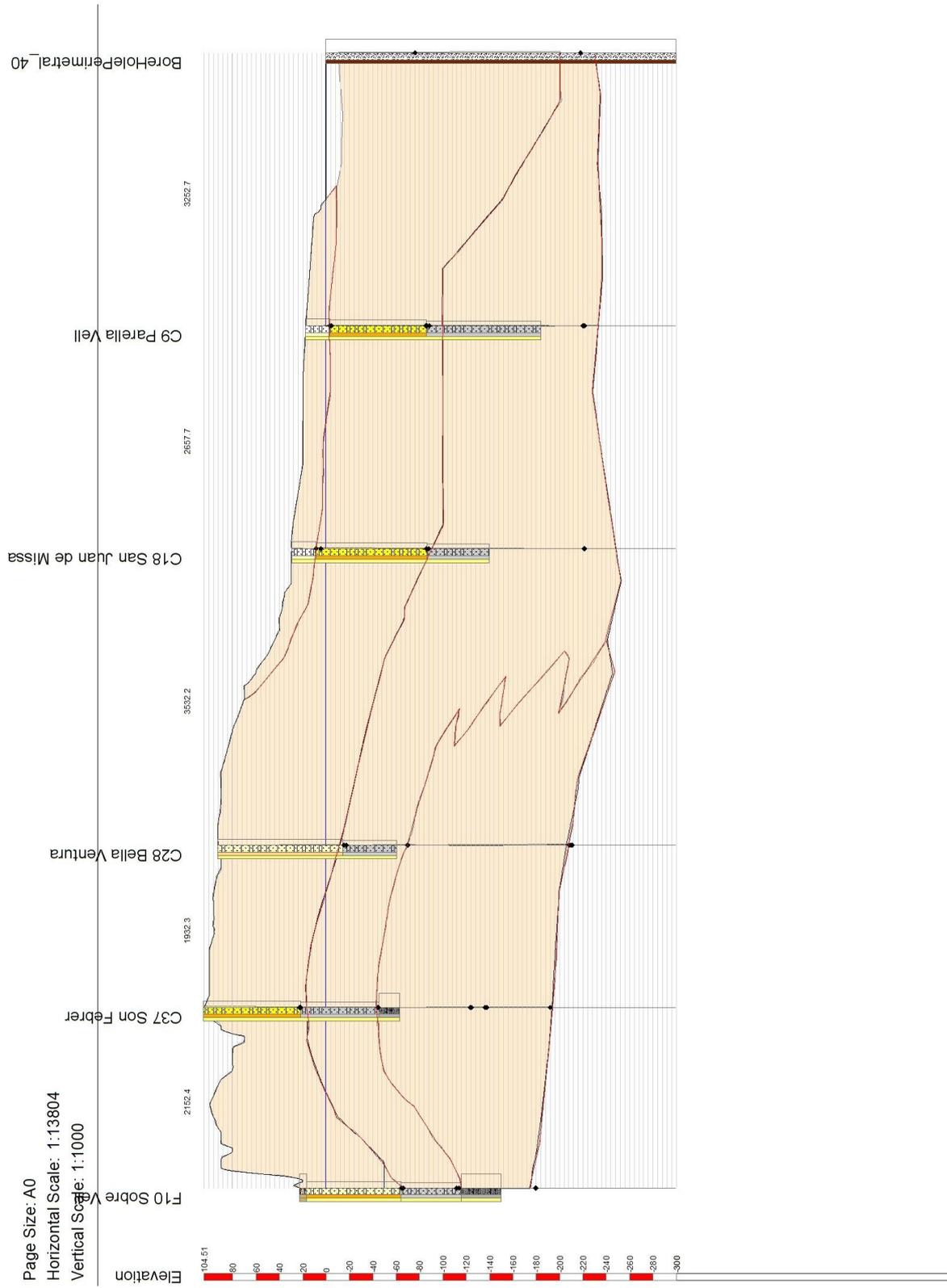
Vertical Scale: 1:1000

Profile 2

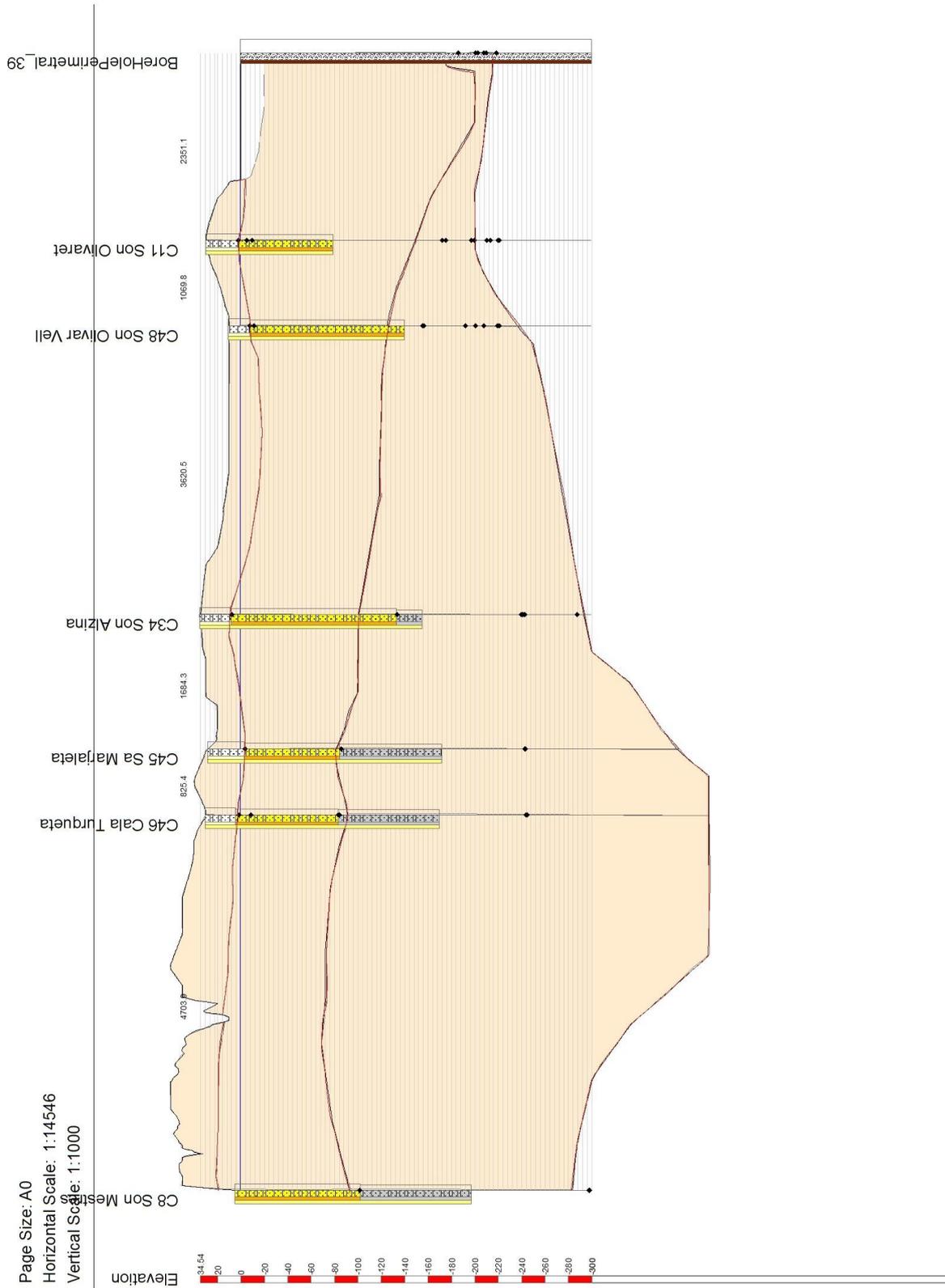


Page Size: A0
 Horizontal Scale: 1:21399
 Vertical Scale: 1:1000

Profile 3

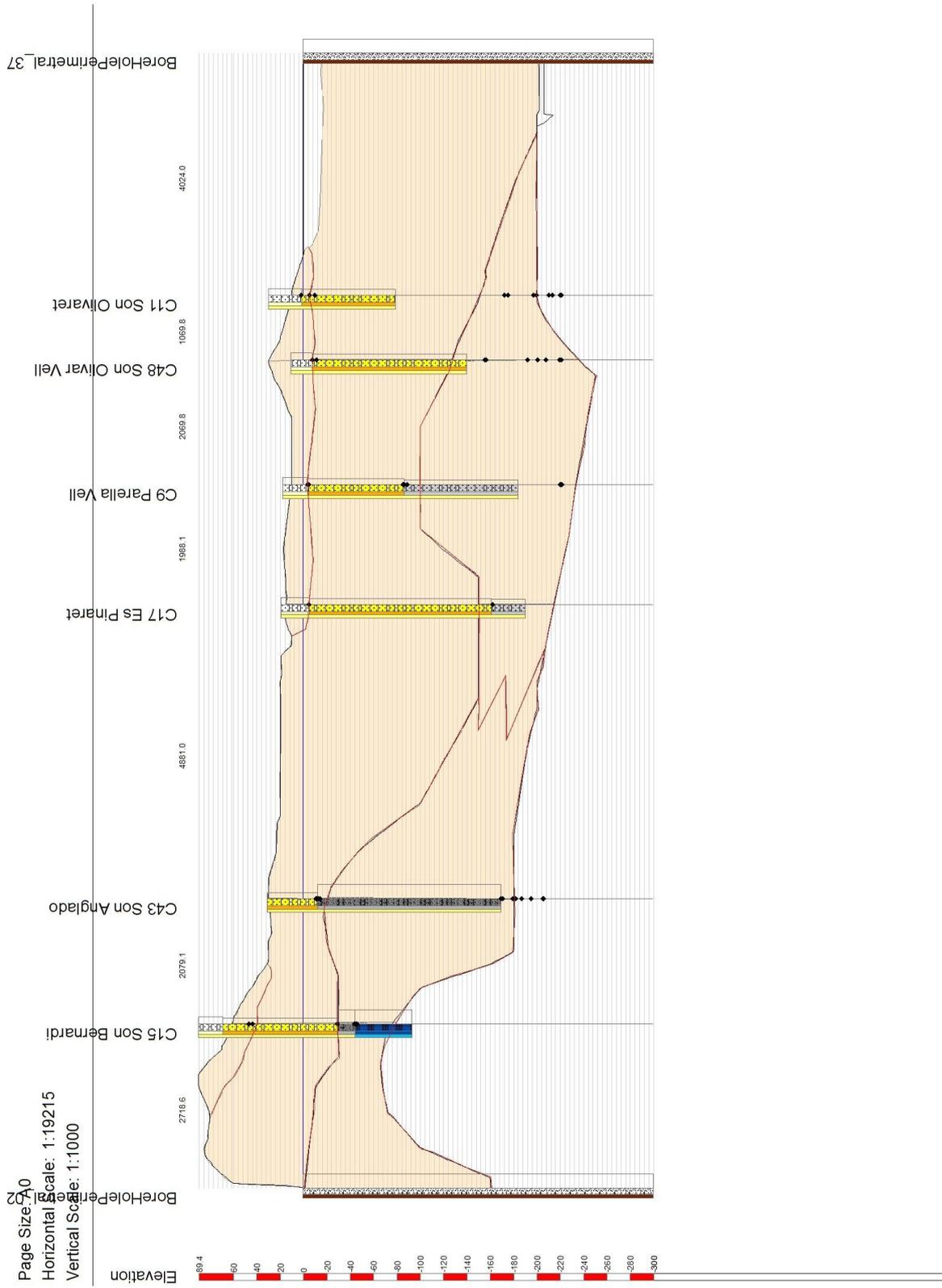


Profile 4



Page Size: A0
 Horizontal Scale: 1:14546
 Vertical Scale: 1:1000

Profile 5

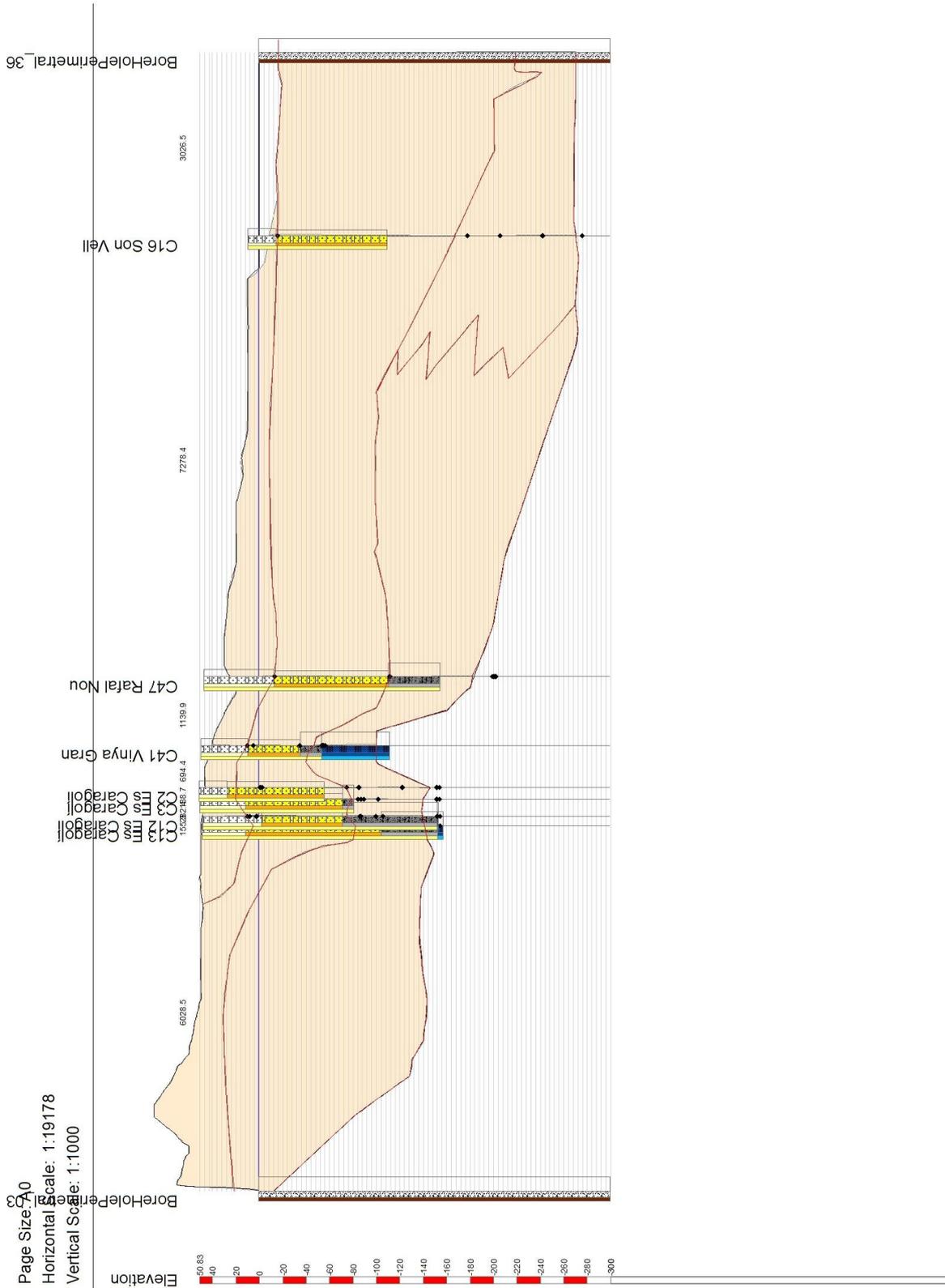


Page Size A0

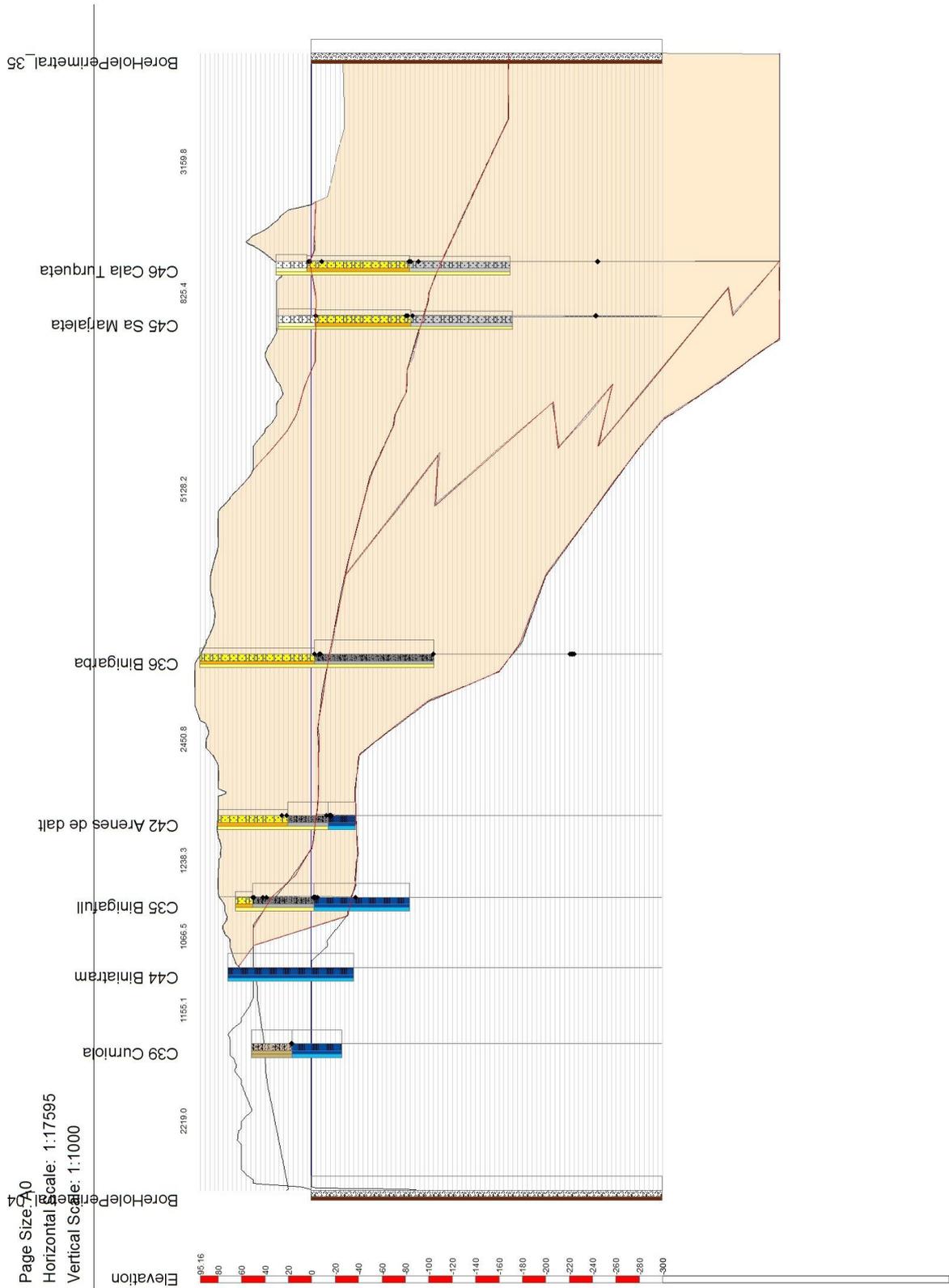
Horizontal Scale: 1:19215

Vertical Scale: 1:1000

Profile 6

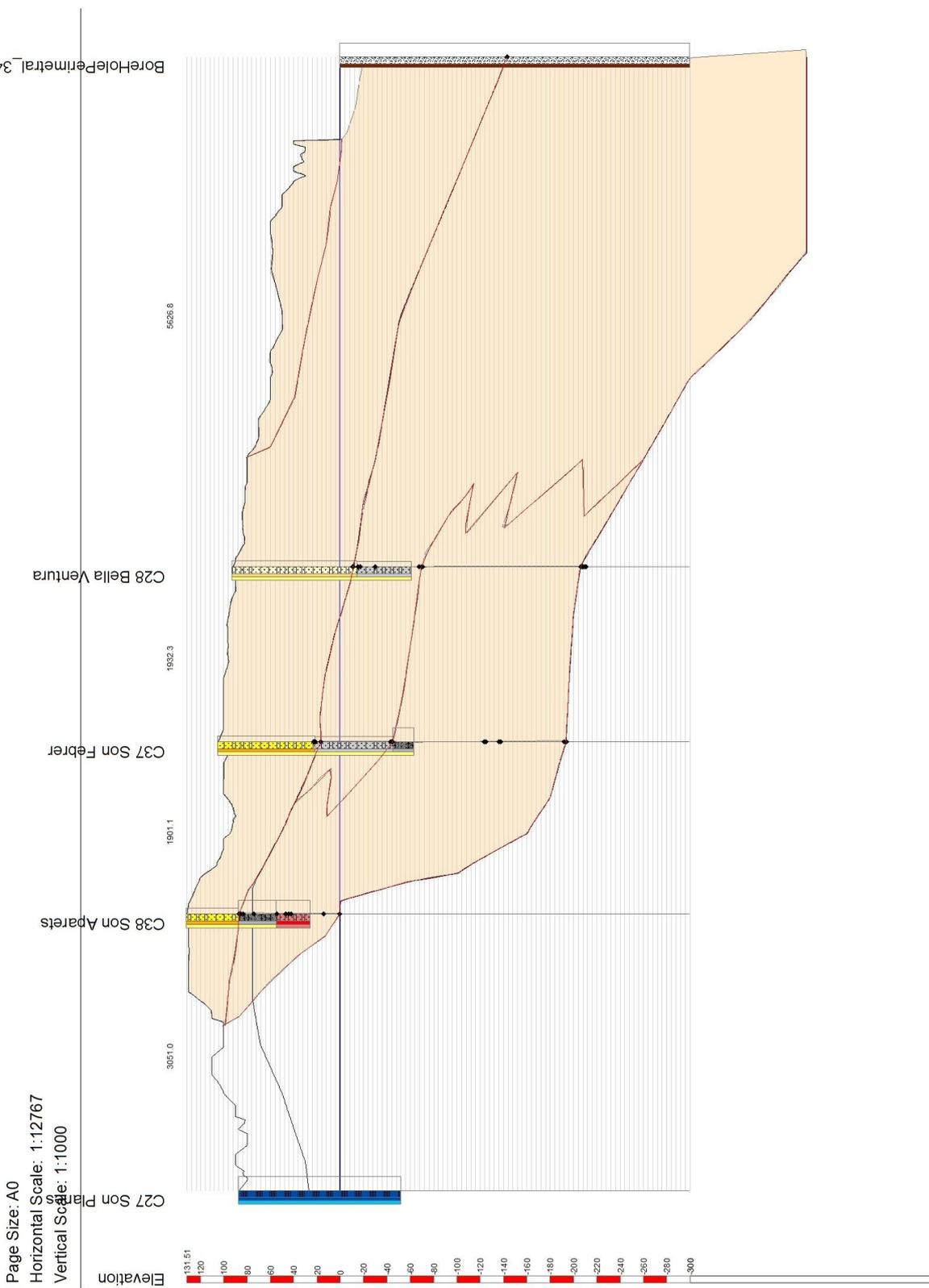


Profile 7



Page Size: A0
 Horizontal Scale: 1:17595
 Vertical Scale: 1:1000

Profile 8



ANEXO 6. BALANCE HÍDRICO DE LA MASA DE AGUA CIUTADELLA

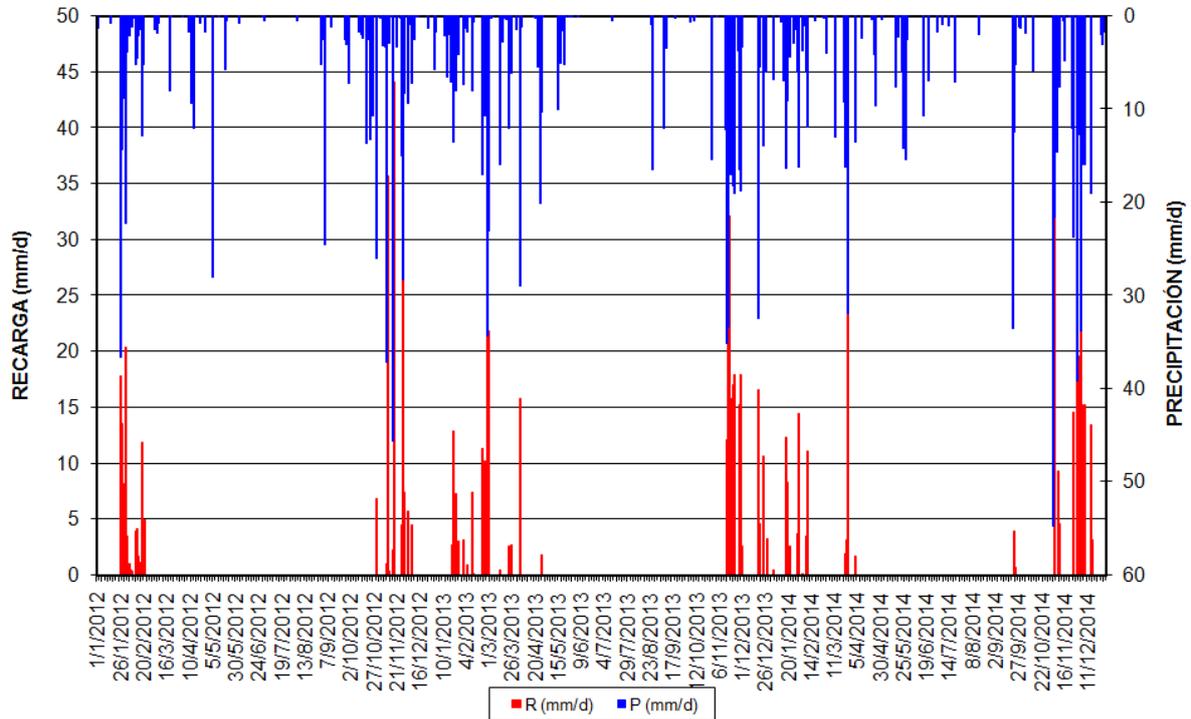
Ficha técnica de la Masa de Agua Subterránea Ciutadella. (PAIB, 2015):

MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DE BALEARES				
1. CODIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN				
Código: 19.01-M3		Denominación: Ciutadella		
U.H.: 19.01 MIGJORN		Isla: 19 MENORCA		
2. DELIMITACIÓN Y SUPERFICIES CARACTERÍSTICAS				
MAS (km²): 156		Afloramientos permeables (km²): 155		
U.H. (km²): 391		Longitud de costa (km): 64,5		
Términos municipales:		Ríos, torrentes y embalses		
Código	Nombre	Barranc de Macarella		
015	CIUTADELLA			
023	FERRERIES			
3. ESTRUCTURA INTERNA				
Acuífero	Litología	Edad	Espesor (m)	Tipo
Mioceno	Caliza y calcarenita	Tortoniense-Messiniense	70-150	Libre
Jurásico	Dolomías	Jurásico	450	Libre
Corte hidrogeológico conceptual:				
<p>The diagram shows a cross-section of the subsurface. On the left, the sea level (MAR) is indicated. Below the surface, there are two main geological layers: Jurassic (J. JURÁSICO) and Miocene (M. Mioceno). Two wells (Pozo) are shown, one in the Miocene layer and one in the Jurassic layer. A dashed line represents the water table (N.F.).</p>				
4. PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS				
Permeabilidad (m/d): 1-20 (Mioceno) 1-10 (Jurásic)		Transmisividad (m²/d): 40-1300 (Mioceno) 500 (
Coefficiente de almacenamiento: 0.1-0.01 (Mio		Caudal específico (l/s/m):		
5. BALANCE HÍDRICO				
ENTRADAS (hm³/a)		SALIDAS (hm³/a)		
Infiltración lluvia:	28	Bombes:	8,53	
Infiltración cauces:		Ríos:		
Infiltración riegos:	0,33	Manantiales:		
Inf. redes abastecimiento	1,95	Humedales:		
De otras MAS:		A otras MAS:		
De agua de mar:	1,18	Al mar:	23,93	
Inf. aguas residuales:	1	Recuperación reservas:		
Consumo reservas:		TOTAL	32,46	
TOTAL	32,46			

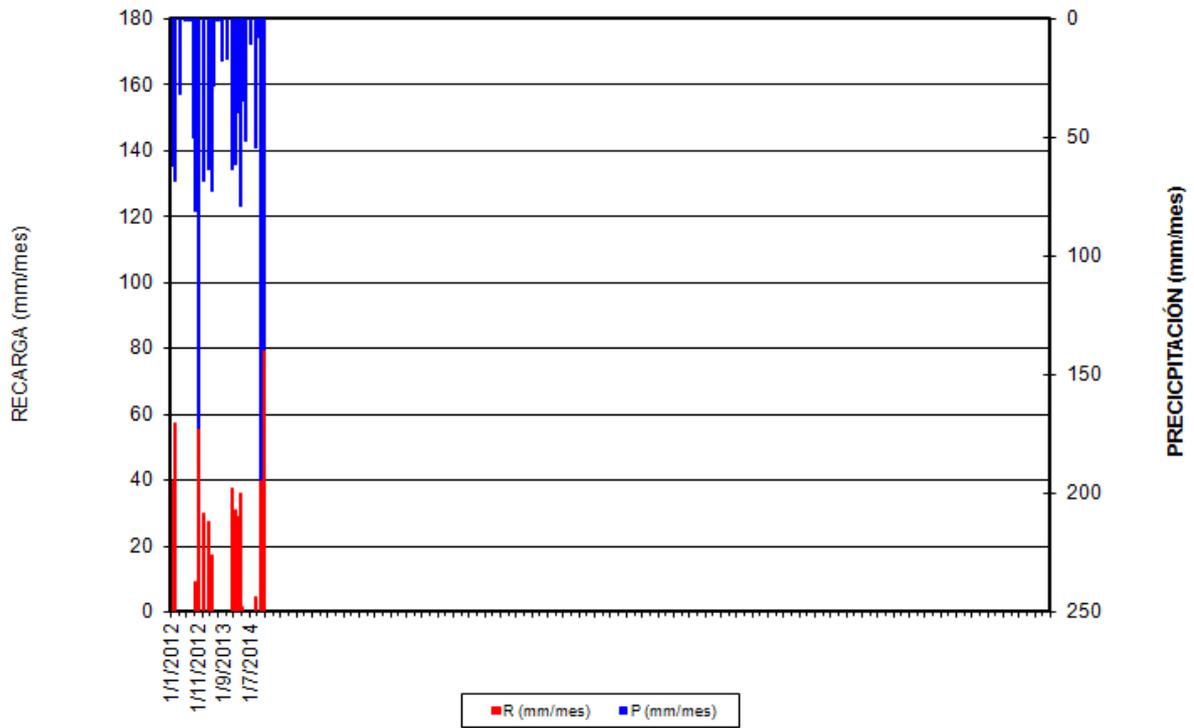
Gráficos de Precipitación&Infiltración

CARACTERISTICAS DEL SUELO	
Cap. Campo (contenido volumétrico)	0.298
Humedad Inicial (contenido volumétrico)	0.298
Espesor radicular suelo (m)	0.25
Punto de Marchitez (contenido volumétrico)	0.167
Valor de laminación (mm)	150
Reserva Útil (mm)	32.75
Reserva Inicial (mm)	32.75

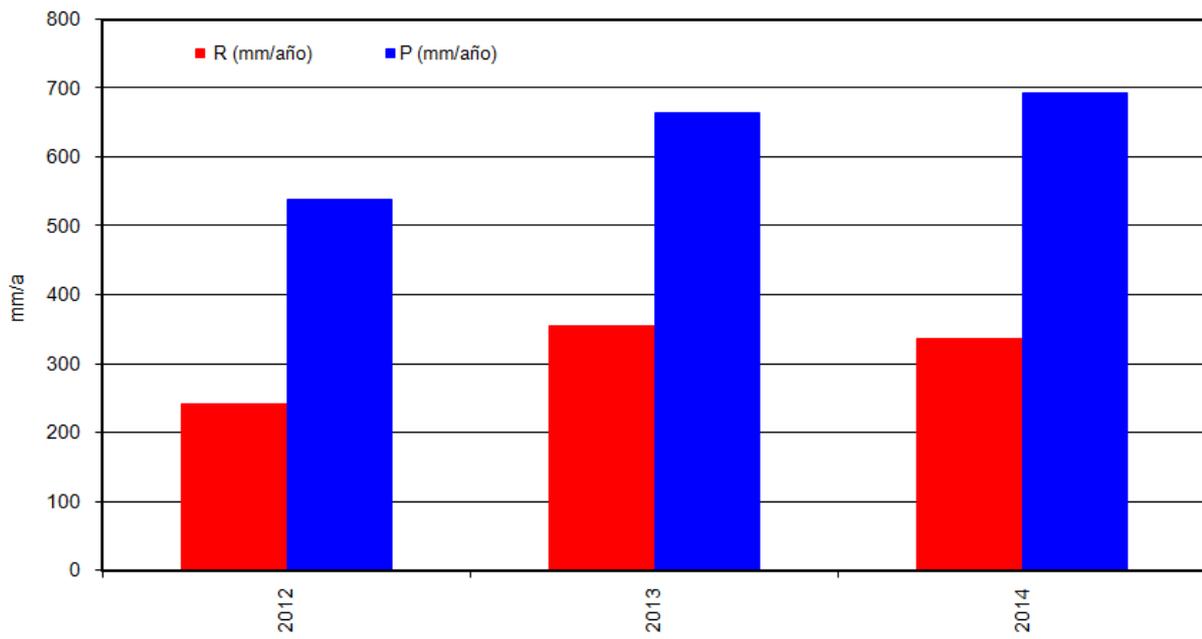
Balance diario – recarga diaria:



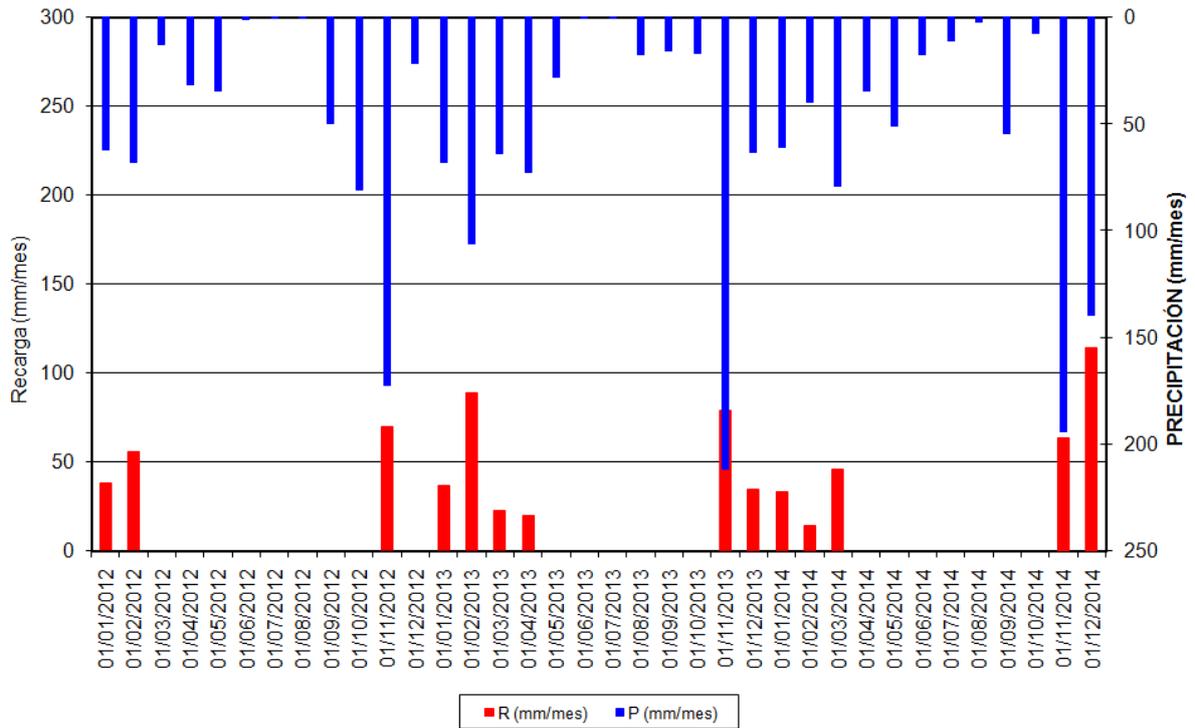
Balance diario – recarga mensual:



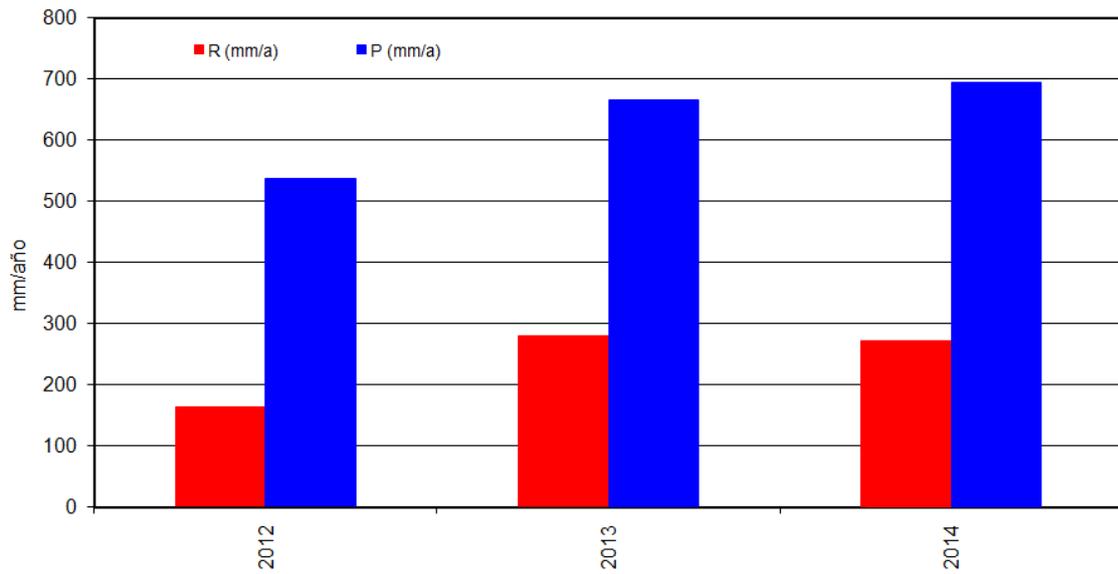
Balance diario – recarga anual:



Balance mensual – recarga mensual:



Balance mensual – recarga anual:



Valores:

FECHA	P (mm/mes)	T °C	RECARGA MENSUAL	
			ETP mm/mes	R (mm/mes)
ene-12	62.00	11.23	24.21	39.4
feb-12	68.30	8.17	12.39	57.4
mar-12	13.00	12.50	36.08	0.0
abr-12	31.80	15.11	56.01	0.0
may-12	34.60	18.77	97.33	0.0
jun-12	0.90	23.98	160.26	0.0
jul-12	0.50	25.00	176.47	0.0
ago-12	0.50	27.12	195.93	0.0
sep-12	49.80	22.74	121.42	0.0
oct-12	81.10	19.94	87.53	9.1
nov-12	172.70	15.74	47.38	126.0
dic-12	22.00	12.48	29.06	10.1
ene-13	68.30	10.79	24.32	30.1
feb-13	106.40	9.33	17.94	84.8
mar-13	63.70	12.95	41.51	27.4
abr-13	72.80	14.31	53.20	17.4
may-13	27.90	15.98	73.68	0.0
jun-13	0.20	20.93	124.28	0.0
jul-13	0.60	25.60	185.55	0.0
ago-13	17.50	25.36	171.43	0.0
sep-13	15.90	22.49	120.47	0.0
oct-13	16.90	21.75	106.36	0.0
nov-13	211.60	13.78	38.50	157.2
dic-13	63.10	11.89	28.46	37.4
ene-14	61.30	12.24	28.53	30.9
feb-14	39.70	11.68	25.27	28.9
mar-14	79.10	12.04	33.10	35.8
abr-14	34.80	15.41	57.84	1.6
may-14	51.10	17.57	84.72	0.0
jun-14	17.70	22.52	140.78	0.0
jul-14	10.90	24.24	165.63	0.0
ago-14	2.60	25.03	166.39	0.0
sep-14	54.40	24.53	141.47	4.4
oct-14	7.80	21.40	100.83	0.0
nov-14	194.20	16.85	54.09	113.8
dic-14	139.70	11.71	25.28	119.8

