

**TRABAJO DE FIN DE GRADO DE CIENCIAS DEL MAR**

**Septiembre 2021**

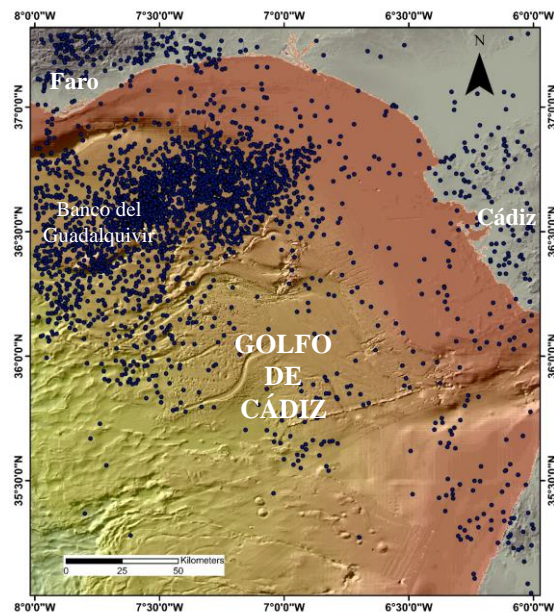
**Esther Flethes Rodríguez**

**Análisis de series sísmicas sobre las estructuras diapíricas del Golfo de Cádiz en los  
últimos 20 años**

**UNIVERSIDAD DE CÁDIZ**

**FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y AMBIENTALES**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



# ÍNDICE

<b>Resumen</b> .....	1
<b>Abstract</b> .....	2
<b>1. Introducción y antecedentes</b>	
1.1 Encuadre geográfico.....	3
1.2 Encuadre fisiográfico.....	4
1.3 Marco geológico.....	6
<b>2. Objetivos</b> .....	8
<b>3. Metodología</b> .....	8
<b>4. Resultados</b>	
4.1 Características generales de la sismicidad en la región objeto de estudio.....	11
4.2 Sismicidad y deformaciones diapíricas.....	18
4.3 Zonas de mayor actividad sísmica y lineaciones preferentes.....	20
<b>5. Discusión</b>	
5.1 Origen de la sismicidad.....	21
5.2 Estructuras diapíricas y sismicidad.....	22
5.3 Alta sismicidad, lineaciones y límite de placas.....	23
<b>6. Conclusiones</b> .....	25
<b>7. Bibliografía</b> .....	26

## RESUMEN

El margen continental del Golfo de Cádiz, situado al SO de la Península Ibérica, es una región donde la actividad tectónica asociada a las cercanías al límite entre las placas de Eurasia y África presenta una alta complejidad. Como contribución al estudio de la actividad tectónica de esa región, este trabajo tiene como objetivo el análisis de la actividad sísmica de los últimos 20 años a lo largo de una amplia franja del margen continental situada entre la plataforma continental y el talud medio. Para ello se han utilizado datos procedentes del Instituto Geográfico Nacional, los cuales se han georreferenciado en ArcGis, y se han utilizado R-Commander y Excel con el fin de conocer las relaciones entre los distintos parámetros, teniendo en cuenta además sus correspondientes ubicaciones buscando de este modo patrones que pudieran explicar el origen de los distintos registros sísmicos. La región estudiada presenta una alta actividad sísmica que se concentra principalmente en el margen septentrional con una orientación NE-SO y en dos núcleos bien diferenciados en la zona meridional, mientras que el resto de la actividad sísmica se distribuye homogéneamente por todo el Golfo de Cádiz siguiendo una ligera orientación NO-SE. Los valores de magnitudes y profundidades más frecuentes se dan entre 1,5-2,5 y 10-40 km respectivamente, y la actividad posiblemente relacionada con las estructuras diapíricas se produce en los bordes de las mismas más que en el interior de éstas. Los valores de los parámetros marcan, en general, una sismicidad generada principalmente en la parte superior de la corteza, influenciada además por la deformación y desplazamiento de la Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz (UAGC). La sismicidad con orientación NO-SE se atribuyen principalmente a la falla transcurrente SWIM 2, y la zona de mayor actividad sísmica coincide con la orientación y situación del Banco del Guadalquivir, marcando junto a una serie de fallas el posible límite difuso entre las placas de África y Eurasia.

## **ABSTRACT**

The continental margin of the Gulf of Cadiz, located SW of the Iberian Peninsula, is a region where the tectonic activity associated with the proximity between the Eurasian and African plates is highly complex. As a contribution to the study of tectonic activity in that region, this work aims to analyze the seismic activity during the last 20 years along a wide sector of this continental margin situated between the continental shelf and the middle slope. For this, data from the National Geographic Institute have been used, which have been georeferenced in ArcGis, and R-Commander and Excel have been used in order to know the relationships between the diverse parameters, taking into account their locations and searching potential patterns that could explain the origin of the different seismic records. The region studied exhibits a high seismic activity mainly concentrated in the northern region of this margin with a NE-SW orientation as well as other two well differentiated groups at the meridional region. The rest of the seismic activity is homogeneously distributed throughout the Gulf of Cádiz following a slight orientation NW-SE. The most frequent values of magnitudes and depths are between 1.5-2.5 and 10-40 km respectively, and the activity possibly related to diapiric structures occurs at the edges of these structures rather than inside them. In general, the values of the parameters show a seismicity whose origin could be mainly in the upper part of the crust, also influenced by the deformation and displacement of the Allochthonous Unit of the Gulf of Cadiz (AUGC). The seismicity with NW-SE orientation is mainly attributed to the SWIM 2 transcurrent fault, and the zone of greatest seismic activity coincides with the orientation and situation of the Guadalquivir Bank, locating together with a series of faults, the possible diffuse boundary between the African and Eurasian plates.

## **1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES**

La región objeto de estudio del presente Trabajo de Fin de Grado se enmarca en el margen continental septentrional del Golfo de Cádiz. La mayoría de los estudios desde el punto de vista de la geología estructural en el Golfo de Cádiz se han realizado sobre los dominios fisiográficos que se extienden desde la plataforma continental externa a los segmentos más profundos del talud continental (Maldonado et al., 1999; Medialdea et al., 2004, 2009; Fernández-Puga et al., 2007; Somoza et al., 2021). Son muy diversos los procesos de naturaleza geológica y oceanográfica que despiertan el interés en el estudio de esta región desde hace ya décadas. En parte asociados a la cercanía de esta región con el límite entre las placas de Eurasia y África y en parte asociado a los procesos de intercambio de masas de agua entre el Atlántico y el Mediterráneo a través del Estrecho de Gibraltar.

Con este trabajo de fin de grado se pretende realizar una aportación al conocimiento de la actividad tectónica de esta región del margen a través del análisis de la sismicidad actual, el origen de la misma y su posible relación con las deformaciones más recientes de las estructuras diapíricas que deforman notablemente la superficie del fondo en regiones principalmente del talud.

### **1.1 Encuadre geográfico**

El marco geográfico de la zona de estudio queda definido por los paralelos 35° y 37°30' de latitud norte y por los meridianos 6° y 8° de longitud oeste (Fig. 1). Desde el punto de vista geográfico el Golfo de Cádiz es un entrante del océano Atlántico en la costa del suroeste de la Península Ibérica, que se encuentra entre el cabo de San Vicente, Portugal, y el Estrecho de Gibraltar, España, donde se conecta con el Mar de Alborán. Dicho marco geográfico queda definido por la extensión de las estructuras diapíricas a lo largo del margen estudiado, ocupando hasta regiones del talud medio-inferior.

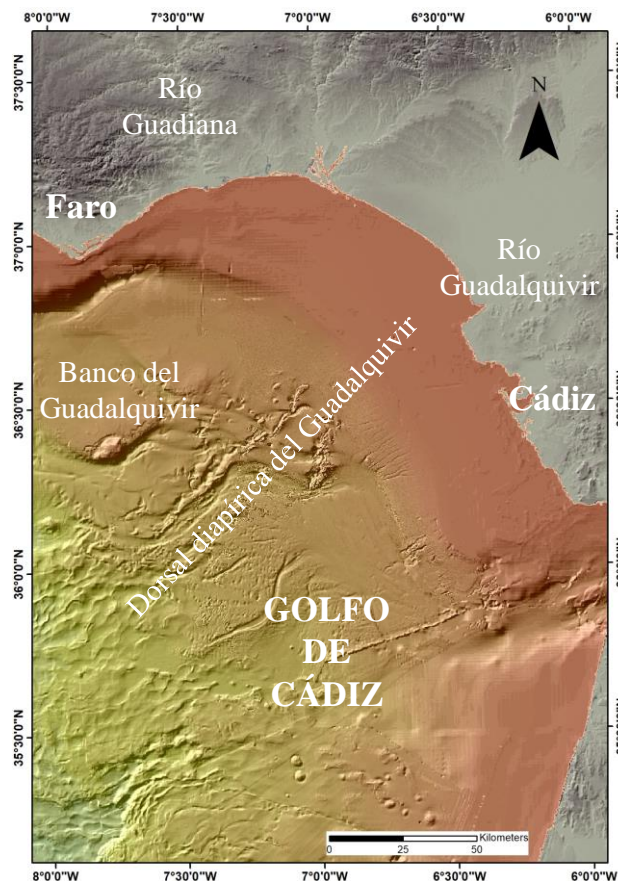


Figura 1. Encuadre geográfico de la zona de estudio

## 1.2 Encuadre fisiográfico

El Golfo de Cádiz presenta, de manera general, una fisiografía bastante compleja e irregular muy influenciada de manera general por la actividad tectónica. En este sentido, las estructuras diapíricas deforman una amplia región del talud medio e inferior, siendo más notable esta deformación en la parte externa del Arco de Gibraltar debido a la presencia de las Unidades Béticas y Rifeñas (Medialdea et al., 2009; Matías et al., 2012), así como a los procesos de erosión y sedimentación actuantes, principalmente causados por las corrientes que se producen debido a la circulación de las masas de aguas profundas, procedentes del Mediterráneo, que circulan a alta velocidad por el Estrecho de Gibraltar hacia el Atlántico.

Por tanto la morfología de esta región, se hace especialmente compleja en el talud continental, debido a la interacción de varios factores (Vázquez et al., 2008):

- 1) Neotectónica, en relación a su proximidad con un límite principal de placas entre Eurasia y África, el cual resulta difuso (Sartori et al., 1994; Zitellini et al., 2009)
- 2) Emplazamiento de un gran cuerpo tectono-gravitacional, la Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz, que controla la fisiografía especialmente del talud inferior, así como la reactivación de la misma durante el Plioceno terminal
- 3) Presencia de formaciones plásticas sobrepresionadas
- 4) Procesos de escape de fluidos
- 5) Influencia de las masas de agua sobre la superficie del fondo, especialmente sobre el talud superior y medio

En la zona de estudio encontramos, entre los principales rasgos morfológicos de tipo estructural los escarpes de geometría arqueada asociados a fallas normales de tipo lítrica localizada principalmente en el talud superior, así como escarpes de geometría más lineal asociados a fallas de tipo gravitacional y crestas y lineaciones de domos salinos que generan abombamientos en la región del talud (Fig. 2).

Los diapiros, estructuras en las que se centra este trabajo, son un tipo de intrusión en el cual un material de baja densidad, principalmente de naturaleza salina y/o arcillosa, deformable y dúctil y fácilmente móvil bajo la acción de esfuerzos, ascienden e intruyen las unidades sedimentarias superiores, pudiendo en muchos casos elevarse y aflorar hasta el nivel de la superficie. En muchos casos, la intrusión del material diapírico está relacionado con fracturas profundas, que pueden estar originadas en diferentes ambientes tectónicos, debido a que a través de ellas los materiales tienden con facilidad a ascender.

Las estructuras diapíricas de la región presentan una orientación preferente NNE-SSO, y en total se han cartografiado más de una veintena de ellas. Estos cuerpos se asocian mayoritariamente con una cuña de acreción, la cual está representada por la denominada Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz, que se explicará en los apartados posteriores, caracterizada por una señal sísmica de tipo caótica y cubierta por sedimentos del Mioceno tardío al Cuaternario (Maldonado et al., 1999; Medialdea et al., 2004). Se generan en diferentes contextos tectónicos y, de manera general, presentan morfología alargada, con longitudes variables que llegan a alcanzar casi los 90 km de longitud.

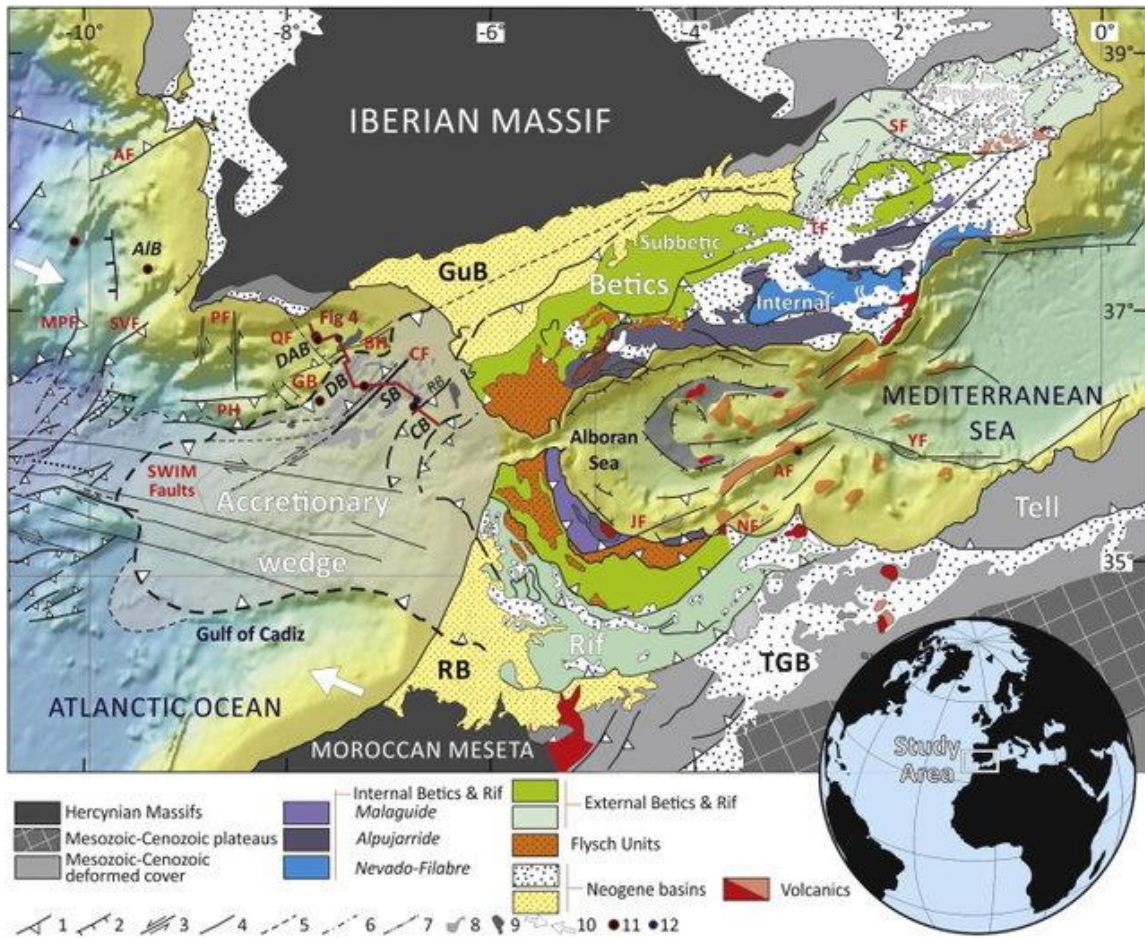


Figura 2. Mapa tectónico que muestra las principales unidades estructurales del orógeno Bético-Rif y las cuencas neógenas asociadas (Tomado de Hernández-Molina et al., 2016). Leyenda: SF, Falla de Socovos (Bética); TF, Falla de Tiscar (Bética); JF, Falla de Jehba (Rif); NF, Falla de Nekor (Rif); AF, Falla de Alborán Ridge (Alborán); y YF, Falla de Yusuf (Alborán). CF, Falla de Cádiz; QF, Falla de Quarteira; PH, Portimao High; MPF, Falla Marquês de Pombal; AF, Falla de Arrábida. 1= fallas de retroceso y empuje; 2= fallas normales; 3= fallas de deslizamiento; 4= fallas; 5= contacto debajo del sedimento; 6= fallas inferidas/probables; 7= fallas ciegas; 8= margoso+diapiros de sal (AUGC); 9=diapiros de sal; 10= convergencia placa Nubia-Ibera; 11= Sitios de IODP Exp. 339; 12= 2 pozos perforados por empresas de explotación de petróleo. Leyenda de las cuencas sedimentarias del margen sur ibérico: DAB= Cuenca profunda del Algarve; AIB= Cuenca del Alentejo; CB= Cuenca de Cádiz; DB= Cuenca de Doñana; RB= Cuenca de Rota; SB= Cuenca Sanlúcar

### 1.3 Marco geológico

En el margen septentrional del Golfo de Cádiz, se pueden diferenciar, de sur a norte, dos sectores principales; el margen Bético, donde está situada nuestra área de estudio, y el margen sudportugués o del Algarve.

En el margen Bético, la plataforma continental se sitúa sobre las unidades geológicas que constituyen la cadena Bética, pasando de las Unidades del Flysch del Campo de Gibraltar a las Unidades Subbéticas y al Complejo Alóctono del Golfo de Cádiz (Medialdea et al., 2004), (Fig. 2).

Las unidades geológicas de las Béticas están formadas por rocas sedimentarias no metamórficas que se acumularon sobre el margen sur y sureste del macizo Ibérico, siendo deformado y despegado posteriormente. Tienen en su mayoría un origen marino y fueron depositados en una cuenca sedimentaria perteneciente al dominio oceánico del Tethys, y situada en el borde continental del suroeste de Iberia (Fernández-Puga, 2004).

La deriva hacia el oeste y la colisión del Dominio de Alborán con los márgenes norteafricano y suribérico, provocó el desarrollo del orógeno Rif y Bético, y como consecuencia el emplazamiento radial de grandes masas alóctonas en la cuenca del Guadalquivir (promontorio ibérico), la cuenca del Rharb (promontorio del norte de África) y el Golfo de Cádiz (Medialdea et al., 2004; Perconig, 1960-1962; Flinch y Vail, 1998; Torelli et al., 1997; Maldonado et al., 1999; Gràcia et al., 2003), (Fig. 2).

Dichas masas alóctonas quedan segmentadas transversalmente por una serie de fallas de naturaleza transcurrente denominadas como SWIM, que presentan una orientación ONO-ESE. El sistema de fallas SWIM se concentra en una banda estrecha de 40 km de ancho y 600 km de largo aproximadamente, extendiéndose desde el monte submarino Hironnelle (al SO respecto de la costa de Portugal) hasta la plataforma continental marroquí, cruzando la Llanura Abisal de la Herradura y la Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz, formando el límite sur de la principal zona tectónica y sísmicamente activa del Golfo de Cádiz (Zitellini et al., 2009).

La estratigrafía de la cubierta sedimentaria en la región del Golfo de Cádiz está constituida por las siguientes tres unidades:

- Una unidad basal del Jurásico superior-Aptiense inferior formada por margas y calizas (Medialdea et al., 2004)
- Una unidad predominantemente terrígena de edad Cretácico superior-Eoceno inferior (lutitas con capas de sílex y calizas en la base) depositada en un ambiente de aguas profundas (Hayes et al., 1972)
- La Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz, el llamado "Olistostroma", una masa sedimentaria que cubre gran parte del talud continental del margen y que fue

emplazada a lo largo del Mioceno superior-Plioceno y engloba materiales de diversas edades

La historia evolutiva del Golfo de Cádiz tal como lo conocemos hoy, comienza en el Oligoceno, cuando la convergencia entre África y Eurasia se desaceleró, desencadenando la retirada dirigida hacia el sureste del sistema de subducción del Mediterráneo occidental (Rosenbaum y Lister, 2004). Después la evolución de esta región continuó principalmente a partir del Mesozoico, cuando la deriva hacia el norte de la placa africana provocó el cierre progresivo de las cuencas oceánicas y la rápida migración hacia el oeste del frente del Arco de Gibraltar hacia el Golfo de Cádiz (Dewey et al., 1989; Jabaloy et al., 1992). La existencia de regiones de compresión y extensión estrechamente yuxtapuestas entre Iberia y África se atribuye a la progresión hacia el oeste del frente del Arco de Gibraltar sobre la corteza de Thetys adelgazada (Maldonado et al., 1999).

## **2. OBJETIVOS**

El principal objetivo de este trabajo es el análisis de la actividad sísmica actual, teniendo en cuenta los datos de sismicidad de los últimos 20 años, en el sector nororiental del Golfo de Cádiz, así como el estudio de su posible relación con la deformación reciente de las estructuras diapíricas.

Para llegar a cubrir el objetivo principal, se han llevado a cabo los siguientes objetivos secundarios:

- a) Cartografía e interpretación de los parámetros que definen la sismicidad en la región estudiada
- b) Realización de estudio estadístico con las diversas variables de los registros sísmicos desde el año 2000 hasta Marzo del 2021

## **3. METODOLOGÍA**

Para la realización de este trabajo, se han utilizado datos obtenidos de la base de información sísmica del Instituto Geográfico Nacional (IGN) disponibles de forma libre a través de la página web de esta institución. El IGN es el organismo responsable, entre

otros cometidos, del registro de los eventos sísmicos a lo largo del territorio español, tanto en zonas emergidas como en zonas sumergidas.

Los pasos seguidos para descargar los datos, dentro de la web, se muestran en la figura 3. Se introdujo el período de tiempo escogido para el presente trabajo, entre el 01 de enero de 2000 y el 13 de marzo de 2021, así como los parámetros que deseamos descargar para realizar el análisis de los mismos. Estos han sido la magnitud, intensidad y profundidad del hipocentro, y el marco de coordenadas introducido fue de 35° a 37,30° de latitud norte y de -6° a -8° de longitud oeste.



Figura 3. Pasos a seguir para llegar al catálogo de terremotos en el IGN

Tras delimitar los parámetros de interés, se genera una tabla, pudiéndose elegir diferentes formatos de descarga. En este caso se seleccionó el formato con extensión CSV. Dichas siglas vienen del inglés “Comma Separated Values” y significan valores separados por comas. Se trata de un formato legible por los programas informáticos utilizados posteriormente para su representación y análisis espacial.

Para realizar un primer análisis se ha utilizado el programa Excel, para visualizar los datos, para la corrección de errores, y realizar el cambio de formato de los datos para que puedan ser reconocidos y posicionados correctamente por ArcGis. Posteriormente se han georreferenciado los datos, introducido como una capa, para trabajar con los datos correctamente ubicados y poder elaborar cartografías temáticas, y para ello se ha utilizado el programa ArcGis, programa informático especializado en el tratamiento y análisis de datos con información de referencias espaciales.

A continuación, los datos georreferenciados han sido posicionados con ArcGis en el sistema de proyección WGS\_1984\_UTM\_Zone\_29N, pudiéndose representar de manera clasificada tanto los datos de profundidad como de magnitud de los eventos sísmicos.

Para el estudio estadístico de los diversos parámetros de los eventos sísmicos se ha utilizado el programa R-Commander, trabajando con las variables de magnitud, profundidad e intensidad. Utilizando dichos parámetros se han realizado Tests de correlación de Pearson y gráficas de dispersión, así como regresiones lineales entre dichos parámetros con el fin de estudiar además las posibles relaciones entre los mismos.

En el caso de la magnitud, hay que señalar que, en el archivo obtenido del IGN este parámetro se expresa con cuatro tipos de unidades distintas:  $M_{bLg}$ , magnitud a partir de la amplitud de la fase Lg (Nuttli, 1973) que fue utilizada para terremotos ocurridos entre 1962 y 2002, y posteriormente para los ocurridos a partir de marzo de 2002;  $m_b$ , magnitud de ondas internas (Veith y Clawson, 1972) que fue utilizada para terremotos ocurridos a partir de 1998; y la universalmente conocida  $M_w$ , magnitud momento (Hanks y Kanamori, 1979) la cual se utiliza especialmente para valores altos de magnitud. Para este trabajo, no se ha tenido en cuenta la diferenciación que podría suponer la utilización de las diferentes escalas de magnitud.

Por último se ha utilizado el método de los mecanismos focales para intentar conocer los esfuerzos asociados a la sismicidad del período de tiempo estudiado. Sin

embargo, sólo se ha podido acceder a muy pocos resultados de estos mecanismos a través de comunicación personal por correo electrónico con el centro de descargas del IGN debido a que no existía la opción de descargar dicha información pública de la página web, y posteriormente se han calculado y posicionado.

#### **4. RESULTADOS**

Teniendo en cuenta los filtros espaciales y temporales prefijados, se han registrado un total de 23024 eventos sísmicos en la zona de estudio entre los años 2000-2021. En este apartado se analizan dichos eventos en los siguientes apartados:

- a) Características generales de la sismicidad en la región objeto de estudio
- b) Sismicidad y deformaciones diapíricas
- c) Zonas de mayor actividad sísmica y lineaciones preferentes

##### **4.1 Características generales de la sismicidad en la región objeto de estudio**

En este apartado se realiza una descripción de las características generales de los parámetros que definen la sismicidad en el período y región objeto de estudio. Tal como se observa en la figura 4, la mayoría de la actividad sísmica a lo largo de estos últimos 20 años se concentra de forma notable en el extremo septentrional de la región estudiada con una orientación general NE-SO, aproximadamente al N de la dorsal diapírica del Guadalquivir (Fig. 1), y hasta aproximadamente el frente de la Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz que se encuentra bordeando al Banco del Guadalquivir (Fig. 1). El resto de la actividad sísmica se distribuye homogéneamente por toda la zona del Golfo de Cádiz estudiada sin seguir un patrón con orientaciones bien definido.

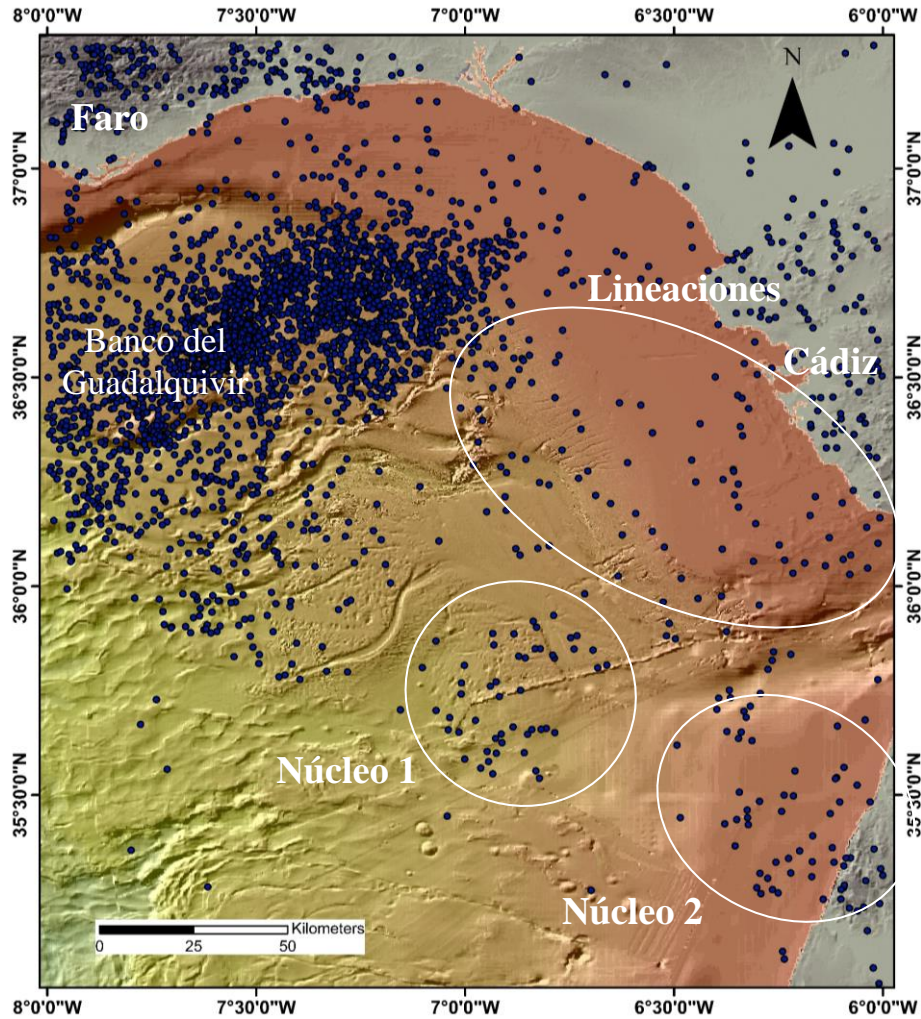


Figura 4. Los puntos azules muestran la distribución global de la actividad sísmica entre 2000-2021 en la zona de estudio

Atendiendo a las magnitudes de los datos registrados, a lo largo del rango del tiempo escogido (Fig. 5A) destaca que se dan valores iguales o superiores a 5 entre el año 2005 hasta el 2015. En cuanto a la distribución de las magnitudes mínimas, se observa una disminución gradual de las mismas entre los años 2000 y 2002, de 2 a 1, y un ligero aumento de nuevo hasta un mínimo de magnitud 2 a partir de mediados del año 2016. Por otro lado, obteniendo un histograma de la magnitud (Fig. 5B) se observa que las magnitudes más frecuentes son las de valores de entre 1,5-2,5 las cuales concentran el 77% de los eventos totales durante el período estudiado.

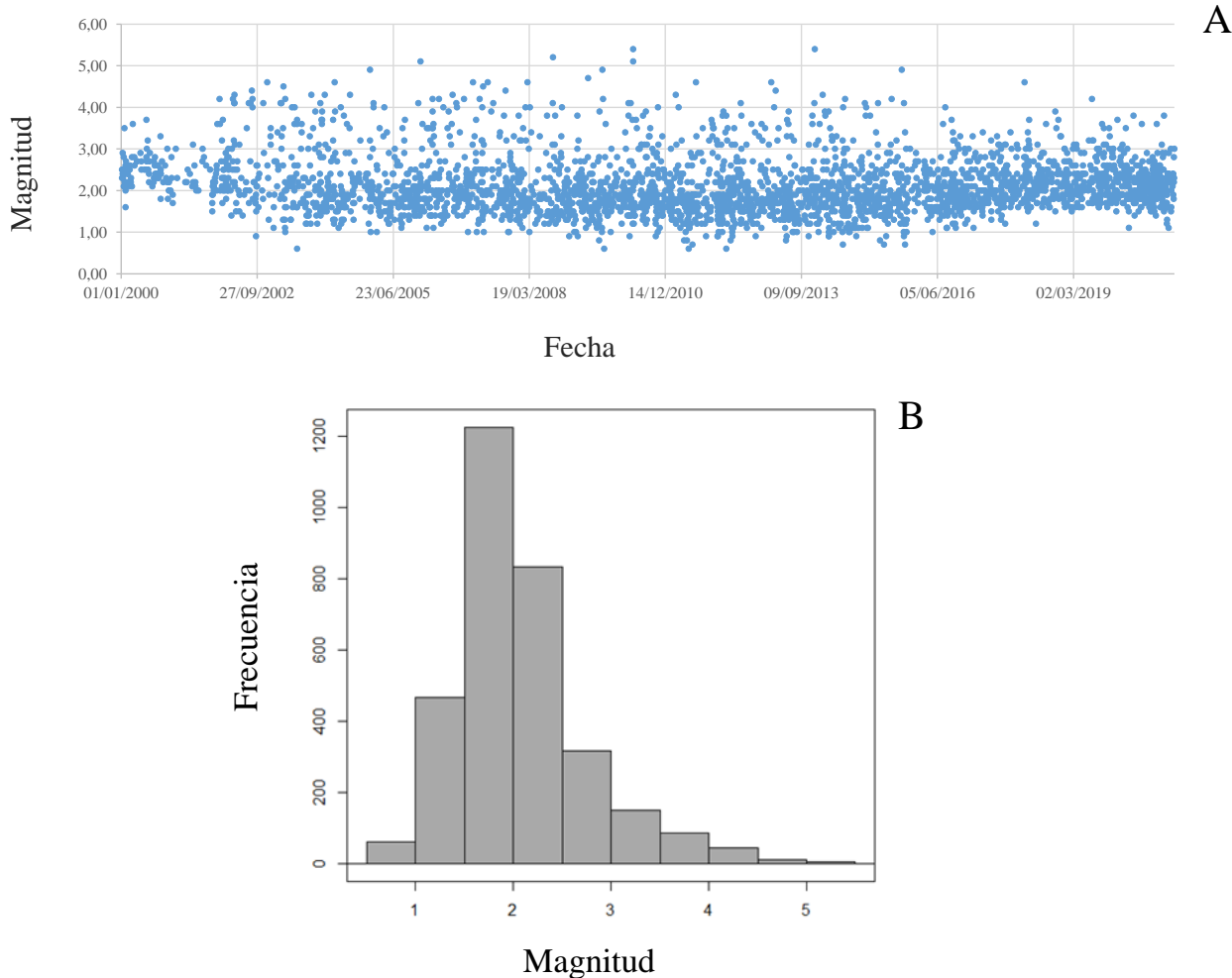


Figura 5. Distribución de las magnitudes registradas entre el año 2000 y 2021

Para poder observar la distribución de la sismicidad en función de la magnitud, se ha realizado una representación gráfica, de forma que cada aumento de una unidad tenga un color y tamaño identificativo (Fig. 6). Las magnitudes mínimas y máximas dadas son de 0,6 y 5,4 respectivamente. Se puede diferenciar una pequeña concentración de actividad de magnitud 3-4 en las coordenadas 36,30°N 7°O, al noreste de la región de mayor sismicidad. Y además dos pequeños núcleos marcados en la figura 6 al sureste de la región, los cuales son zonas donde estadísticamente las magnitudes son relativamente altas, con valores en torno a 5, respecto a las magnitudes registradas en el resto de la zona de estudio.

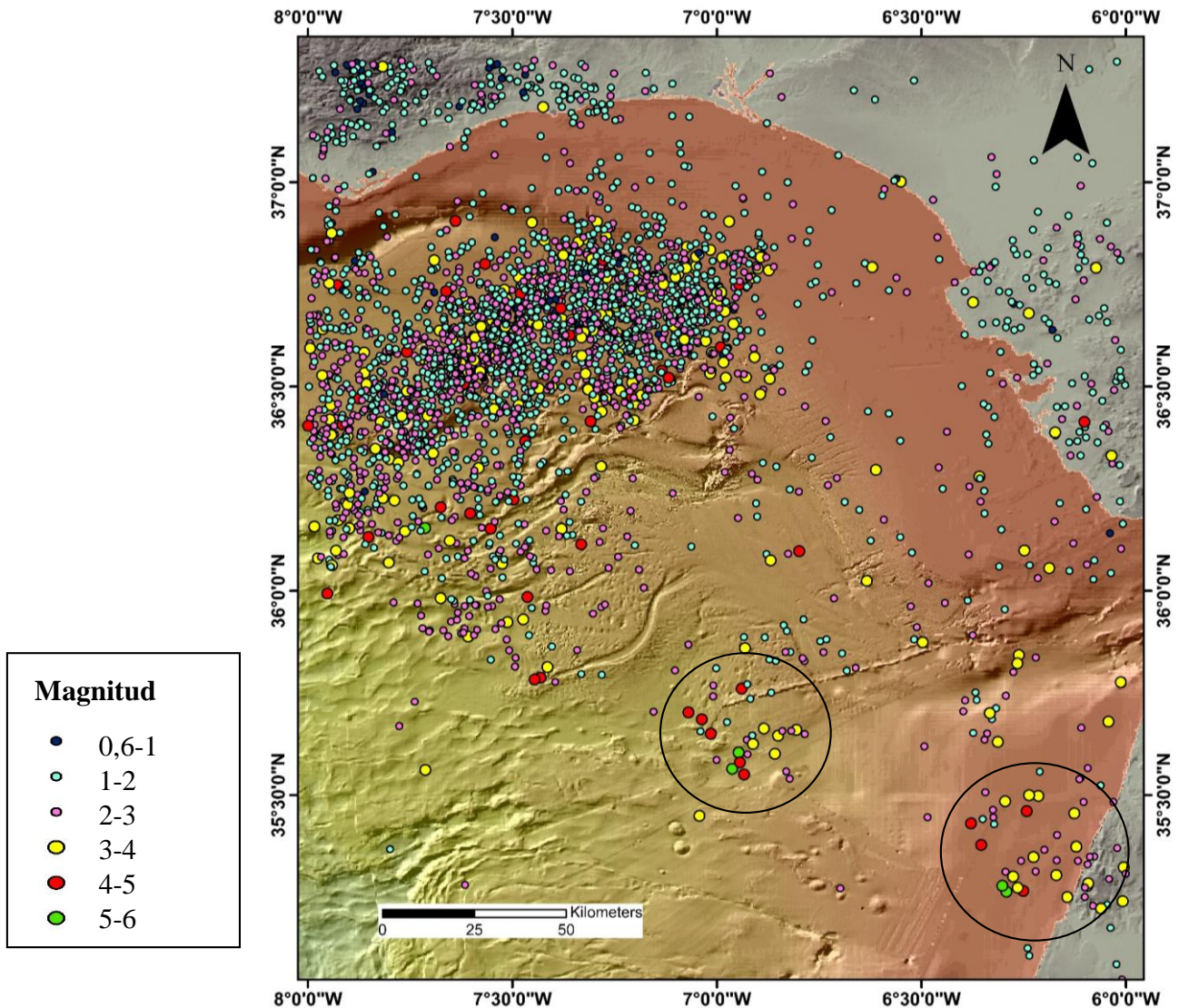


Figura 6. Mapa de la distribución espacial de la magnitud con dos círculos que marcan las zonas donde se han registrado los eventos de mayor magnitud durante el período de tiempo estudiado

Así mismo se ha estudiado la distribución de los eventos según sus profundidades a lo largo del tiempo estudiado (Fig. 7A) y se ha realizado un histograma de dicho parámetro (Fig. 7B). Se observa que las profundidades más frecuentes a las que se registra actividad sísmica son las del intervalo de 10-40 km resultando el 68% del total de los datos, siendo de 20-30 km el 29%, seguida de los 10-20 km que son el 22%, y de 30-40 km el 19%. Así mismo los datos que cuentan con la menor frecuencia son todos aquellos que se dan en profundidades de entre 90-180 km.

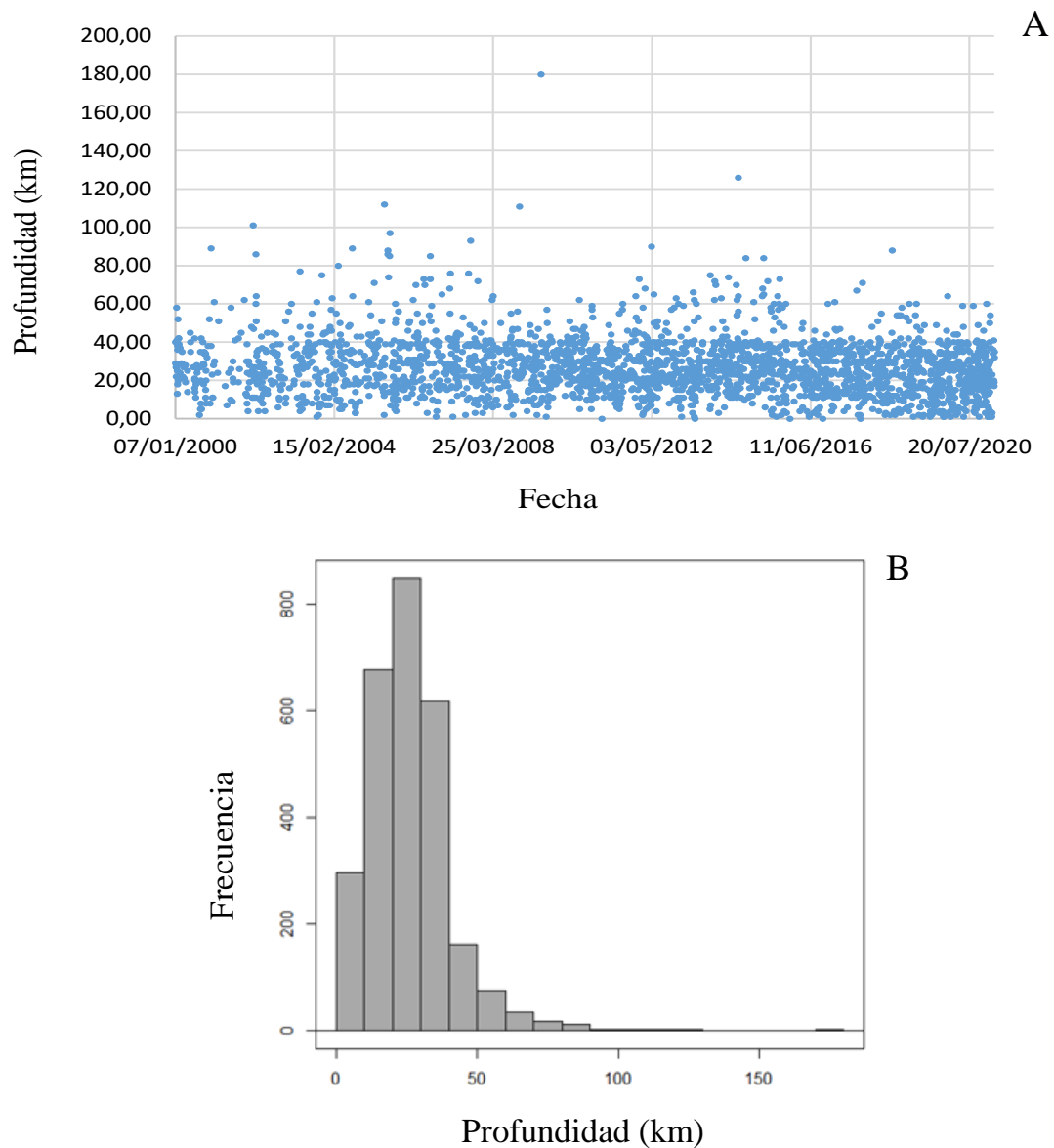


Figura 7. Distribución de las profundidades registradas entre los años 2000 y 2021

Realizando una filtración general de los datos según las distintas profundidades destaca que junto al continente africano, a su oeste, se registran datos de profundidades entre 100-150 km, e incluso de 150-180 km en las coordenadas de 35,20° N-7,50° O (Fig. 8).

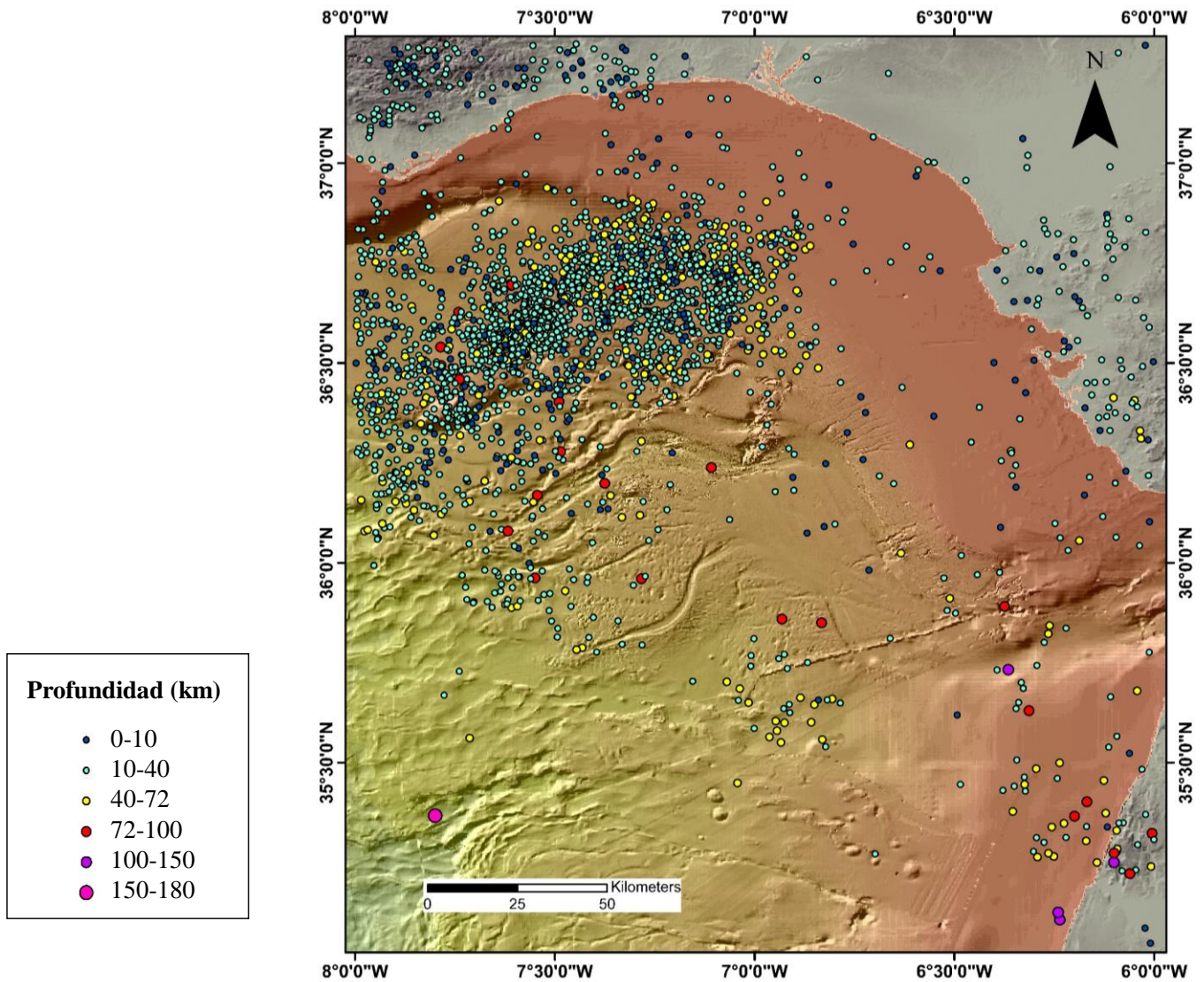


Figura 8. Distribución de las profundidades de los eventos sísmicos registrados

Además se planteó el estudio estadístico de la posible relación entre la magnitud y la profundidad de los eventos sísmicos, comenzando con la realización de un Test de correlación de Pearson para observar la relación entre ambas variables, obteniendo un p-valor de 0, por tanto se puede afirmar que su relación es significativa. Si para completar este test se realiza una regresión lineal, siendo la magnitud la variable dependiente y la profundidad la variable independiente, se vuelve a obtener un p-valor de 0, significando que efectivamente la relación entre ambas es significativa. De este modo, de manera general las magnitudes más altas corresponden a valores relativamente altos de la profundidad (Fig. 9).

Las magnitudes con valores de hasta 3,5 se dan en su mayoría en las profundidades de hasta 40 km. A su vez, entre los 30-65 km se registran magnitudes iguales o superiores a 4 hasta alcanzar los 5,4. A partir de los 65 km se vuelven a dar valores de magnitud iguales e inferiores a 4, descendiendo con la profundidad hasta los 180 km (Fig. 9).

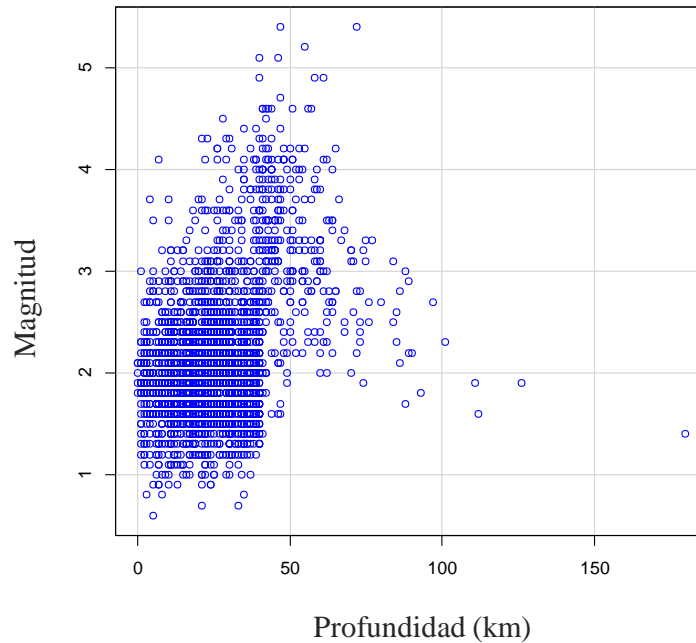


Figura 9. Gráfica de dispersión en R-Commander de la magnitud respecto la profundidad de la actividad sísmica del Golfo de Cádiz

Por último se ha realizado un estudio de los mecanismos focales. Sin embargo, dentro del marco de coordenadas solo se han podido calcular 4 mecanismos focales con los datos proporcionados en el rango de tiempo considerado por el presente trabajo (Fig. 10). Igualmente se ha decidido añadir al trabajo debido a que ayudan a confirmar otras estructuras observadas en la zona y aportan información sobre los tensores y esfuerzos actuantes. De esta forma se observan que 3 de los mecanismos describen esfuerzos transpresivos, y uno que describe un esfuerzo de carácter transtentivo, todos ellos con valores de magnitudes considerables. El detalle de estos eventos se muestra en la Tabla 1.

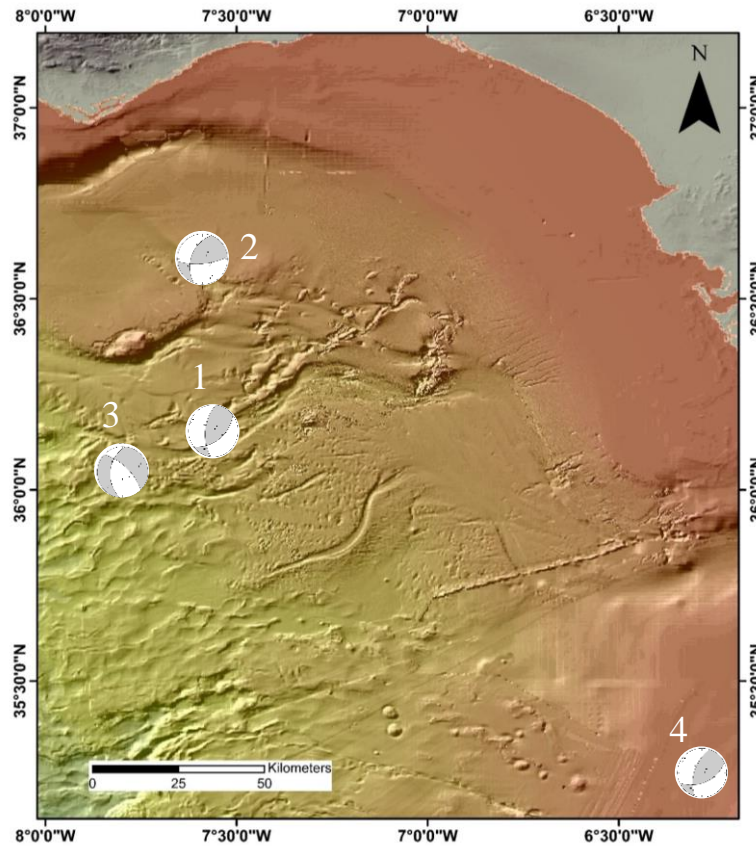


Figura 10. Distribución y tipo de mecanismos focales registrados en el Golfo de Cádiz

Tabla 1. Información sobre los mecanismos focales recogidos

Nº	IDENTIFICADOR	FECHA	LATITUD	LONGITUD	Mw
1	358976	10/12/2002	36° 09' 07" N	7° 33' 13" O	4,60
2	532428	03/01/2005	36° 36' 58" N	7° 35' 41" O	4,00
3	935025	18/08/2009	36° 04' 08" N	7° 48' 09" O	3,90
4	983696	22/04/2010	35° 15' 49" N	6° 17' 30" O	4,70

#### 4.2 Sismicidad y deformaciones diapíricas

Para el estudio de la actividad sísmica que pueda estar relacionada con la deformación de las estructuras diapíricas se ha superpuesto dicha actividad sobre la cartografía de diapiros a lo largo del talud superior y medio (Fernández-Puga et al., 2007). Posteriormente se crearon 23 polígonos delimitando las estructuras diapíricas, de forma que se pudieran filtrar los datos de la actividad sísmica obteniendo únicamente los que corresponden a las superficies ocupadas por los diapiros.

Teniendo en cuenta el espesor de la Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz estimada en estudios previos (Maldonado et al., 1999; Medialdea et al., 2004), la cual no se sitúa a más de 10 km de profundidad, se considera que la sismicidad generada en esta unidad, en la que se desarrollan la mayoría de las estructuras diapíricas estudiadas, no sobrepasaría en ningún caso dicha profundidad. Por tanto, se han filtrado además en función de la profundidad los datos que han sido registrados a profundidades iguales o inferiores a 10 km (Fig. 11). Se observa que dicha actividad se produce, en general, en los bordes de las estructuras diapíricas más que en su interior, además de que a estas profundidades no se ha producido actividad en todas las estructuras, concentrándose en aquellas localizadas al noroeste de la región de estudio, a partir del borde septentrional de la dorsal diapírica del Guadalquivir.

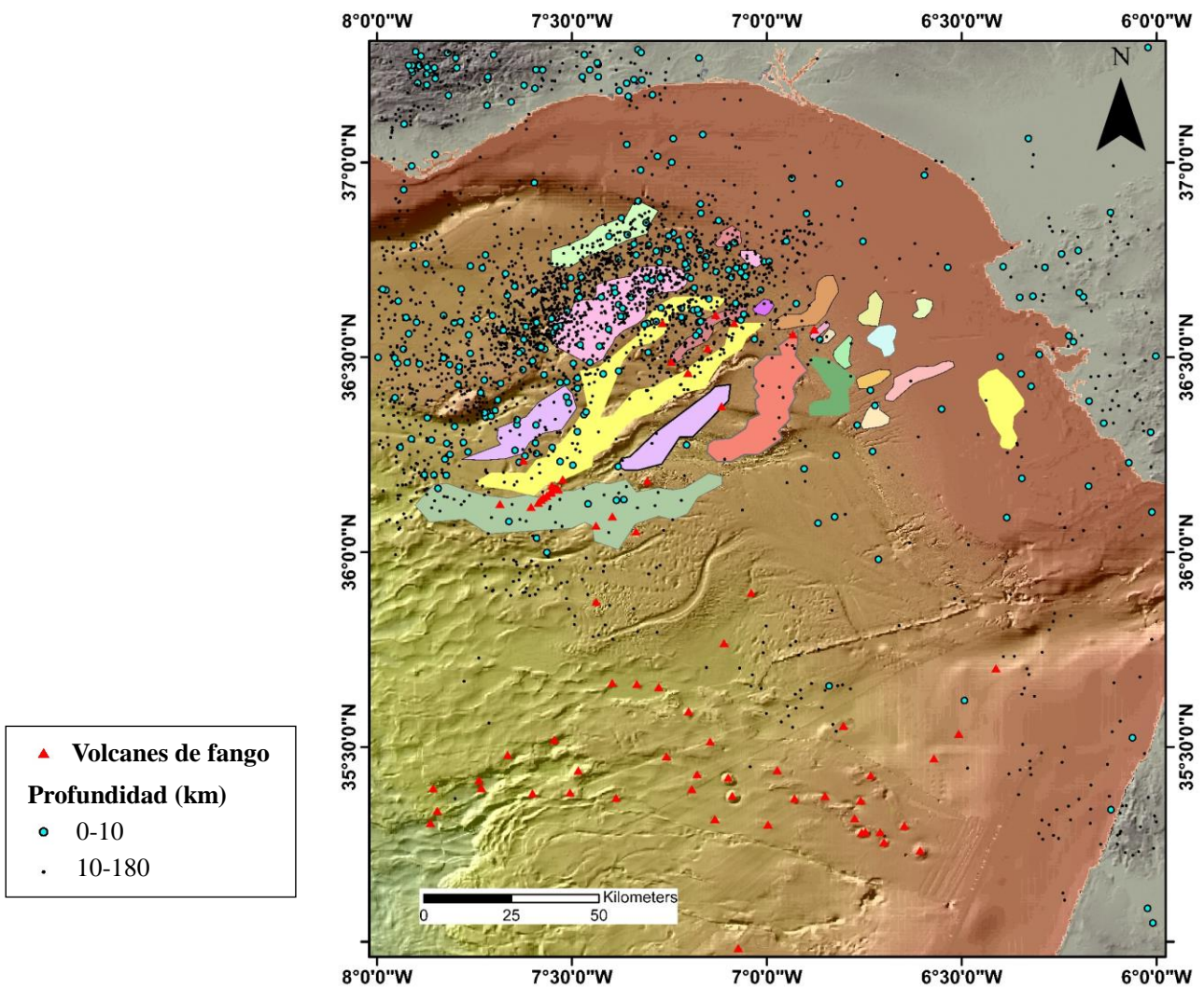


Figura 11. Distribución espacial de la sismicidad, destacándose en turquesa la generada a una profundidad igual o inferior a los 10 km, así como la distribución de los volcanes de fango en la zona de estudio

Tras este filtrado, se ha realizado un diagrama de dispersión de los eventos que han ocurrido en la región y a esas profundidades (Fig. 12), observándose que las magnitudes registradas se distribuyen de forma homogénea entre los valores 1 y 3 en todo el rango seleccionado de profundidades, destacando un valor por encima de 4 con foco localizado a 7 km.

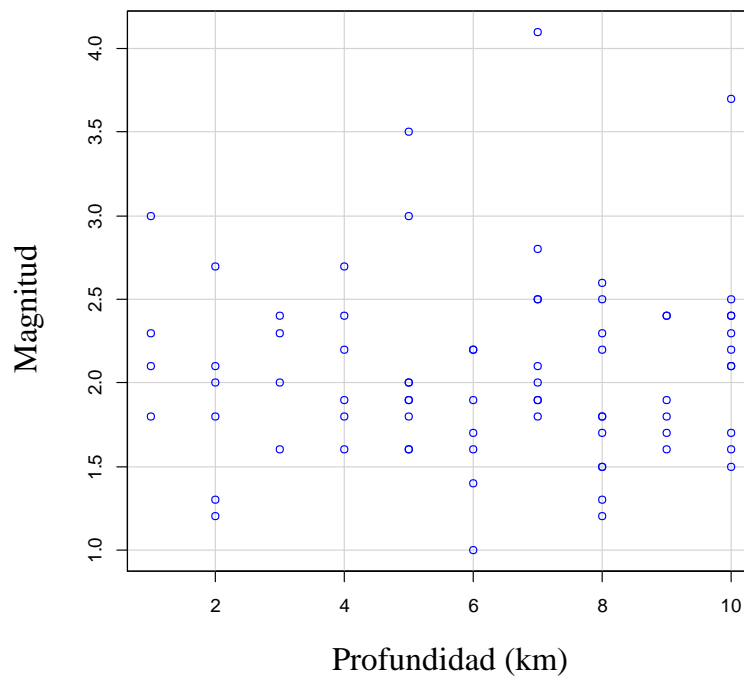


Figura 12. Diagrama de dispersión de los datos de los diapiros de la magnitud respecto la profundidad

### 4.3 Zonas de mayor actividad sísmica y lineaciones preferentes

La zona más activa desde el punto de vista de la sismicidad en los últimos años se concentra entre las latitudes  $36,45^{\circ}$ - $36^{\circ}$ N y las longitudes  $7^{\circ}$ - $8^{\circ}$ O aproximadamente, con una orientación NE-SO (Fig. 4), donde se concentra el 68% de la sismicidad de los últimos 20 años. Una característica destacable de esta región es la ocurrencia de eventos con magnitudes superiores a 4 (Fig. 13).

Desde la desembocadura del Guadalquivir hacia el S, a lo largo de la plataforma media y borde de plataforma se observan lineaciones de eventos sísmicos con orientación NO-SE localizada entre los  $35,30^{\circ}$ - $36,30^{\circ}$ N y  $6^{\circ}$ - $7^{\circ}$ O (Fig. 4), y cuyas magnitudes y profundidades no superan los valores de 3-4 y 72 km respectivamente.

Además, estudiando el área donde se encuentran dos núcleos con alta actividad sísmica localizada en la zona meridional, se observa que se dan un gran número de eventos de magnitudes altas iguales o superiores a 4 (Fig. 6) y a profundidades entre los 72-180 km (Fig. 8), siendo por tanto las zonas donde se registran las mayores magnitudes y profundidades de todo el Golfo de Cádiz.

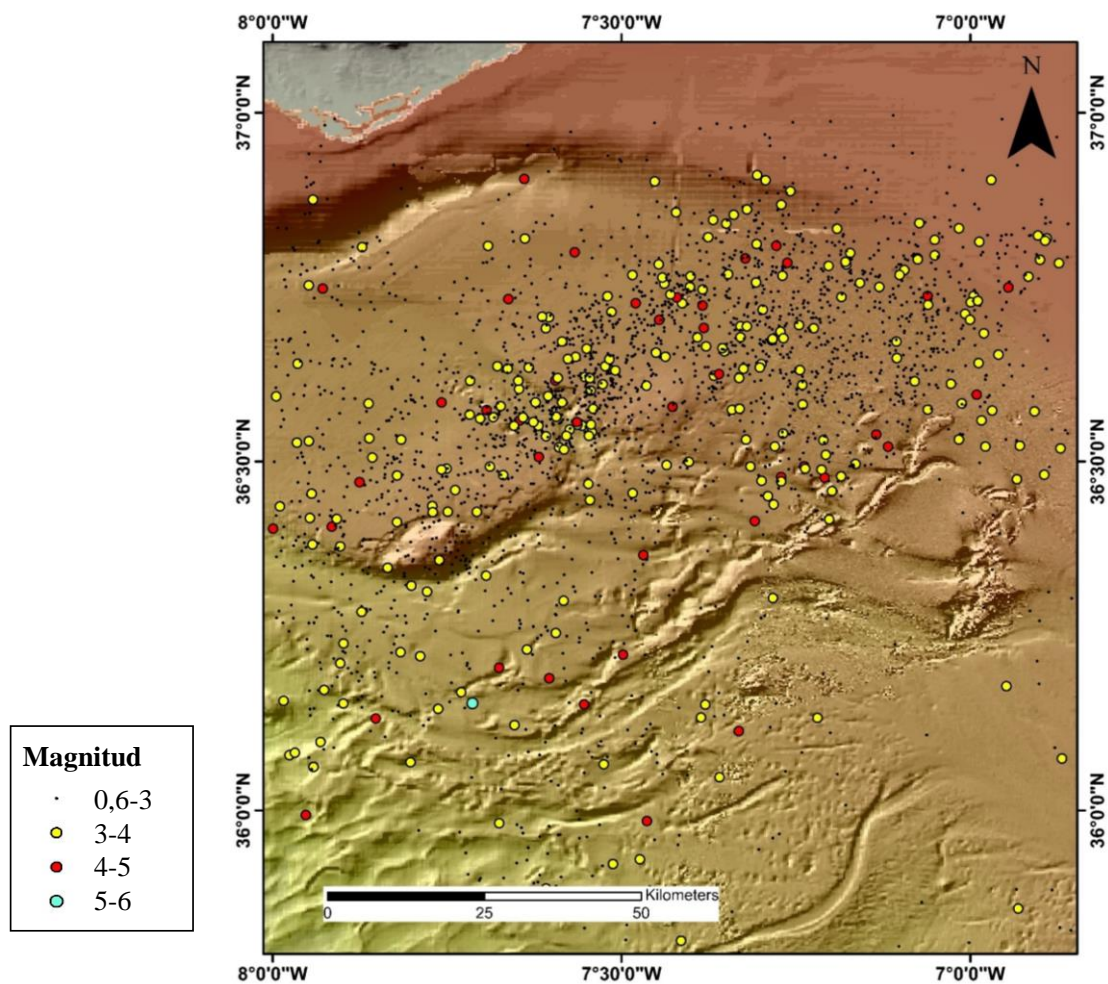


Figura 13. Distribución espacial de las magnitudes más altas (de 3 a 6) de la zona de mayor sismicidad del Golfo de Cádiz

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1 Origen de la sismicidad

En este apartado se tratará de explicar el posible origen de la sismicidad en la zona de estudio a lo largo de las dos últimas décadas teniendo en cuenta el análisis de los parámetros de la magnitud y la profundidad de los eventos.

Una de las características más significativas de la sismicidad en la zona de estudio es que se trata de una región bastante activa sísmicamente, con eventos de magnitudes bajas a moderadas y que se concentran principalmente entre los 10 y 40 km de profundidad.

Teniendo en cuenta la profundidad de la sismicidad en la zona de estudio y las variaciones de la reología de la litosfera con la profundidad, se puede llegar a afirmar la variación de comportamiento por parte de la actividad sísmica con la profundidad, siendo mucho más notable hasta de los 40 km, marcando esta profundidad probablemente la base de una corteza de tipo continental frágil y propensa a la ruptura ante los esfuerzos. A partir de los 40 km los materiales tendrían un comportamiento cada vez más plástico y las deformaciones pasarían a tener un carácter dúctil, dándose una actividad sísmica cada vez menos frecuente y de menor magnitud.

## **5.2 Estructuras diapíricas y sismicidad**

Teniendo en cuenta la información procedente de algunos trabajos relacionados principalmente con el estudio de la estructura profunda de la Unidad Alóctona del Golfo de Cádiz (UAGC), entre ellos los de Medialdea (2004) y Medialdea et al. (2009), se dice que la base de las estructuras diapíricas podría alcanzar una profundidad máxima de unos 6 km, llegando algunos de forma escasa a alcanzar como máximo los 10 km por debajo del fondo marino. Por tanto se plantea que parte de la sismicidad que se produce a lo largo del Golfo de Cádiz a profundidades someras podría tener su origen en la deformación de la UAGC.

En este sentido Vázquez et al. (2015) explican como posible origen de la generación de fracturas que llegan a deformar la superficie del fondo y que se encuentran sobre estructuras diapíricas o cercanas a las mismas, la propia deformación de los diapiros asociados a la actividad tectónica reciente de la UAGC (Fig. 14)

Por otro lado, estas fracturas relacionadas con la deformación de las estructuras diapíricas pueden favorecer los procesos de migración de fluidos, proporcionando una vía de escape para los materiales sobrepresionados, pudiendo dar lugar así a estructuras tipo volcanes de fango y pockmarks que también aparecen en esas zonas, como puede ser el caso de los volcanes Gazul, Anastasya y St. Petersburgo, cuya actividad actual se ha descrito desde diversos puntos de vista en varios trabajos (Jimenez-López et al., 2021).

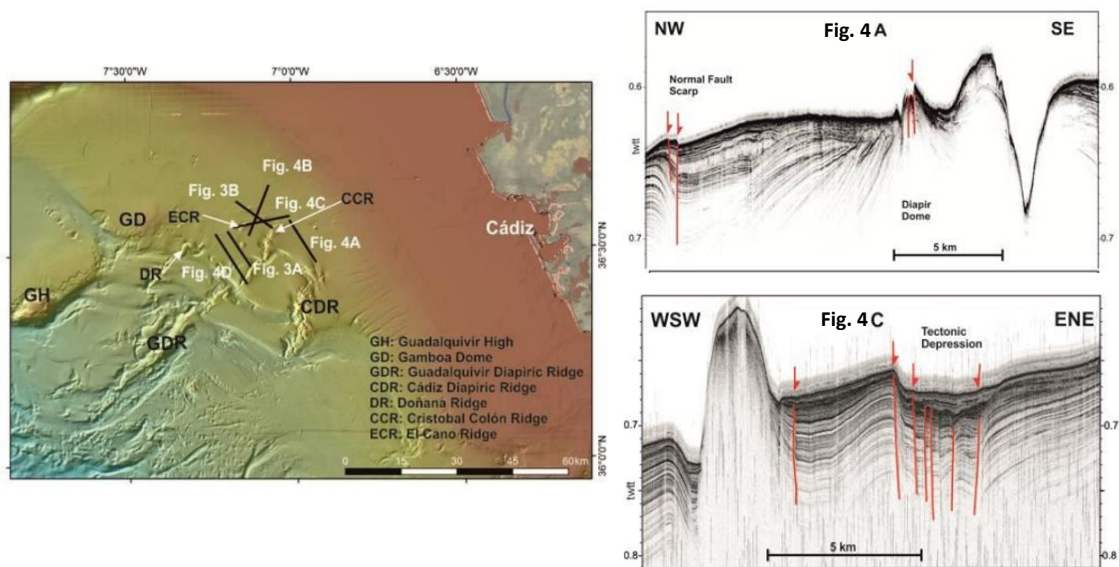


Figura 14. Situación de diapiros y fallas adyacentes a las dorsales del Guadalquivir y Cádiz (Tomado de Vázquez et al., 2015)

Así mismo se observa que la sismicidad se concentra levemente en el borde occidental de los diapiros (Fig. 11), de forma más notable sobre la dorsal diapírica del Guadalquivir, lo cual puede ser debido al desplazamiento de la Unidad Alóctona en esta dirección y su deformación en su zona noroeste debido a la colisión que experimenta con el Banco del Guadalquivir; hipótesis también apoyada según Somoza et al. (2021), el cual afirma que en los perfiles sísmicos la UAGC se encuentra plegada directamente en el flanco sur del banco, demostrándose que la estructura elevada del Banco del Guadalquivir actuaría como barrera fisiográfica para la progresión de la Unidad Alóctona hacia el NO.

El resto de sismicidad producida sobre los diapiros a profundidades más altas se diría que procede de procesos tectónicos cuyo origen no está relacionado con la UAGC pero que, en cierta manera, influye sobre éste y su deformación.

### 5.3 Alta sismicidad, lineaciones y límite de placas

Como se observa en la figura 3, la mayoría de la sismicidad a lo largo del Golfo de Cádiz se concentra en la parte noroeste de la zona de estudio.

De manera general se contempla un patrón con orientación NE-SO, en las cercanías del Banco del Guadalquivir (GU), habiendo sido ya descrito previamente como un área

de actividad sísmica densa (por ejemplo Buform et al., 2004; Custódio et al., 2015). Esta actividad estaría generada por el desplazamiento de la Unidad Alóctona hacia el oeste y la colisión que esto produce con el Banco del Guadalquivir.

Según el modelo de Vázquez y Vegas (2000), las lineaciones se relacionarían con una serie de fallas inversas que marcarían la acción y situación del límite de las placas entre Eurasia y África (Fig. 15), explicando esto además la distribución de registros sísmicos de magnitudes y profundidades altas.

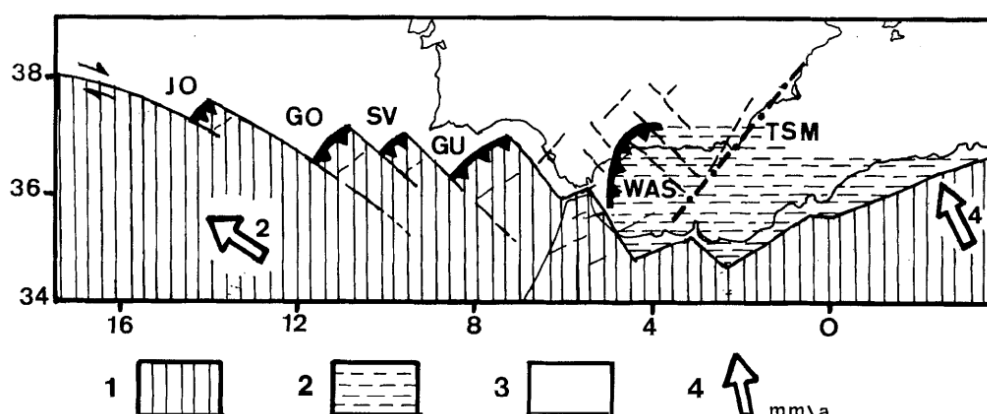


Figura 15. Modelo de límite de placas difuso entre África y Eurasia teniendo en cuenta la distribución de la sismicidad (Tomado de Vázquez y Vegas, 2000). GO: Bancos de Gorringe; GU: Banco del Guadalquivir; JO: Banco de Josephine; SV: prolongación del cabo de San Vicente; WAS: Zona de Subducción de Alborán Occidental; TSM: Traza de la subducción oligocena-miocena. 1: Litosfera africana; 2: Subplaca de Alborán; 3: Litosfera euroasiática; 4: Las flechas señalan la dirección de la convergencia entre Eurasia y África.

Por otro lado, de los eventos registrados en los núcleos se observa lo siguiente. El núcleo 1 se da a profundidades someras por lo que debe corresponder a la sismicidad producida por la deformación de la falla SWIM 2, siendo la situada más al norte de las tres que conforman el sistema de fallas SWIM. También el núcleo 2 se da a profundidades someras, coincidiendo con la localización de algunos volcanes de fango, pero ciertos puntos han sido registrados a profundidades mucho mayores de entre 72 y 150 km.

Tanto la lineación de eventos sísmicos localizados más cerca del margen SO de la Península Ibérica, con orientación NE-SO, como los dos núcleos con alta actividad descritos en las cercanías del margen africano, podrían estar originados debido al

movimiento entre el límite de placas de África y Eurasia, lo cual indicaría aproximadamente su situación, apoyando de esta manera lo descrito por Zitellini et al. (2009) que propusieron que el sistema de fallas SWIM es el precursor de un límite de placas transcurrente que conectaría la falla Gloria con la zona de falla Rif-Tell.

## **6. CONCLUSIONES**

A continuación se exponen las principales conclusiones del presente trabajo:

La zona de estudio es una zona tectónicamente muy activa en la cual existe una concentración de actividad sísmica destacable con orientación NE-SO en la región noroeste del Golfo de Cádiz, que posiblemente sea debida a la colisión entre la UAGC y el Banco del Guadalquivir, estando a su vez ligada a estructuras que definen el límite de placas entre África y Eurasia.

La actividad sísmica registrada presenta un rango variable de valores tanto en profundidades como a magnitudes respecta, predominando los valores entre 1,5-2,5 de magnitud y entre 10-40 km de profundidad, llegando a registrarse datos de hasta 5,4 y 180 km respectivamente.

El movimiento de la UAGC, relacionado principalmente con esfuerzos compresivos, abarca como máximo los 10 primeros kilómetros de profundidad, y sería el responsable de gran parte de la sismicidad somera que deforma las estructuras diapíricas. A a su vez, la deformación de estas estructuras genera fallas en las inmediaciones de las mismas y facilitaría los procesos de migración de fluidos, que dan lugar en superficie a estructuras de volcanes de fango.

Con este trabajo se ha realizado una aportación al conocimiento de las distintas estructuras tectónicas de la zona estudiada y su dinámica, así como al estudio de su peligrosidad y posible riesgo sísmico asociado.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Bufo, E., Bezzeghoud, M., Udías, A., Pro, C. (2004). Seismic sources on the Iberian-African plate boundary and their tectonic implications. *Pure Appl. Geophys.* 161:623–646.
- Custódio, S., Dias, N.A., Carrilho, F., Góngora, E., Rio, I., Marreiros, C., Morais, I., Alves, P., Matias, L. (2015). Earthquakes in western Iberia: improving the understanding of lithospheric deformation in a slowly deforming region. *Geophys. J. Int.* 203 (1):127–145.
- Dewey, J.F., Helman, M.L., Turco, E., Hutton, D.H.W., Knott, S.D. (1989). Kinematics of the Western Mediterranean. In: Coward, M.P., Dietrich, D., Park, R.G. (Eds.), *Alpine Tectonics. Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 45, 265 – 283.
- Fernández-Puga, M.C. (2004). Diapirismo y Estructuras de expulsión de gases hidrocarburos en el talud continental del Golfo de Cádiz. Tesis doctoral. Univ. Cádiz, 333pp.
- Fernández-Puga, M.C., Vázquez, J.T., Somoza, L., Díaz del Río, V., Medialdea, T., Mata, P. & León, R. (2007). Gas related morphologies and diapirism in the Gulf of Cádiz. *Geo-Marine Letters*, 27, 213-22.
- Flinch, J.F., Vail, P.R. (1998). Plio – Pleistocene sequence stratigraphy and tectonics of the Gibraltar Arc. In: de Graciansky, P.C., Hardenbol, J., Thierry, J., Vail, P.R. (Eds.), *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins. SEPM Spec. Publ.*, 60, 199 – 208.
- Gràcia, E., Dañobeitia, J., Vergés, J., Bartolomé, R. (2003). Crustal architecture and tectonic evolution of the Gulf of Cadiz (SW Iberian margin) at the convergence of the Eurasian and African plates. *Tectonics*, 22 (4), 1033 (doi: 10.1029/2001TC901045).
- Hanks, T. C. y H. Kanamori (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research* 84, 23480-23500.
- Hayes, D.E., Pimm, A.C., Benson, W.E., Berger, W.H., Rad, U.V. (1972). Site 135. Initial reports of the Deep Sea Drilling Project, U.S. Government Printing Office, Washington, 14, 15 – 48.
- Hernández-Molina, F.J., Sierro, F.J., Llave, E., Roque, C., Stow, D.A.V., Williams, T., Lofi, J., Van der Schee, M., Arnáiz, A., Ledesma, S., Rosales, C., Rodríguez-Tovar, F.J., Pardo-

- Igúzquiza, E., Brackenridge, R.E. (2016). Evolution of the gulf of Cadiz margin and southwest Portugal contourite depositional system: Tectonic, sedimentary and paleoceanographic implications from IODP expedition 339. *Marine Geology*, 377, 7-39.
- Jabaloy, A., Galindo-Zaldívar, J., González-Lodeiro, F. (1992). The Mecina extensional system: its relation with the Post-Aquitania piggy-back basins and the palaeostresses evolution (Betic Cordilleras, Spain). *Geo-Mar. Lett.*, 12, 96–103.
- Jiménez-López, D., Sierra, A., Ortega, T., Manzano-Medina, S., Fernández-Puga, M. C., López-González, N., Vázquez, J. T., & Forja, J. (2021). Biogeochemistry of surface sediments in mud volcanoes of the Gulf of Cádiz. *Geo-Marine Letters*, 41(3).
- Maldonado, A., Somoza, L., y Pallarés, L. (1999). The Betic orogen and the Iberian–African boundary in the Gulf of Cadiz: geological evolution (central North Atlantic). *Marine Geology*, 155, 9-43.
- Matias, H., Kress, P., Terrinha, P., Mohriak, W., Menezes, P.T.L, Matías, L., Santos, F., Sandnes, F. (2012). Salt tectonics in the western Gulf of Cádiz, southwest Iberia. *AAPG Bulletin*, October 2011, 95, 1667-1698.
- Medialdea, T., Vegas, R., Somoza, L., Vázquez, J.T., Maldonado, A., Díaz-del-Río, V., Maestro, A., Córdoba, D. & Fernández-Puga, M.C. (2004). Structure and evolution of the "Olistostrome" complex of the Gibraltar Arc in the Gulf of Cádiz (eastern Central Atlantic): evidence from two long seismic cross-sections. *Marine Geology*, 209 (1-4), 173-198.
- Medialdea, T., Somoza, L., Pinheiro, L.M., Fernández-Puga, M.C., Vázquez, J.T., León, R., Ivanov, M.K., Magalhaes, V., Díaz-del-Río, V., Vegas, R. (2009). Tectonics and mud volcano development in the Gulf of Cádiz. *Marine Geology*, 261, 48-63.
- Nuttli, O. (1973). Seismic wave attenuation and magnitude relations for eastern North America. *Journal of Geophysical Research*, 78 (5), 876-885.
- Perconig, E. (1960 – 1962). Sur la constitution géologique de l' Andalousie Occidentale, en particulier du bassin du Guadalquivir (Espagne meridionale). *Livre Mémoire du Professeur Paul Fallot. Mem. Hors-Ser. Soc. Geol. Fr.*, 1, 229 – 256.
- Rosenbaum, G., Lister, G.S. (2004). Formation of arcuate orogenic belts in the western Mediterranean region. In: Sussman, A.J., Weil, A.B. (Eds.), *Orogenic Curvature:*

Integrating Paleomagnetic and Structural Analyses: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper. 383:pp. 41–56.

Sartori, R., Torelli, L., Zitellini, N., Peis, D., Lodolo, E. (1994). Eastern segment of the Azores Gibraltar line (central-eastern Atlantic): an oceanic plate boundary with diffuse compressional deformation. *Geology* 22:555–558.

Somoza, L., Medialdea, T., Terrinha, P., Ramos, A., Vázquez, J., Perea, H., & Deverchere, J. (2021). Submarine Active Faults and Morpho-Tectonics Around the Iberian Margins : Seismic and Tsunamis Hazards. 9(June), 1–25.

Torelli, L., Sartori, R., Zitellini, N. (1997). The giant chaotic body in the Atlantic Ocean off Gibraltar: new results from a deep seismic reflection survey. *Mar. Pet. Geol.*, 14, 125 – 138.

Vázquez, J.T., Fernández-Puga, M. C., Palomino, D., Fernández-Salas, L. M., Sánchez-Guillamón, O., López-González, N., Díaz del Río, V., & Vegas, R. (2015). Shallow tectonics on the middle continental slope of the northeastern Gulf of Cadiz continental margin (SW Iberia) Canary Underwater Vulcanology (VULCANA) View project INDEMARES project View project. VIII Symposium on the Iberian Atlantic Margin, September, 149–152.

Vázquez, J.T. & Vegas, R. (2000). Acomodación de la convergencia entre África y la Península Ibérica, Golfo de Cádiz y Mar de Alborán, a partir del análisis de terremotos. *Geogaceta*, 27200009, (November 2014), 171–174.

Vázquez, J.T., Medialdea, T., Somoza, L., Vegas, R. & Fernández Puga, M.C. (2008). Revisión de las estructuras neotectónicas en la región del Golfo de Cádiz: Margen continental y Llanuras abisales adyacentes. *GeoTemas*, 10 (SO7028), 591-594.

Veith, K.F. y G.E. Clawson (1972). Magnitude from short period P-wave data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62 (2),435-452.

Zitellini, N., Gràcia, E., Matias, L., Terrinha, P., Abreu, M.A., DeAlteriis, G., Henriët, J.P., Dañobeitia, J.J., Masson, D.G., Mulder, T., Ramella, R., Somoza, L., Diez, S. (2009). The quest for the Africa-Eurasia plate boundary west of the Strait of Gibraltar. *Earth Planet. Sci. Lett.* 280:13–50.