

RESEARCH ARTICLE

Hydrochemical characterization of the coastal springs of the Sierra de Irta. Maestrazgo Aquifer (Castellón)

Caracterización hidroquímica de las surgencias costeras de la sierra de Irta. Acuífero de El Maestrazgo (Castellón)

José Antonio Domínguez Sánchez¹, Silvia Rosado Piqueras¹, Miguel Mejías Moreno², Bruno José Ballesteros¹

¹ Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, Unidad de Valencia

² Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid

Corresponding author: ja.dominguez@igme.es (José Antonio Domínguez Sánchez)

ABSTRACT

Key points

El Maestrazgo aquifer is characterized by the absence of important springs in its interior and permanent water courses

The waters its springs are chemically characterized based on their majority ion content and are classified into five different types

The characterization corresponds to a hydrodynamic context as little altered as possible by the effect of the weather

El Maestrazgo aquifer has an approximate surface area of 2400 km² and occupies the northern half of the province of Castellón, from the coast to Morella. This system is characterized by the absence of important springs in its interior and permanent water courses, in such a way that its fundamental discharge is carried out directly into the sea through springs located along the Sierra de Irta, between Alcossebre and Peñíscola. Several of these discharge points are permanent (springs at Playa de Las Fuentes, Torre Badum, Font de Dins and Prat de Peñíscola) and drain an important volume of water resources that is difficult to quantify. In addition to these well-known springs, in times of high water and mainly after episodes of intense rainfall, occasional springs appear whose precise location and chemical characteristics have not been defined to date. These are the springs of Playa del Carregador, Playa de Las Fuentes Sur and Norte, Playa del Russo and Playa del Pebret. In this article, the waters of all these springs are chemically characterized based on their majority ion content and are classified into five different types. The chosen samples are taken in periods of high water in which all the springs are running, but in a temporary stage relatively far from the torrential events that activated them so that the characterization corresponds to a hydrodynamic context as little altered as possible by the effect of the weather.

Keywords: Coastal aquifers; Hydrochemistry; Irta; Maestrazgo; Springs.

Article History:

Received: 19/02/2021

Accepted: 15/09/2021

RESUMEN

Puntos clave

El acuífero de El Maestrazgo se caracteriza por la ausencia de importantes manantiales en su interior y de cursos de agua permanentes

Se caracterizan químicamente las aguas de sus surgencias según sus contenidos en iones mayoritarios y se clasifican en cinco tipos distintos

La caracterización corresponde a un contexto hidrodinámico lo menos alterado posible por efecto del clima

El acuífero de El Maestrazgo tiene una superficie aproximada de 2400 km² y ocupa la mitad septentrional de la provincia de Castellón, desde la costa hasta Morella. Este sistema se caracteriza por la ausencia de importantes manantiales en su interior y de cursos de agua permanentes, de tal forma que su descarga fundamental se realiza directamente al mar a través de surgencias situadas a lo largo de la sierra de Irta, entre Alcossebre y Peñíscola. Varios de estos puntos de descarga son permanentes (manantiales de Playa de Las Fuentes, Torre Badum, Font de Dins y Prat de Peñíscola) y drenan un importante volumen de recursos hídricos difícilmente cuantificable. Además de estas surgencias, bien conocidas, en épocas de aguas altas y fundamentalmente tras episodios de intensas precipitaciones, la hidrodinámica local se altera temporalmente y aparecen manantiales ocasionales cuya situación precisa y características químicas no han sido definidas hasta la fecha. Se trata de las surgencias de Playa del Carregador, Playa de Las Fuentes Sur y Norte, Playa del Russo y Playa del Pebret. En el presente artículo se caracterizan químicamente las aguas de todas estas surgencias a partir de sus contenidos en iones mayoritarios y se clasifican en cinco tipos distintos. Las muestras elegidas se toman en periodos de aguas altas en los que todos los manantiales están en funcionamiento, pero en un estadio temporal relativamente alejado de los eventos torrenciales que los activaron con el fin de que la caracterización corresponda a un contexto hidrodinámico lo menos alterado posible por efecto del clima.

Palabras clave: Acuíferos costeros; Hidroquímica; Irta; Maestrazgo; Surgencias.

Historial del artículo:

Recibido: 19/02/2021

Aceptado: 15/09/2021

1. Introducción y objetivos

El acuífero de El Maestrazgo se extiende sobre la mitad septentrional de la provincia de Castellón, desde la costa, al este, hasta Morella, al oeste. Hidrogeológicamente se caracteriza por recargarse casi exclusivamente por la infiltración del agua de lluvia y carecer de surgencias naturales importantes en su interior.

Los cursos fluviales son de carácter torrencial y la mayor parte de las descargas se producen por medio de manantiales situados a lo largo del frente costero de la sierra de Irta, entre las localidades de Alcossebre y Peñíscola (Figura 1).

Las principales surgencias (Playa de las Fuentes, Torre Badum, Font de Dins y Prat de



Figura 1. Situación del área de estudio.

Figure 1. Geographical location of the study area.

Peñíscola) tienen carácter permanente y son bien conocidas (ITGE, 1977, 1981; COPUT, 1990, 1992; Serrano Orts *et al.*, 1995). Otras, por el contrario, tienen carácter ocasional ya que solo se activan durante cortos periodos de tiempo tras episodios de precipitaciones intensas (Playa del Carregador, playa de Las Fuentes Sur y Norte, Playa del Russo y Playa del Pebret).

Existen además numerosos flujos difusos y otras salidas, alejadas de la línea de costa, cuya situación exacta se desconoce, pero que se han puesto de manifiesto en estudios recientes mediante técnicas de teledetección aeroportada en el infrarrojo térmico (Antón-Pacheco *et al.*, 2007) y/o con el método del cuarteto de los isótopos del Ra (García-Orellana *et al.*, 2006; García-Solsona *et al.*, 2007, 2010).

Las surgencias efímeras u ocasionales no se han identificado con precisión ni caracterizado hidroquímicamente hasta la fecha, siendo este el objetivo principal del presente artículo.

Se establecen, además, distintos grupos de aguas en la sierra de Irta a partir del análisis de los contenidos en los elementos mayoritarios en dos estadios considerados de hidrodinámica estable en aguas altas.

2. Materiales y métodos

El acuífero de El Maestrazgo ha sido objeto de estudios diversos por parte del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) desde el último cuarto del siglo pasado. Desde el año 2006, dentro del proyecto “Redes de Observación Hidrogeológica e Inventario de Manantiales”, este Organismo ha llevado a cabo en el entorno de la sierra de Irta más de 70 campañas de muestreo de manantiales y sondeos, aforos en cauces y perfiles geofísicos en captaciones que han permitido recopilar un volumen importante de información hidrogeológica (Domínguez *et al.* 2016) y caracterizar hidroquímicamente las aguas subterráneas del acuífero (IGME-CONSULMINA, 2006; Ballesteros *et al.*, 2007b).

Durante el muestreo se toma “in situ” la temperatura, el pH y la conductividad eléctrica. Posteriormente, las muestras son remitidas a los Laboratorios Generales del IGME en Tres Cantos (Madrid), en donde se determinan las concentraciones de los iones mayoritarios a partir de espectrometría de emisión atómica y espectrometría de absorción molecular con autoanalizador de flujo continuo. También se determina en labo-

ratorio la conductividad eléctrica y el pH mediante electrometría y la oxidabilidad por ebullición en medio ácido y valoración con permanganato de potasio.

Las surgencias de Torre Badum, por su proximidad al mar, han dejado de muestrearse en algunas campañas por causa del fuerte oleaje. Esta circunstancia también ha afectado en algún momento a los manantiales ocasionales o efímeros que, además, únicamente se encuentran activos en las épocas de “aguas especialmente altas” y/o cuando se producen lluvias torrenciales. Estos eventos climáticos alteran de forma súbita la hidrodinámica “normal” del acuífero, y modifican temporalmente las concentraciones elementales de las aguas de las surgencias, pero pasados unos días estas concentraciones se reajustan y son representativas de lo que puede considerarse un estadio de “hidrodinámica estable en periodo húmedo”.

Por ello, para la caracterización hidroquímica de las distintas aguas se han elegido como muestras de referencia las correspondientes a las campañas de muestreo del 14 al 16 de abril de 2015 y del 6 al 8 de noviembre de 2018 (Figura 2), fechas en las que todas las surgencias se encontraban activas, pero transcurridos al menos 20 días tras las lluvias que provocaron su activación.

Pese a que el Part de Peñíscola, y en menor medida el Prat de Cabanes, son puntos de descarga importantes del acuífero de El Maestrazgo, la confluencia en estas zonas de aguas propias del acuífero detrítico, aguas de escorrentía superficial, de retornos de riego y de intrusión marina, hacen inviable una caracterización química que pueda asociarse en esencia al acuífero mesozoico de El Maestrazgo. Por ello, estas surgencias no se han tenido en cuenta en el análisis realizado en el presente artículo.

3. Marco hidrogeológico

El acuífero Jurásico de El Maestrazgo tiene una extensión de unos 2.400 km², de los que aproximadamente un 30% son afloramientos permeables carbonatados (calizas y dolomías) del Jurásico - Cretácico inferior, que constituyen el acuífero principal. Este conjunto, con una potencia media del orden de 1.100 a 1.500 m, presenta una alta permeabilidad por fisuración y karstificación, siendo los tramos de dolomías del Kimmeridgiense superior-Portlandiense y los de

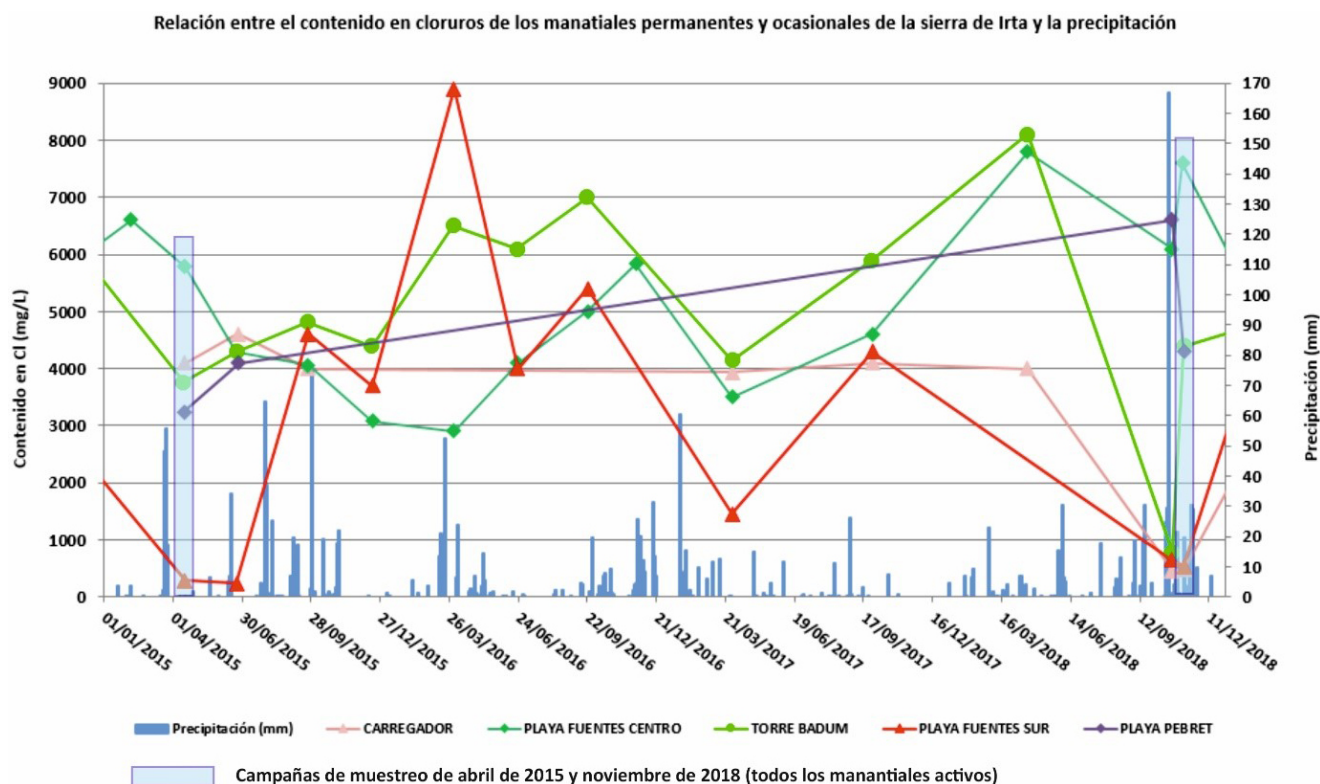


Figura 2. Campañas de muestreo elegidas para el análisis hidroquímico.

Figure 2. Sampling campaigns chosen for hydrochemical analysis.

calizas y dolomías del Lías-Dogger los que cuentan con mejores características hidrodinámicas. La base impermeable del acuífero la conforman las arcillas y margas con yesos de la facies Keuper del Trías, localizadas en la mayor parte del acuífero a profundidades muy elevadas, aunque llegan a aflorar en la sierra Espaniguera (Antón-Pacheco *et al.*, 2005).

El límite oriental del acuífero se considera abierto y coincide con la línea de costa desde Peñíscola hasta Benicàssim. En este margen se incluye el acuífero detrítico de la plana de Oropesa-Torreblanca. El límite meridional, desde la costa hasta el macizo del Peñagolosa, es cerrado por aflorar materiales impermeables triásicos. El margen oeste viene delimitado por diversas fallas normales y el anticlinal Vilafranca-Portell, que actúan de barrera y/o divisoria del flujo subterráneo. Este borde se traza al oeste del polje de Vistavella del Maestrazgo ya que constituye una zona importante de recarga del acuífero jurásico subyacente. Finalmente, el límite norte, desde Bordón hasta el puerto de Torre Miró, se considera cerrado por la presencia de cabalgamientos que ponen materiales cretácicos sobre los terciarios de la sierra de la Creu. Más al este,

el límite es abierto, desde el anticlinal del río Servol hasta la costa, donde los materiales jurásicos y cretácicos contactan con los depósitos detríticos de la plana de Vinaroz-Peñíscola (Ballesteros *et al.*, 2007a) (Figura 3).

La circulación subterránea general se establece de forma continua de oeste a este a través de conductos de circulación preferencial (Domínguez y Ballesteros, 2012; Mejías *et al.*, 2012), desde el borde noroccidental, donde la cota piezométrica se sitúa en torno a 600 m s.n.m., hasta la costa (Figura 3), con un gradiente hidráulico muy bajo (1-2 ‰). Aunque existe un salto piezométrico de dirección NNE-SSW, de más de 100 m, en el área central del acuífero, este no implica desconexión hidráulica. El principal flujo de drenaje del acuífero se dirige hacia la sierra carbonatada de Irta, que constituye un claro ejemplo de sistema kárstico costero, en la que se sitúan los principales puntos de descarga (Playa de Las Fuentes, Torre Badum y Font de Dins).

Otros dos flujos se orientan hacia los acuíferos detríticos de las planas costeras de Vinaroz-Peñíscola, al norte, y Oropesa-Torreblanca, al sur.

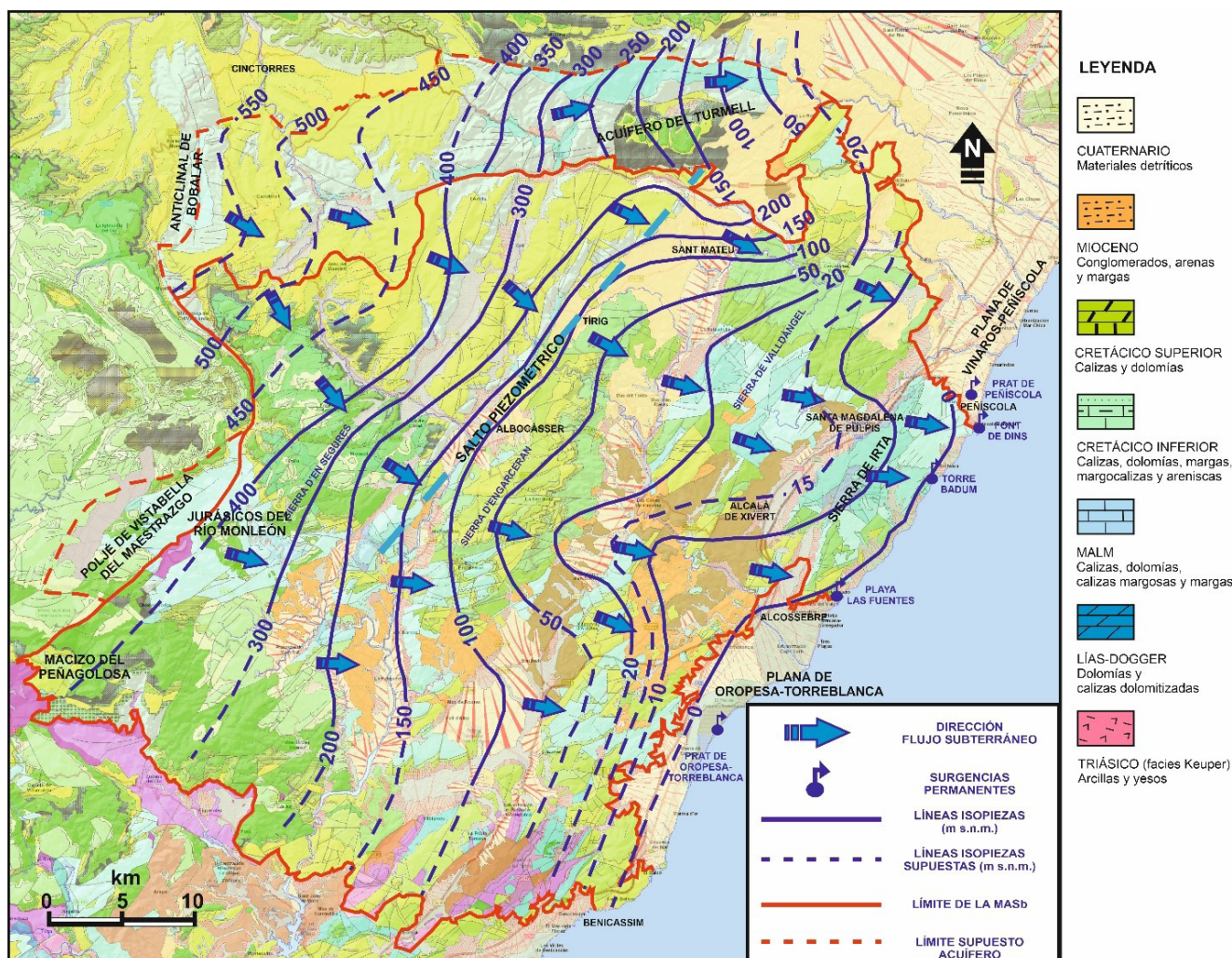


Figura 3. Mapa piezométrico.

Figure 3. Piezometric map.

La recarga del acuífero se produce básicamente por infiltración del agua de lluvia. No obstante, las estimaciones más recientes de las entradas al acuífero realizadas por diferentes autores y métodos han dado resultados muy diversos, desde recargas de apenas 185 hm³/año (IGME-EPTISA 2005) hasta 420 hm³/año (Andreo *et al.* 2007) o incluso 440 hm³/año (Ballesteros *et al.*, 2007a), en este caso con una precipitación media anual del orden de 560 L/m² y una lluvia útil de 194 L/m².

El acuífero se encuentra en un estado cuasi natural. Las principales extracciones se sitúan próximas a la costa, donde la demanda agrícola y turística es mayor. Sin embargo, en los dos tercios interiores, los sondeos, básicamente para abastecimiento urbano de pequeñas poblaciones por la ausencia de industria y agricultura, son escasos y requieren, además, de gran profundidad

para alcanzar el acuífero regional lo que los convierte en infraestructuras de alto coste.

4. Surgencias permanentes y ocasionales del acuífero de El Maestrazgo en la sierra de Irta

A lo largo del frente costero de la sierra de Irta se pueden establecer básicamente tres áreas de descarga que constituyen las salidas permanentes más importantes del acuífero de El Maestrazgo (Figura 3 y 4 y foto 1). En el extremo sur, en el sector de Alcossebre, y concretamente en la Playa de Las Fuentes, se sitúa la surgencia denominada Playa de Las Fuentes Centro. Se trata, en realidad, del punto de desagüe de una canalización subterránea, oculta bajo el casco urbano, cuyo trazado exacto, longitud y características constructivas, se desconocen.

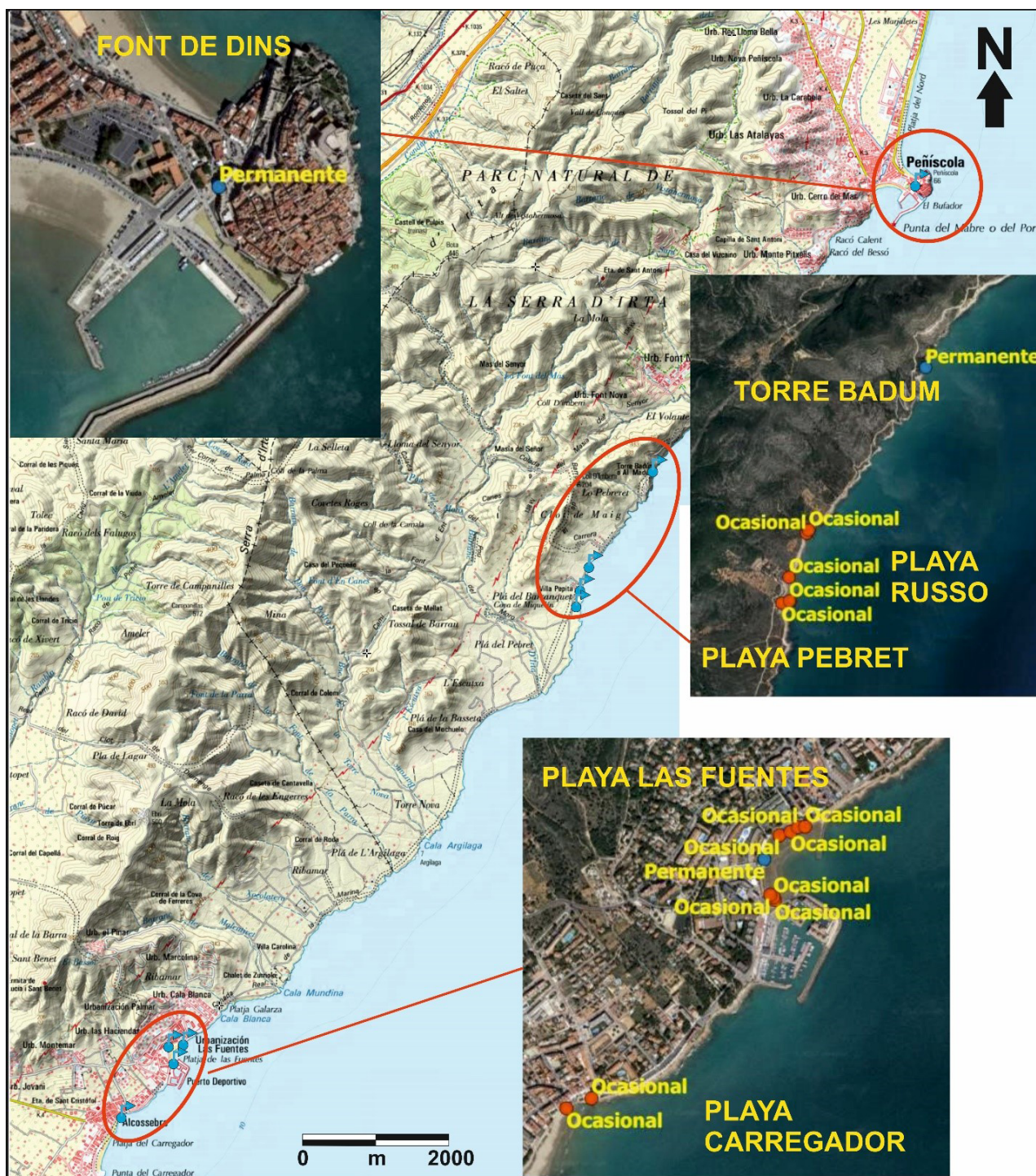


Figura 4. Situación de las surgencias (permanentes y ocasionales) del acuífero de El Maestrazgo en la sierra de Irta.
Figure 4. Location of groundwater emergences (permanent and occasional) of Maestrazgo aquifer in Sierra de Irta.

Más al norte, en el área de Torre Badum, en el sector centro-oriental de la sierra de Irta, se producen importantes descargas en la base del acantilado del mismo nombre. El conjunto de surgencias se agrupa en dos zonas de playa rocosa separadas por un saliente. No se identifican salidas puntuales concretas, sino que se trata de

dos tramos de varios metros de longitud en los que el acuífero drena directamente al mar.

Finalmente, en el vértice noreste de la sierra, en el sector de Peñíscola, se encuentra la conocida como Font de Dins. Esta surgencia se sitúa en el afloramiento jurásico en el que se asienta el castillo de Peñíscola.

En los periodos húmedos y/o como consecuencia de precipitaciones torrenciales, se activan también una serie de manantiales “ocasionales” o “efímeros”.

De entre estas surgencias, las más meridionales se sitúan en el extremo norte de la playa del Carregador. Son drenajes difusos de escaso caudal que en los días de mar calmada pueden llegar a canalizarse en la playa constituyendo pequeños regueros (foto 2).

Diseminados por el arenal de playa de las Fuentes, situado justo al norte del puerto deportivo de Alcossebre, también afloran periódicamente numerosos “ullals” que desembocan al mar tras canalizarse en diversos regueros de escasa longitud (foto 2). En esta cala existen dos surgencias que se han catalogado como ocasionales, pero que se encuentran activas con relativa frecuencia, incluso en épocas de aguas bajas. Se trata de la denominada surgencia Playa de Las Fuentes Sur, que se sitúa en el extremo me-

ridional del arenal y de la surgencia Playa de Las Fuentes Norte, que se ubica próxima al espigón septentrional de cierre de la playa (foto 3).

En el área central de la sierra de Irta, en la vertiente de mar, se han identificado otros puntos de surgencia de carácter efímeros que únicamente se activan tras lluvias torrenciales y drenan durante cortos periodos de tiempo (días o semanas). Se sitúan unos 1800 metros al sur de Torre Badum, en los arenales de Playa del Ruso y de la Playa del Pebret (foto 4).

También, durante las campañas de muestreo, se ha constatado la presencia de un par de surgencias puntuales situadas unas decenas de metros al norte de la cala del Ruso, aunque estas solo se activan de forma muy esporádica.

Algunos estudios han puesto de manifiesto la presencia de otras surgencias alejadas de la línea de costa, aunque su situación exacta en el lecho marino se desconoce (Antón-Pacheco *et al.*, 2007; Domínguez y Ballesteros, 2012).



Foto 1. Surgencias de: Playa de las Fuentes Centro (imagen superior izquierda); Font de Dins (imagen superior derecha) y Torre Badum (imágenes inferiores).

Photo 1. Groundwater emergences of: Playa de las Fuentes Centro (top left image); Font de Dins (top right image) and Torre Badum (lower images).



Foto 2. Surgencias ocasionales de Playa del Carregador (imagen izquierda) y Playa Las Fuentes (imagen derecha).

Photo 2. Occasional upwellings of Playa del Carregador (left image) and Playa Las fuentes (right image).



Foto 3. Surgencias ocasionales en los extremos sur y norte de la Playa de Las Fuentes.

Photo 3. Occasional upwellings at the southern and northern ends of Playa de Las Fuentes.



Foto 4. Surgencias ocasionales de Playa del Russo (imagen izquierda) y Playa del Pebret (imagen derecha).

Photo 4. Occasional upwellings of Playa del Russo (left image) and Playa del Pebret (right image).

5. Caracterización hidroquímica de las surgencias de la sierra de Irta

Los distintos flujos que dan lugar a las surgencias de sierra de Irta presentan diferentes grados de interacción entre sí, con las aguas de los acuíferos detríticos adyacentes y con las aguas de intrusión. Estas hidrodinámicas locales provocan que los manantiales presenten características químicas propias que, además, sufren alteraciones puntuales bruscas por las aguas de lluvia que se infiltran tras episodios torrenciales significativos.

Con base en los parámetros físico-químicos de las muestras tomadas en abril de 2015 y noviembre de 2018 (Tabla 1 y Figura 5), las aguas del entorno de la sierra de Irta se pueden clasificar en dos grupos básicos: aguas de facies clorurado-sódicas, no potables y aguas de facies bicarbonatado-cálcicas, potables.

Las aguas del manantial de Font de Dins son bicarbonatadas cálcicas, si bien, en abril de 2015 tienen un contenido mayor en magnesio y sulfatos lo que las sitúa dentro del diagrama de Piper en una posición más cercana a una facies bicarbonatada sulfatada cálcico magnésica.

El resto de manantiales drenan aguas claramente de facies clorurado sódicas, no obstante, las aguas de las surgencias de Playa de Las Fuentes Centro, Playa del Carregador, Playa del

Russo, Playa del Pebret y Torre Badum, tienen altos contenidos en elementos típicos de las aguas marinas, mientras que las aguas de las surgencias de Playa de Las Fuentes Sur y Norte, aunque también tienen facies clorurado sódicas, muestran menor contenido en sales y su posición dentro del diagrama de Piper se aproxima a aguas cloruradas bicarbonatadas sódico cálcicas.

6. Grupos de aguas subterráneas en la sierra de Irta

Si bien existen dos claros grupos de aguas en la sierra de Irta, las influenciadas por las aguas marinas y las dulces, las concentraciones de los elementos mayoritarios en estos estadios de hidrodinámica estable en periodo húmedo, y las líneas evolutivas de iones como el cloruro muy abundante en agua de mar, los nitratos, indicativos en general de contaminación agrícola o el potasio, más abundante en el agua de mar aunque a veces su presencia puede indicar contaminación por aguas residuales, permite subdividir el grupo de las aguas clorurado-sódicas en varios subtipos (Tabla 1 y Figuras 7 y 8).

En el extremo sur de la sierra de Irta se diferencian tres aguas distintas, las de la Playa del Carregador, las de Playa de Las Fuentes Norte y Sur y las de Playa de Las Fuentes Centro.

Fecha	Facies hidroquímica	Potabilidad	Tipos de aguas	CL	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	Na	Mg	Ca	K	PH	C.E. (µs/cm)	T (°C)
16/04/2015	Clorurado-sódica	NO POTABLE	Carregador	4100	410	87	15	2221	268	256	68	7.26	10640	19.2
16/04/2015			Fuentes Centro	5780	670	97	9	2923	408	268	110	7.24	16140	19
16/04/2015			Fuentes	288	58	121	15	162	26	45	10	7.38	1150	18.4
16/04/2015			Sur-Norte	350	77	115	16	220	28	46	9	7.33	1319	19.3
15/04/2015			Torre Badum	3240	400	134	7	1664	212	144	90	7.35	9450	18.2
14/04/2015				3460	430	124	7	2040	204	140	87	7.31	9330	18.4
14/04/2015				3760	430	128	7	2246	202	138	80	7.28	9360	18.2
14/04/2015	Bicarbonatado-cálcica	POTABLE	Font de Dins	13	74	128	10	11	19	47	1	7.44	539	17.3

Fecha	Facies hidroquímica	Potabilidad	Tipos de aguas	CL	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	Na	Mg	Ca	K	PH	C.E. (µs/cm)	T (°C)
08/11/2018	Clorurado-sódica	NO POTABLE	Carregador	4600	472	212	16	2317	280	308	52	7.17	12150	18.7
08/11/2018			Fuentes Centro	7600	824	191	10	3772	510	430	91	7.18	17880	18.6
08/11/2018			Fuentes	540	89	233	13	286	42	96	10	7.36	1784	18.8
08/11/2018			Sur-Norte	580	91	224	14	322	45	91	11	7.27	1893	18.5
08/11/2018			Torre Badum	4300	540	220	7	2403	272	196	75	7.34	11660	18.1
08/11/2018				4200	508	207	7	2320	268	188	74	7.34	11190	18.5
08/11/2018				4400	532	217	7	2373	268	192	77	7.18	11980	18.6
06/11/2018	Bicarbonatado-cálcica	POTABLE	Font de Dins	12	68	193	8	10	15	72	1	7.26	546	17.6

Tabla 1. Grupos de aguas de las surgencias de la sierra de Irta según sus concentraciones en iones mayoritarios (muestras de abril de 2015 y noviembre de 2018).

Table 1. Water groups from the upwellings of the Sierra de Irta according to their concentrations in majority ions (samples of April 2015 and November 2018).

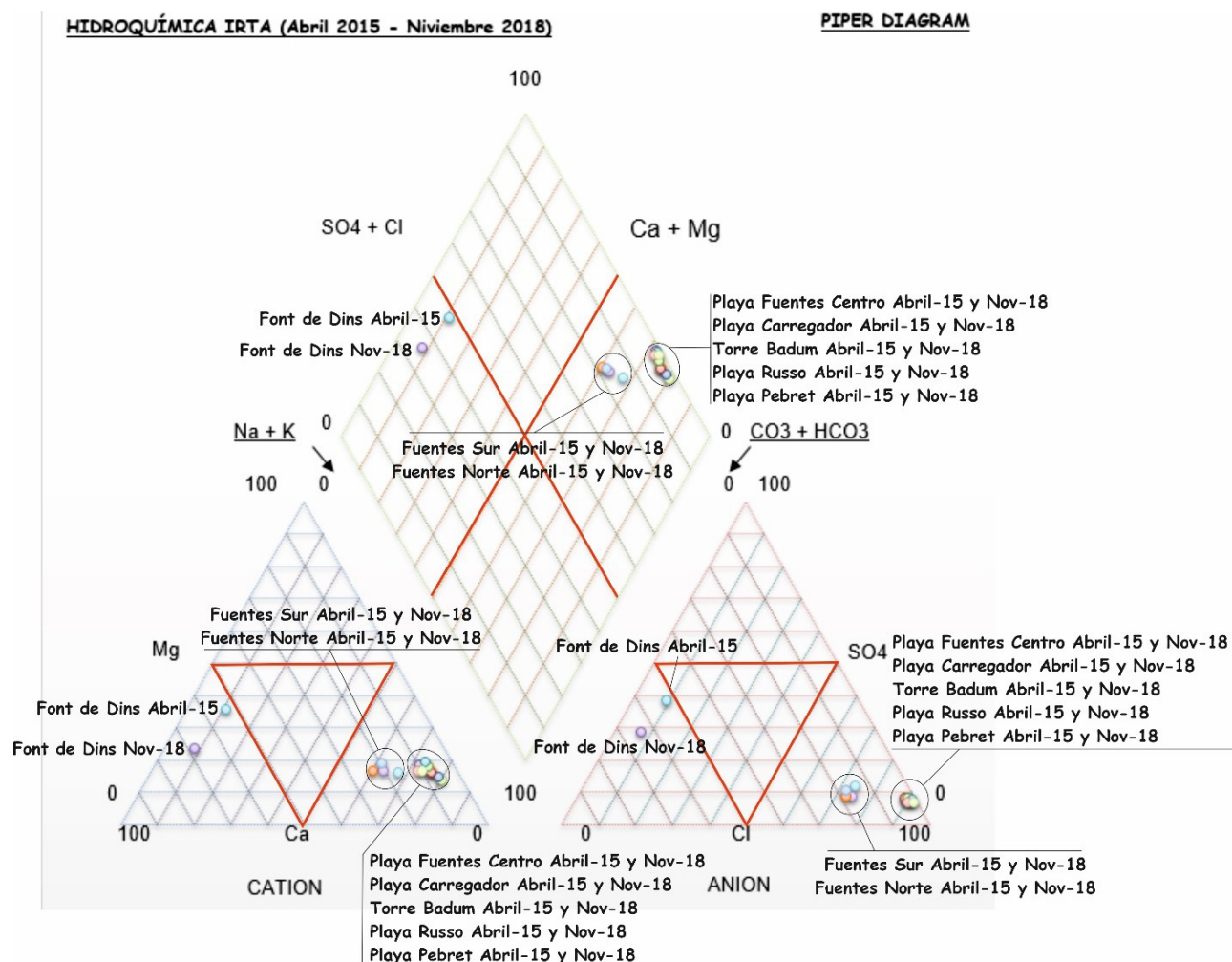


Figura 5. Facies hidroquímicas de las surgencias de la sierra de Irta (Muestras de Abril de 2015 y Noviembre de 2018).

Figure 5. Hydrochemical facies of the upwellings of the Sierra de Irta (Samples from April 2015 and November 2018).

Por un lado, las surgencias de Playa de Las Fuentes Norte y Sur muestran líneas evolutivas paralelas con picos y valles pronunciados que denotan gran afección por las lluvias o los periodos secos (Figura 6). En las dos campañas de referencia (abril-15 y nov-18) destacan además por su bajo contenido en sales propias de las aguas marinas (Cl, Na, Mg...) y en potasio o calcio, aunque presentan concentraciones más elevadas en nitratos (Figuras 7 y 8).

En el mismo arenal donde manan las surgencias anteriores drenan también las aguas tipo Playa de las Fuentes Centro que presentan una línea evolutiva distinta de las anteriores, con contenidos generalmente elevados en elementos propios del agua de mar (Cl, Na, Mg...), así como en potasio y, por contra, bajas concentraciones en nitratos. Todo ello indica, en este caso, influencia clara y constante de aguas marinas.

Un tercer tipo de aguas sería el de las surgencias de Playa del Carregador, las más meridionales, con concentraciones en sales marinas intermedias a los de las surgencias anteriores, líneas evolutivas diferentes y contenidos en nitratos generalmente más altos (Figura 6).

Un cuarto grupo de aguas sería el constituido por las surgencias de la zona central de la sierra de Irta, tanto la permanente de Torre Badum, como las efímeras de las Playas de Pebret y Russo. Todas ellas presentan en los análisis de referencia similares concentraciones en sales (Figura 7) y evoluciones que son idénticas salvo en los días inmediatamente posteriores a los eventos de precipitación que activan los manantiales ocasionales (Figura 9).

Este conjunto de manantiales, respecto a los iones propios de las aguas marinas, fijan concentraciones similares a las aguas del tipo Playa del Carregador. No obstante, los contenidos en nitra-

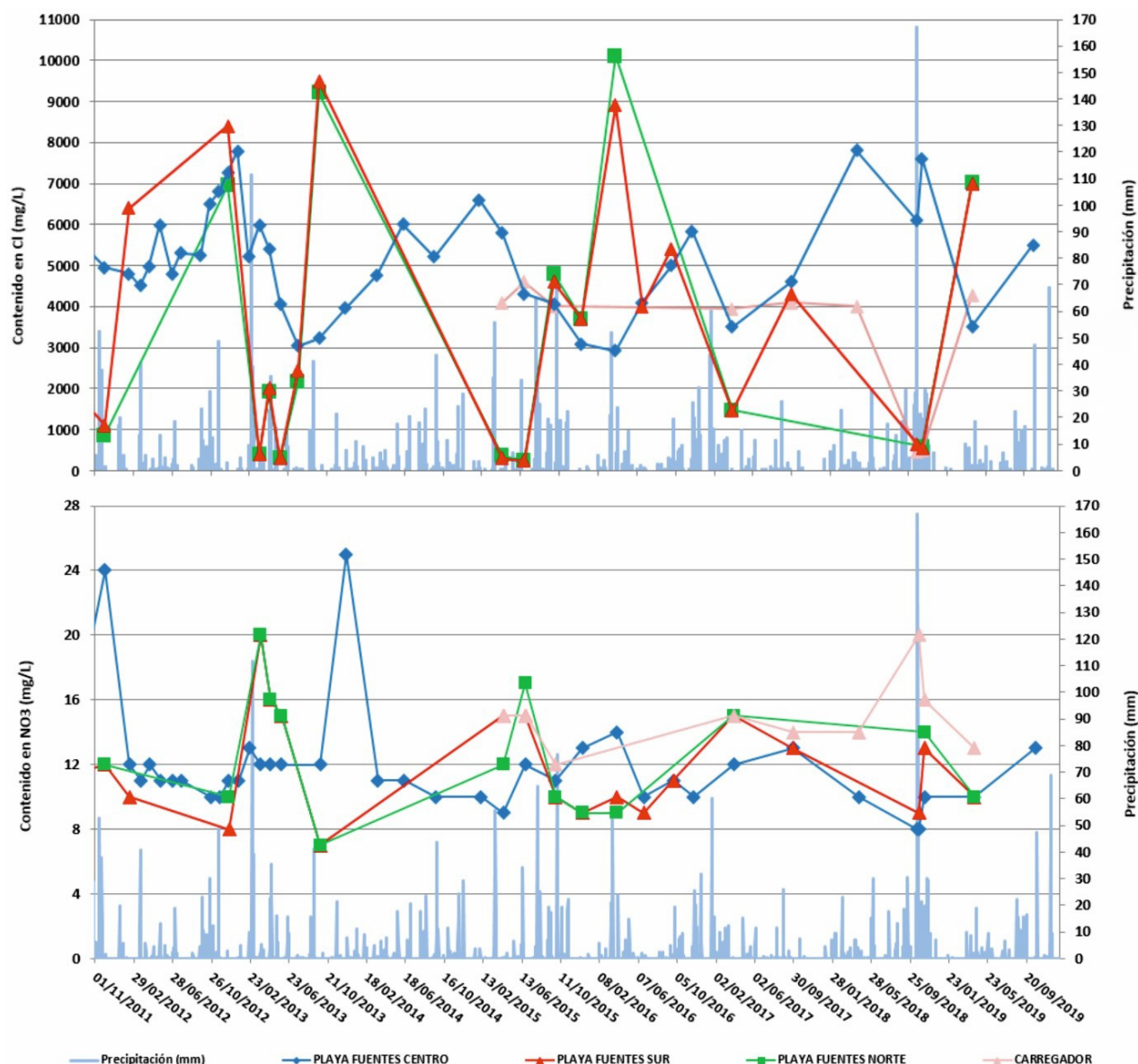


Figura 6. Evolución del contenido en Cl y NO_3 de las surgencias del sur de la sierra de Irtá.

Figure 6. Evolution of Cl and NO_3 content of the upwellings in the south of the Sierra de Irtá.

tos y calcio son superiores en la zona sur, mientras que es inferior en potasio. Estas diferencias, junto a la distancia que separa ambas áreas de surgencia, de más de 9 km, y la presencia intercalada de otras aguas con características hidroquímicas claramente distintas (manantiales de Playa de Las Fuentes), permite considerar que las surgencias del tipo Torre Badum y las de Playa del Carregador son consecuencia de flujos subterráneos independientes y de hidrodinámicas locales propias.

7. Conclusiones

Las principales descargas del acuífero de El Maestrazgo se producen a lo largo del frente

costero de la sierra de Irtá. En esta zona, existen una serie de surgencias permanentes bien conocidas y otras, ocasionales y/o efímeras, que solo se activan en épocas de aguas altas o tras eventos de precipitación torrencial y que se han identificado durante las campañas de muestreo realizadas en los últimos años.

El quimismo de todas ellas depende de hidrodinámicas locales en las que además de la mayor o menor conexión con las aguas de la cuña de intrusión marina y/o con las de los acuíferos detríticos de las planas adyacentes, tiene gran relevancia la influencia de las aguas de infiltración tras las lluvias. Los episodios torrenciales, además de activar los manantiales ocasionales,

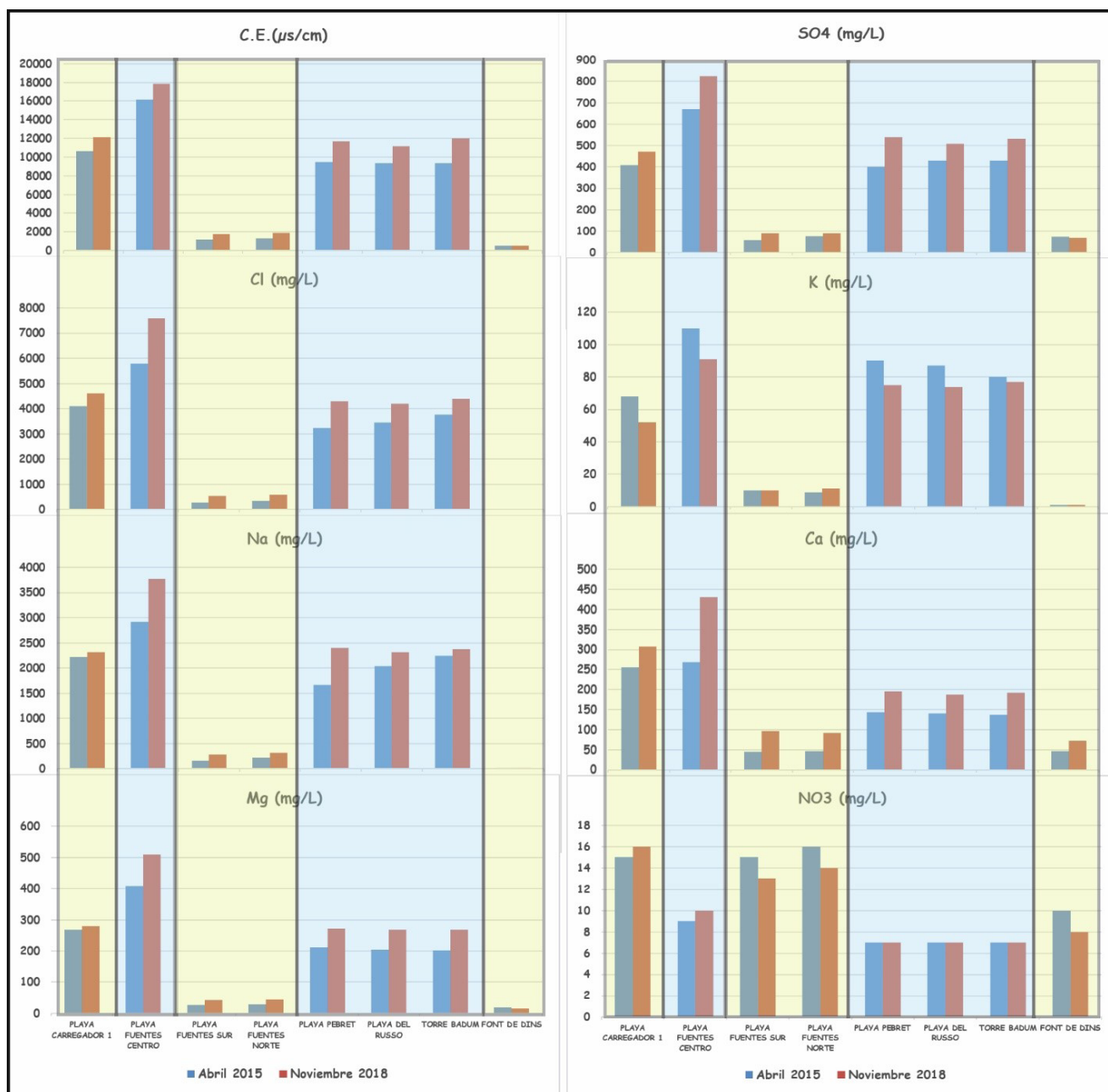


Figura 7. Grupos de aguas en las surgencias del acuífero de El Maestrazgo en la sierra de Irta en función de sus contenidos elementales (Muestras de Abril de 2015 y Noviembre de 2018).

Figure 7. Water groups in the springs of Maestrazgo aquifer in sierra de Irta according to their elemental contents (Samples from April 2015 and November 2018).

modifican de forma sensible el quimismo de las aguas durante cortos periodos de tiempo. Transcurridos unos días estas anomalías se minimizan y se alcanza un estadio que puede considerarse de “hidrodinámica estable dentro de un periodo húmedo”. Para la clasificación de las aguas de la sierra de Irta se han tomado dos muestras de referencia propias de este estadio, las correspondientes a la campaña de muestreo de abril de 2015 y la de noviembre de 2018.

Analizando las concentraciones en elemento mayoritarios de las muestras de estas campañas y la evolución histórica en elementos característicos del agua de mar como el ion cloruro, o propios de aguas contaminadas por actividades agrícolas como los nitratos, se han diferenciado cinco tipos de aguas en la sierra de Irta.

De sur a norte se encuadran en primer lugar las *aguas de la Playa del Carregador*, clorurado-sódicas, con salinidades medias (4.100 –

4.600 mg/L Cl; 2.221 – 2.317 mg/L Na) y contenidos en nitratos en torno a 14-16 mg/L NO₃.

En la zona de playa de Las Fuentes se diferencian dos grupos o tipos de aguas, todas clorurado-sódicas. La surgencia permanente de *Playa de Las Fuentes Centro* es la que muestra aguas con un contenido medio en sales más elevado (5.780 – 7.600 mg/L Cl y 2.923 – 3.772 mg/L Na); mientras que las surgencias ocasionales del tipo *Playa de Las Fuentes Norte-Sur*, con marcados picos y valles en su registro histórico, presentan en los análisis de referencia aguas poco salinas (288 – 580 mg/L Cl y 162 – 322 mg/L Na).

Un cuarto grupo de aguas, las denominadas del tipo *Torre Badum*, incluiría a todas las sur-

gencias (permanentes y efímeras), de facies clorurado-sódicas, que se sitúan en la parte central del frente costero de la sierra de Irta. Estos manantiales, en un periodo de aguas altas de “hidrodinámica estable”, presentan salinidades intermedias (3.240 – 4.400 mg/L Cl y 1.664 – 2.403 mg/L Na).

Finalmente, en el sector de Peñíscola, se ubican las aguas tipo *Font de Dins*. Se trata de aguas dulces (C.E. < 550 µs/cm), con contenidos mínimos en sales características del agua de mar (12 – 13 mg/L Cl y 10 – 11 mg/L Na), aptas para el consumo humano y con una facies bicarbonatada-cálcica típica de acuíferos carbonatados.

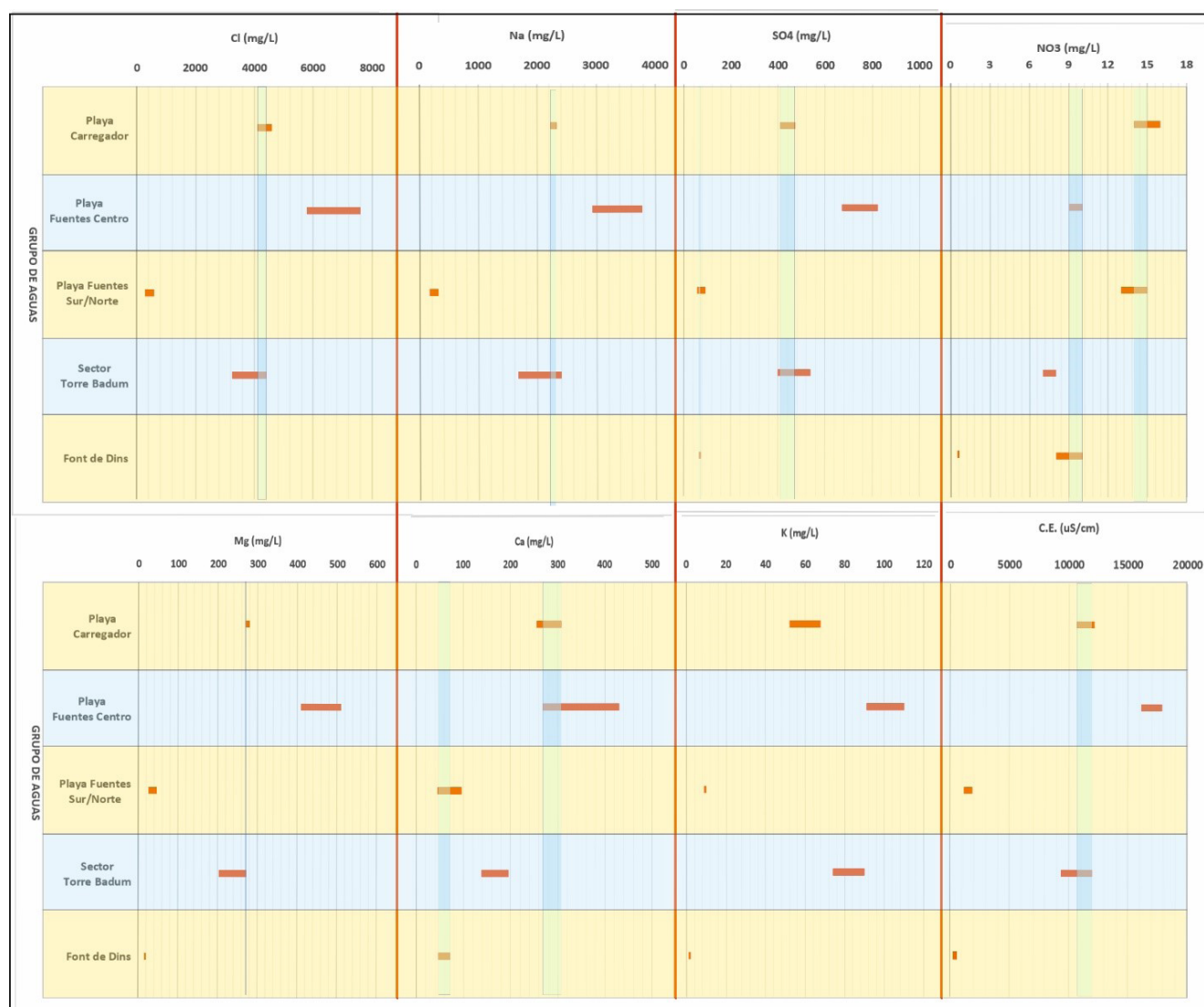


Figura 8. Rangos de variación en las concentraciones de los elementos mayoritarios en los grupos de aguas del acuífero de El Maestrazgo en la sierra de Irta. Tramos coincidentes entre grupos distintos (Muestras de Abril de 2015 y Noviembre de 2018).

Figure 8. Ranges of variation in the concentrations of the major elements in the water groups in the springs of Maestrazgo aquifer in sierra de Irta. Coincident sections between different groups (Samples from April 2015 and November 2018).

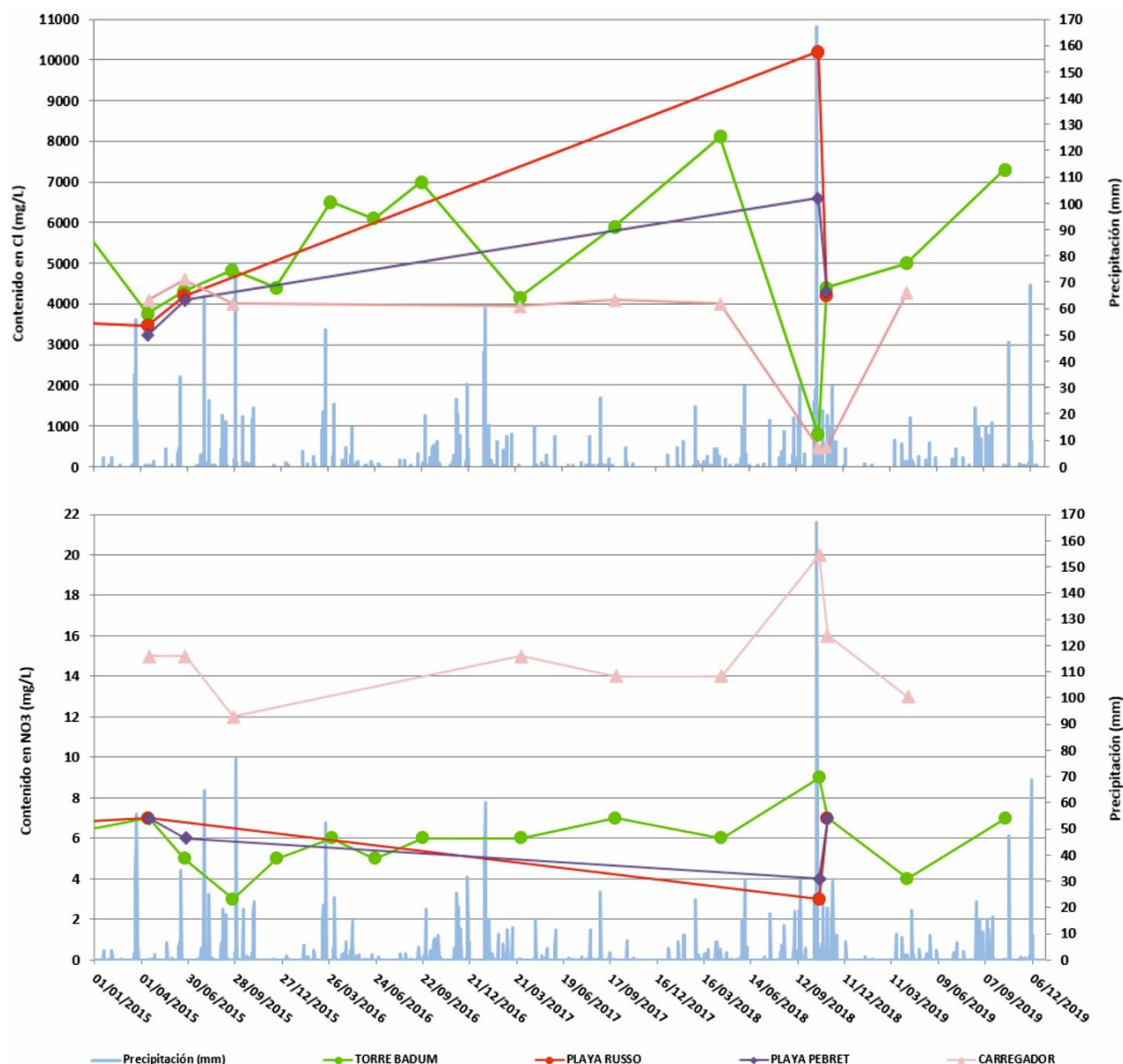


Figura 9. Evolución del contenido en Cl y NO_3 de las surgencias de la zona central de la sierra de Irtá.

Figure 9. Evolution of Cl and NO_3 content of the upwellings in the south of the Sierra de Irtá.

Agradecimientos

Los autores agradecen la inestimable ayuda ofrecida por la empresa de distribución de agua potable FACSA y en especial a sus operarios en la localidad de Peñíscola que han facilitado amablemente, a lo largo de los últimos años, el acceso a puntos de abastecimiento para la toma de datos y muestras de agua.

Referencias

Andreo Navarro, B., Vías Martínez, J. M., Marín Guerrero, A. I., Mejías Moreno, M., and Ballesteros, B.

J. 2007. Estimación de la recarga mediante el método APLIS en el acuífero Jurásico de El Maestrazgo (Castellón, NE España). Los acuíferos costeros: retos y soluciones. TIAC 07. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y aguas subterráneas, 23, 893-902.

Antón-Pacheco, C., Araguás, L., Ballesteros, B., Barnolas, A., Casas, A., Gil, I., Gumiel, J. C., López-Gutiérrez, J., Mejías, M., Plata, J. L., Samsó, J. M., Jiménez, I., Marina, M., Mediato, J., and Núñez, I. (2005). Investigación sobre el comportamiento hidrogeológico de formaciones acuíferas profundas. Aplicación a la Unidad Hidrogeológica 08.07 (El Maestrazgo). Desarrollo metodológico. Recopila-

- ción y síntesis de la información. Informe preliminar. Centro de documentación IGME: H1-002-05, 535 pp.
- Antón-Pacheco, C., Ballesteros, B. J., Mejías Moreno, M., de Miguel, E., Gumiel, J. C., Gómez, J. A., and Callejo, P. (2007). Identificación y cartografía de surgencias costeras en el acuífero kárstico de El Maestrazgo (Castellón) mediante técnicas de tele-detección aeroportada en el infrarrojo térmico. *Boletín Geológico y Minero*, 118, 649-670.
- Ballesteros, B. J., Mejías Moreno, M., Marina Rojo, M., and Domínguez Sánchez, J. A. (2007a). Estimación de la recarga natural por subcuencas hidrologías en el acuífero regional Jurásico de El Maestrazgo (Castellón). Informe inédito. Madrid. 55 pp.
- Ballesteros, B. J., Marina Rojo, M., Mejías Moreno, M., and Domínguez Sánchez, J. A. (2007b). Caracterización hidroquímica del acuífero carbonatado profundo de El Maestrazgo (Castellón). Los acuíferos costeros: retos y soluciones. TIAC 07. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y aguas subterráneas, 23, 549-564.
- COPUT (1990). Estudio de identificación de las descargas al mar del acuífero del Maestrazgo en la zona litoral entre Alcocebre y Peñíscola. Informe inédito.
- COPUT (1992). Estudio de investigación de las descargas de agua subterránea al mar por la Sierra de Irta. Mancomunidad del Baix Maestrat (Castellón). Informe inédito.
- Domínguez Sánchez, J. A., and Ballesteros, B. J. (2012). Identificación de descargas submarinas en la plataforma continental mediterránea procedentes del acuífero kárstico de El Maestrazgo (Castellón – España). Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, 29(1), 255-269.
- Domínguez Sánchez, J. A., Mejías Moreno, M., and Rosado Piqueras, S. (2016). Redes de observación MASb Maestrazgo Oriental y Plana de Vinaroz. Informe recopilatorio 2012-2015 y anejos. Informe inédito. 138-346.
- García-Orellana, J., García-Solsona, E., Masqué, P., Ballesteros Navarro, B. J., López, J., Mejías Moreno, M., and Marina Rojo, M. (2006). Evaluación de la descarga de un manantial costero mediante isótopos de radio: Las Fuentes de Alcossebre (Castellón). Las aguas subterráneas en los países mediterráneos. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas, 17, 301-309.
- García-Solsona, E., García-Orellana, J., Masqué, P., Mejías Moreno, M., and Ballesteros, B. J. (2007). Radium isotopes as tracers of submarine groundwater and nitrogen discharge in karstic area. 17th Annual V.M. Goldschmidt Conference. 20-24 agosto 2007, Colonia (Alemania). Goldschmidt Conference Abstracts Volume: A308.
- García-Solsona, E., García-Orellana, J., Masqué, P., Rodellas, V., Mejías Moreno, M., Ballesteros, B. J., and Domínguez Sánchez, J. A. (2010). Groundwater and nutrient discharge through karstic coastal springs (Castelló, Spain). *Biogeosciences*, 7, 2625-2638. DOI: 10.5194/bg-7-2625-201.
- IGME-EPTISA (2005). Mejora del conocimiento hidroológico de la unidad hidrogeológica 08.07 El Maestrazgo – Estudio hidroclimático. Informe inédito. Madrid. 136 pp.
- IGME-CONSULMINA (2006). Caracterización hidroquímica e isotópica del acuífero profundo de El Maestrazgo. Informe de resultados. Informe inédito. Madrid. 136 pp.
- ITGE (1977). Plan nacional de investigación de aguas subterráneas. Investigación hidrogeológica de la cuenca media y baja del río Júcar (Sistema nº 55: Javalambre y Maestrazgo). Informe inédito.
- ITGE (1981). Análisis de posibilidades para la regulación de la descarga subterránea de los acuíferos del Maestrazgo a través de la sierra de Irta. Posibilidades de utilización en las planas litorales de Oropesa-Torreblanca y Vinaroz-Peñíscola. Informe inédito.
- Mejías Moreno, M., Ballesteros, B. J., Antón-Pacheco, C., Domínguez Sánchez, J. A., García-Orellana, J., García-Solsona, E., and Masqué, P. (2012). Methodological study of submarine groundwater discharge from a karstic aquifer in the Western Mediterranean Sea. *Journal of Hydrology*, 464–465, 27–40.
- Serrano Orts, V., Roca Mauri, A., Pérez Baviera, A., Nieto Salvatierra, M., Obarti Segrera, F., Ortiz Pérez, S., and Capilla Roma, J. (1995). Estudio de investigación de las descargas de agua subterránea al mar por la Sierra de Irta (U.H. 08.07: Maestrazgo). Mancomunidad del Baix-Maestrat, Castellón. 6th Hydrogeology Symposium, Spanish Association of Underground Hydrology, Sevilla, XIX, 679-697.

