

A. Echeverría¹, A. Margalef¹, T. Frontera Genovard², N. Gallego¹

¹ Andorra Recerca+Innovació. Av Rocafort, 21-23, Edifici Molí, 3r pis. AD600, Sant Julià de Lòria (Andorra). echeverria@ari.ad, amargalef@ari.ad, ngallego@ari.ad

² Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, Parc de Montjuïc, s/n, 08038, Barcelona. tanit.frontera@icgc.cat

Resumen: Durante el último año ha aumentado la actividad sísmica en la zona del Pirineo situada en la frontera entre el Alt Urgell (Cataluña) y Andorra. Des de octubre de 2021, se ha registrado un aumento de la actividad, siendo el 01 de febrero de 2022 cuando se produjo el sismo de mayor magnitud ($M_I=3.8$) hasta la fecha. La serie sísmica 2021-2022 presenta una profundidad superficial y se sitúa alrededor de la localidad de Os de Civís. La población de Andorra ha percibido algunos de estos terremotos; tres de ellos fueron notificados mediante el cuestionario sísmico andorrano por más de 100 personas. Este trabajo pretende destacar la existencia de esta serie sísmica, proponiendo la posible falla responsable de esta sismicidad. El tipo de mecanismo focal obtenido sostiene la posibilidad de una reactivación de un cabalgamiento orientado E-W como falla normal. Hace falta un estudio más detallado para determinar la posible fuente sismogénica y determinar si mantiene relación con la Falla Nord Maladeta, situada 40 km al oeste.

Palabras clave: Serie sísmica, Pirineos, sismicidad, Alt Urgell, Andorra.

Abstract: During the last year, seismic activity has increased in the Pyrenees area located on the border between Alt Urgell (Catalonia) and Andorra. Since October 2021 there has been an increase in activity, with the largest earthquake ($M_I=3.8$) to date occurring on 01 February 2022. The 2021-2022 seismic series has a shallow depth and is located around the town of Os de Civís. Some of these earthquakes have been felt by the population of Andorra; three of them were reported by more than 100 people through the Andorran seismic survey. This work aims to highlight the existence of this seismic series, proposing the possible fault responsible for this seismicity. The type of focal mechanism obtained supports the possibility of a reactivation of an E-W oriented thrust as a normal fault. A more detailed study is needed to determine the possible seismogenic source and to determine if it is related to the North Maladeta Fault, located 40 km to the west.

Key words: seismic series, Pyrenees, seismicity, Alt Urgell, Andorra.

Introducción

Desde mediados de febrero de 2021, se están registrando una serie de terremotos superficiales en la frontera entre Andorra y Cataluña, en el entorno de la localidad de Os de Civís (Alt Urgell, provincia de Lleida). Este estudio pretende mostrar los datos disponibles hasta la actualidad de la serie sísmica reciente del Alt Urgell-Andorra, en una zona hasta la fecha sin terremotos importantes, con el fin de, en un futuro inmediato, estudiar en detalle la posible fuente sismogénica y su contexto. En este trabajo, se ha usado el catálogo e información proporcionada por el ICGC dado que los datos locales son más detallados que los de las agencias estatales española o francesa.

La región de estudio se encuentra en la Zona Axial de los Pirineos. Esta cordillera se caracteriza por una sismicidad moderada, siendo en la parte oriental más difusa que en la parte occidental. No obstante, esto no excluye que no se hayan producido terremotos importantes como el de 1373 de la Ribagorça (Int. VIII-IX), 1923 en Vielha (Int. VIII) o en 1427-1428 en la provincia de Girona (Int. IX-X; ICC, 1999). En la zona epicentral de la serie que se estudia, en Os de Civís, no hay registro de terremotos históricos importantes.

Desde el día 01/01/2021 hasta la fecha de elaboración de este trabajo (finales de abril 2022) se han registrado, según el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), un total de 384 terremotos en la

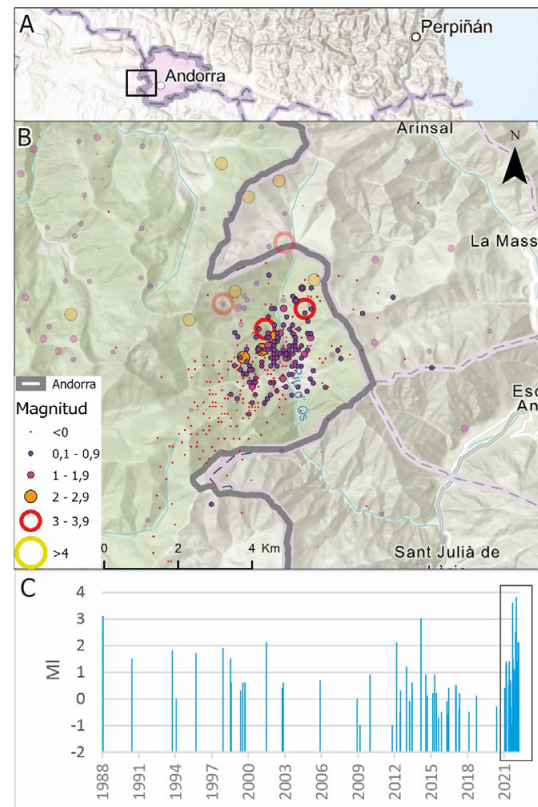


Fig. 1.- A: Situación general de la zona de estudio. B: Sismicidad instrumental de fondo en la zona des de 1984 (catálogo del ICGC (2022a)) y en colores más sólidos la serie 2021-2022. C: Evolución temporal de los terremotos incluidos en la imagen superior en función de su magnitud local (M_I). El recuadro incluye la serie sísmica 2021-2022, detallada en la Figura 2.

Fig. 1.- A: Situación general de la zona de estudio. B: Sismicidad instrumental de fondo en la zona des de 1984 (catálogo del ICGC (2022a)) y en colores más sólidos la serie 2021-2022. C: Evolución temporal de los terremotos incluidos en la imagen superior en función de su magnitud local (M_I). El recuadro incluye la serie sísmica 2021-2022, detallada en la Figura 2.

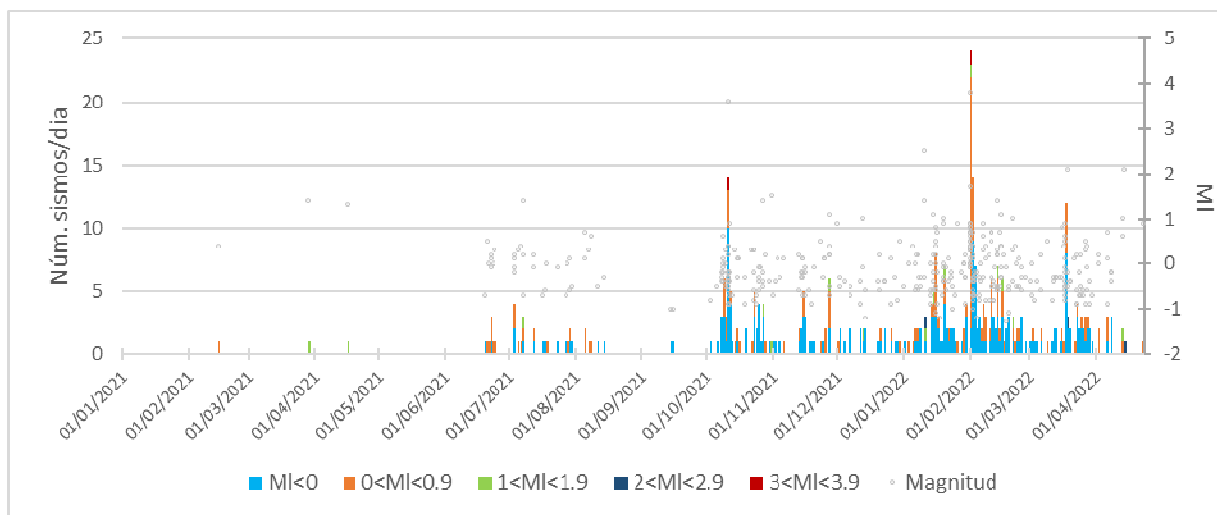


Fig. 2.- Número de sismos diarios de la serie sísmica en función de su magnitud local.
Fig. 2.- Number of events per day of the seismic series according to the local magnitude.

zona, siendo el de mayor magnitud el del 01/02/2022 con una Magnitud local (MI) de 3.8.

En la Figura 1B se han representado todos los terremotos ocurridos en la zona desde la implementación de la red, en 1984, siendo el más antiguo que se tiene registrado en febrero de 1988 (nótese que la red de estaciones fue mejorándose progresivamente). No obstante, tal y como se observa en la evolución temporal (Fig. 1C), la mayoría de los eventos se han producido a partir de 2021. Previamente a esta serie, destacan los terremotos del 19/02/1988 de MI=3.1 y del 06/04/2014 de MI=3.

Serie sísmica 2021-2022

Como se observa en la Figura 2, a mediados del mes de junio de 2021 se produce un breve período de actividad, pero es en octubre de 2021 cuando se registra un aumento notable de la sismicidad en la región, cuando se concentran la mayoría de los sismos de la serie (90%). Desde enero de 2021 se han producido 384 sismos, de los cuales 5 presentan una magnitud superior a 2. Destacan el terremoto del 11/10/2021 de MI=3.6 y el del 01/02/2022 de MI=3.8.

La serie corresponde a una sismicidad superficial, con una profundidad hasta el momento siempre inferior a los 15 km, siendo el valor medio de 4 km. La profundidad parece aumentar en relación directa con la longitud, es decir, hacia el este. No obstante, siendo la profundidad el parámetro menos preciso de las localizaciones (95% con un error de entre 0-10 km), habría que verificar que no se trate de un efecto de la distribución de la red sísmica o bien realizar una relocalización mediante métodos no lineales (Fig. 3).

En cuanto a la información macrosísmica, cada vez que un terremoto es sentido por la población andorrana se solicita que se rellene el cuestionario macrosísmico realizado por Andorra Recerca+ Innovació (AR+I). En la actualidad las intensidades en Andorra las obtiene el ICGC junto con AR+I, ya que los organismos estatales español y francés no las calculan. Dado el carácter transfronterizo de la serie sísmica, para obtener una visión global de las intensidades relacionadas a cada episodio hace falta obtener los datos de los organismos de los países limítrofes.

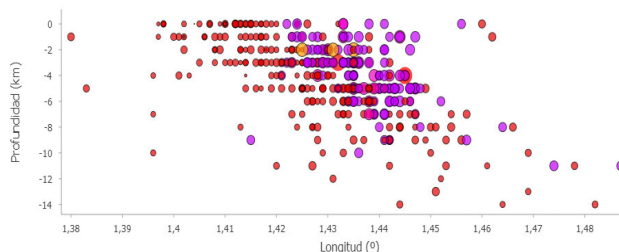


Fig. 3.- Distribución de la sismicidad en función de la profundidad y la longitud. La relación de colores se corresponde a la misma simbología que en la Figura 1.

Fig. 3.- Seismicity distribution as a function of depth and longitude. The colours correspond to the same as in Figure 1.

El terremoto de mayor magnitud (MI=3.8) fue percibido en Andorra, según el número de respuestas del cuestionario, por 817 personas (Tabla1, Fig. 2). Ocurrió de madrugada, a las 03:03h (hora local) mientras la mayoría de gente dormía. Por primera vez, desde que se realizan estas encuestas, más de 100 personas (14% de los que respondieron) afirmaron sentir pánico. Según las valoraciones preliminares del ICGC se estima que pudo alcanzar en Andorra una intensidad de IV en la escala EMS-98. Según el estudio de seguimiento (ICGC, 2022b) el terremoto se percibió hasta 150 km del epicentro en la parte catalana. En Francia, a partir de 32 respuestas del cuestionario francés, se obtienen intensidades preliminares de IV en algunas poblaciones francesas y se percibió hasta al menos 80 km del epicentro (BCSF-RéNaSS, 2022). El IGN (2022) obtiene una intensidad preliminar de III-IV para los municipios españoles cercanos a la frontera.

El segundo terremoto de mayor magnitud (MI=3.6) ocurrió el 11/10/2021 a las 10:23h, en horario laboral; el cuestionario obtuvo 339 respuestas de personas que percibieron el sismo en Andorra (intensidad aún no disponible). En el lado francés, a partir de 66 respuestas, se obtienen intensidades preliminares de hasta IV en algún municipio y fue percibido hasta 70 km del epicentro. En el lado español, el IGN obtiene una intensidad preliminar de III para municipios cercanos a la Seu d'Urgell, a 8 km al sur de Andorra.

Fecha	Prof. (ICGC)	MI (ICGC)	mbLg (IGN)	EMS -98 (IGN)	Nº encuestas AND (sentido)
29/03/2021	5 km	1.4	2.1		39
11/10/2021	3 km	3.6	3.6* Mw	III	339
27/10/2021	4 km	1.4	2.1		4
11/01/2022	2 km	2.5	2.9	II	95
01/02/2022	4 km	3.8	4	III-IV	817
19/03/2022	2 km	2.1	2.5		7
14/04/2022	2 km	2.1	2.6	S	11

Tabla 1.- Relación de los terremotos de la serie sísmica percibidos en Andorra por más de tres personas a partir del cuestionario sísmico. Los datos provenientes del IGN y ICGC pueden variar en función de la revisión pertinente.

Table 1.- List of the earthquakes in the seismic series perceived in Andorra by more than three people based on the survey. Data from IGN and ICGC may vary depending on the revision.

Discusión y conclusiones

La sismicidad en los Pirineos presenta una concentración de terremotos en *clusters* muy activos (e.g. Sylvander *et al.*, 2021), tal y como se muestra en la Figura 4. Algunos pueden relacionarse con la presencia de fallas, como los asociados a la Falla Nord Maladeta (e.g. Ortuño *et al.*, 2008), al oeste de la zona de estudio. La base de datos de fallas activas QAFI v.4 (IGME, 2015), de carácter bibliográfico, no tiene registrada ninguna falla estudiada en la zona de

la serie sísmica. Por lo que se refiere a cartografía geológica, Margalef (2015) sitúa, justo en el lado andorrano, unos cabalgamientos orientados E-W, como la mayoría de estructuras regionales del Pirineo, que coinciden con la zona epicentral. En detalle, en la cartografía del lado catalán también se reconoce la presencia de algún cabalgamiento discontinuo (ICGC,2016) que no llega hasta la zona de Os de Civís (pero de las observaciones de campo se deduce su continuación) y que correspondería a la misma estructura del lado andorrano. Algunos autores constatan la reactivación neotectónica de cabalgamientos alpinos con buzamientos favorables (i.e. sub-verticales) como fallas normales, como el de Gavarnie, reactivado como la falla Nord Maladeta (Ortuño *et al.*, 2008; 2013) o el de Lakora-Eaux-Chaudes, reactivado como el sistema de fallas Bedous-Pic du Midi du Bigorre, (e.g. Lacan y Ortuño, 2012 y Dumont *et al.*, 2015). Los mecanismos focales (Fig. 4) obtenidos para los dos terremotos más grandes de la serie sísmica de Os de Civís son del tipo normal (ICGC, 2022b), compatibles con la tendencia general de mecanismos normales en la cordillera (e.g. Stich *et al.*, 2020) y la orientación de los planos nodales compatibles con la orientación del cabalgamiento.

La manifestación de la serie sísmica del Alt Urgell-Andorra 2021-2022 hace plantearnos algunas cuestiones, como: ¿Se trata de una reactivación como falla normal de un antiguo cabalgamiento? ¿Podría asociarse la actividad de esta serie sísmica a una continuación hacia el este del sistema de fallas normales Maladeta-Bedous, tal y como sugiere Ortuño (2022)? Harán falta estudios de detalle pluridisciplinares para poder abordar estas cuestiones.

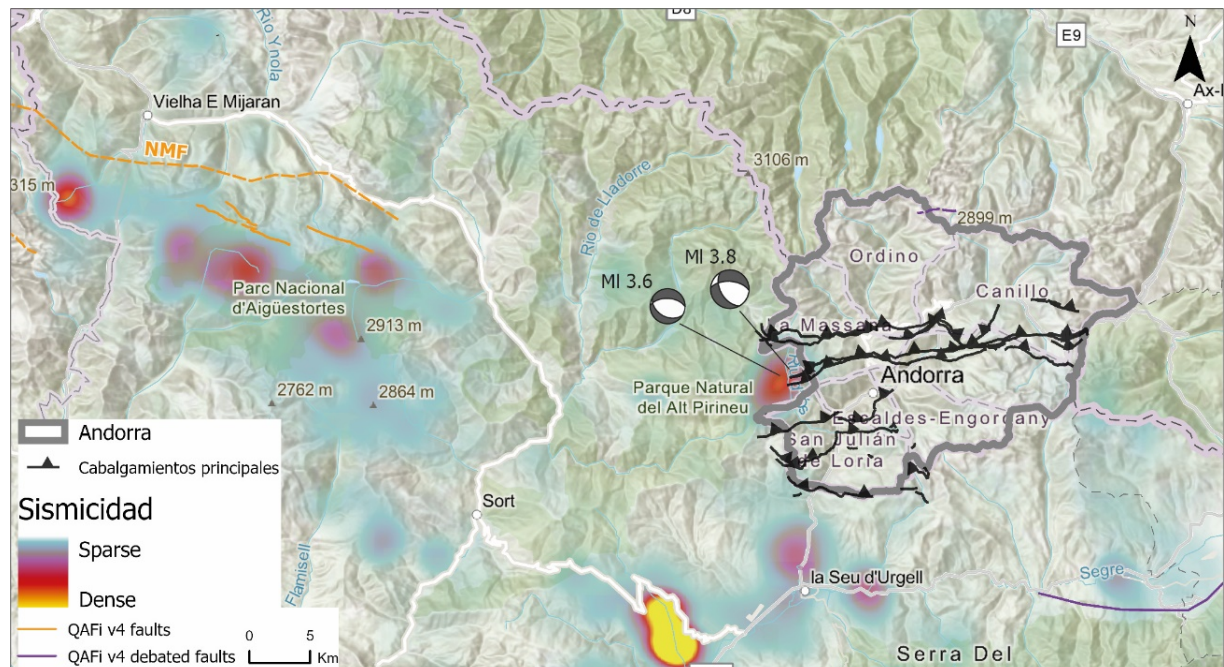


Fig. 4.- Mapa de calor de la sismicidad desde 1984 hasta abril 2022 y con un radio de 12 km. Mecanismos focales de los dos sismos de mayor magnitud según el ICGC (2022b). Fallas del sur de Andorra tomadas de Margalef (2015) en negro, y fallas de la base de datos QAFI v.4 en naranja (en morado las que están a debate). NMF: Falla Nord Maladeta.

Fig. 4.- Seismicity heatmap from 1984 to April 2022 and with 12 km radius. Focal mechanism of the two largest earthquakes from ICGC (2022b). Southern Andorra faults in black (Margalef, 2015) and QAFI v.4 faults database in orange (in purple the debated faults). NMF: North Maladeta Fault.

Referencias

- BCSF-RéNaSS, 2022. La Bureau Central Sismologique Français. <https://www.franceseisme.fr/nseisme.php?IdSei=1117> (Último acceso el 25/04/2022)
- Dumont, T., Replumaz, A., Rouméjon, S., Briais, A., Rigo, A., & Bouillin, J. P., 2015. Microseismicity of the Béarn range: Reactivation of inversion and collision structures at the northern edge of the Iberian plate. *Tectonics*, 34(5), 934–950.
- ICC, 1999. *Atlas sísmic de Catalunya. Vol 1: Catàleg de sísmicitat*. Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona, 413 p.
- ICGC, 2016. Mapa geològic comarcal 1:50.000. MG50m v2, formato shp. ICGC, Barcelona.
- ICGC, 2022a. Terratremols enregistrats. <https://www.icgc.cat/ca/Ciutada/Explora-Catalunya/Terratremols/Terratremols-enregistrats> (Último acceso el 25/04/2022).
- ICGC, 2022b. Serie sísmica de l'Alt Urgell, febrer 2022. <https://www.icgc.cat/ca/Administracio-i-empresa/Serveis/Terratremols-enregistrats-i-informacio-sismica/Terratremols-enregistrats/Estudis-de-seguiment/Serie-sismica-de-l-Alt-Urgell-febrer-2022> (Último acceso el 25/04/2022)
- IGME, 2015. QAFI v.4: Quaternary Faults Database of Iberia (WMS). <http://info.igme.es/QAFI> (Último acceso el 04/05/2022)
- IGN, 2022. Catálogo de terremotos. <https://www.ign.es/web/ign/portal/sis-catalogo-terremotos> (Último acceso el 26/04/2022)
- Lacan, P., & Ortuño, M., 2012. Revisión de la tectónica activa de los pirineos. *Journal of Iberian Geology*, 38 (1), 11–33.
- Ortuño, M., Queralt, P., Martí, A., Ledo, J., Masana, E., Perea, H., & Santanach, P., 2008. The North Maladeta Fault (Spanish Central Pyrenees) as the Vielha 1923 earthquake seismic source: Recent activity revealed by geomorphological and geophysical research. *Tectonophysics*, 453(1–4), 246–262.
- Ortuño, M., Martí, A., Martín-Closas, C., Jiménez-Moreno, G., Martinetto, E., & Santanach, P., 2013. Palaeoenvironments of the Late Miocene Prúedo Basin: implications for the uplift of the Central Pyrenees. *Journal of the Geological Society*, 170(1), 79–92.
- Ortuño, 2022. Respuesta al tweet de Bertrand Delouis donde se discuten los mecanismos focales y posible fuente sismogénica del sismo de Os de Civís, Andorra (11/10/2021). <https://twitter.com/MaraOrtuo14/status/1447543514678632449>
- Margalef, A., 2015. Estudi estructural i estratigràfic del sud d'Andorra. Tesis doctoral, Universitat de Barcelona, 224 p.
- Stich, D., Martínez-Solares, J. M., Custódio, S., Batlló, J., Martín, R., Teves-Costa, P., & Morales, J., 2020. Seismicity of the Iberian Peninsula. En: *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach*. Regional Geology Reviews. (C. Quesada y J. Oliveira Eds). Springer, Cham, 11–32.
- Sylvander, M., Rigo, A., Sénéchal, G., Battaglia, J., Benahmed, S., Calvet, M., Chevrot, S., Douchain, J. M., Grimaud, F., Letort, J., & Pauchet, H., 2021. Seismicity patterns in southwestern France. *Comptes Rendus - Geoscience*, 353(S1), 1–26.