





Por una cultura común del riesgo sísmico Pour une culture commune du risque sismique

Guía para la identificación de patrones de series sísmicas



Informe 5.1.2 - Acción 5





















Editor: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya

31/12/2021

Autores:

Tànit Frontera Genovard¹ Josep Batlló Ortiz¹ Anne Lemoine² Janira Irizarry Padilla¹ Jose Antonio Jara Salvador¹ Sara Figueras Vila¹

Palabras clave: Serie sísmica, secuencia sísmica, enjambre sísmico, sismo principal, réplica, precursor

- 1. ICGC: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya
- 2. BRGM: Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- 3. UPC: Universitat Politècnica de Catalunya
- 4. DIGC: Secretaria General. Departament d'Interior. Generalitat de Catalunya
- 5. IEA: Institut d'Estudis Andorrans
- 6. ENIT: Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
- 7. CNRS: Centre National de la Recherche Scientifique Délégation Alsace
- 8. EPLFM: Entente pour la Forêt Méditerranéenne
- 9. DW: Deveryware
- 10. ACE: Associació de Consultors d'Estructures

© 31/12/2021 proyecto POCRISC



Síntesis

Los terremotos ampliamente percibidos por la población no suelen presentarse aislados, sino que ocurren integrados en lo que llamamos series sísmicas, terremotos precursores y réplicas del evento principal, que en muchos casos también son percibidos. Este documento trata de exponer de una forma simple el fenómeno de las series sísmicas, sus estructuras posibles, los elementos que utilizamos para caracterizarlas y varios ejemplos de series recientes. Para ello se han desarrollado aplicaciones simples que permiten una comprensión fácil a partir de gráficos y mapas.

El documento, pensado para ayudar a los responsables técnicos y autoridades en la identificación, caracterización y gestión de este fenómeno, se organiza en una introducción en donde se exponen las posibles estructuras de las series sísmicas. A continuación, se presentan las herramientas básicas para su estudio, tanto en el plano temporal como en el espacial. Las principales herramientas en el plano temporal son las llamadas leyes de Omori y de Gutenberg-Richter. En el plano espaciotemporal es importante la información obtenida a partir de los mecanismos focales, así como los análisis gráficos de la evolución de la serie. A modo de ejemplo de casos reales ocurridos en la zona POCRISC, se analizan algunas series ocurridas recientemente en la zona oriental del Pirineo y para las que se dispone de información abundante. Son las ocurridas en la comarca de la Selva en 2017 y en la comarca del Alt Urgell en 2017 y 2019. El documento se completa con unas breves conclusiones sobre las series analizadas y las estructuras esperables y una bibliografía que permita al lector una mayor profundización en el tema y los datos utilizados.



| Sı | umario | o 1Introc | ducción |
|-----|---------|--|---------|
| | 6 | | |
| 2 | Met | todología | 7 |
| | 2.1 | Precursores y réplicas. Patrones de crisis sísmicas, modelos clásicos | 7 |
| | 2.2 | Evolución temporal | 9 |
| | 2.3 | Evolución epaciotemporal | 10 |
| | 2.4 | Ley de Gutenberg-Richter | 10 |
| | 2.5 | Mecanismo focal | 10 |
| 3 | Aná | álisis de series | 12 |
| | 3.1 | Identificación de series sísmicas en la zona POCRISC del Pirineo oriental | 12 |
| | 3.2 | Análisis de series seleccionadas | 16 |
| | 3.2. | .1 Selva 2017 | 18 |
| | 3.2. | .2 Alt Urgell 2017 | 23 |
| | 3.2. | .3 Alt Urgell 2019 | 28 |
| 4 | Cor | nclusiones y recomendaciones | 33 |
| 5 | Bibl | liografía | 34 |
| Fiç | gura 1. | . Ejemplo de serie sísmica del tipo sismo principal con precursores y réplicas (PMR). S | Se |
| | - | trata del sismo de 1945 en la bahía de Mikawa (Utsu, 2002) | 8 |
| Fi | gura 2. | . Ejemplo de serie sísmica del tipo sismo principal con réplicas (MR). Se trata del sismo de 1993 ocurrido en el sur oeste de Hokkaido (Utsu, 2002) | |
| Fi | gura 3. | . Ejemplo de serie sísmica del tipo enjambre (E). Se trata del sismo de 1997 en la península de Izu (Utsu, 2002) | 9 |
| | - | . Mapa de la zona POCRISC1 | |
| | | . Mapa del área más oriental de la zona POCRISC1 | 3 |
| | - | . Mapa de la zona POCRISC (en azul), con las zonas del Alt Urgell y la Selva (encuadradas en rojo)1 | 6 |
| Fi | gura 7. | . Distribución espacial de los epicentros de la serie ocurrida en la zona de la Selva durante el año 2017. El color y tamaño de los círculos indica su magnitud 1 | 8 |
| Fi | gura 8. | . Número de terremotos, clasificados por rango de magnitud, ocurridos en la zona de la Selva durante todo el año 20171 | |
| Fiç | gura 9. | . Número de terremotos, clasificados por rango de magnitud, ocurridos en la zona de la Selva entre los días 28 de marzo y 1 de octubre de 2017 1 | |
| Fi | gura 10 | Evolución de la longitud (arriba), latitud (en medio) y profundidad (abajo) de los hipocentros de los terremotos ocurridos en la zona de la Selva durante el año 2017 | 20 |
| Fi | gura 11 | Distribución espaciotemporal de los hipocentros de los terremotos ocurridos en la zona de la Selva a partir del día 28/03/2017, junto con el mecanismo focal del terremoto principal de la serie, de magnitud MI 3.8, ocurrido el día 15/04/2017 (Frontera et al., 2021) | v1 |



| Figura 12. Re | elación de Gutenberg-Richter para la serie sísmica de la Selva de 2017 (Frontera et al., 2021)2 |
|---------------|---|
| Figura 13. Di | stribución espacial de los epicentros de la serie ocurrida en la zona del Alt Urgell durante el año 2017. El color y tamaño de los círculos indica su magnitud 23 |
| Figura 14. No | úmero de terremotos, clasificados por rango de magnitud, ocurridos en la zona del Alt Urgell durante todo el año 201724 |
| Figura 15. No | úmero de terremotos, clasificados por rango de magnitud, ocurridos en la zona del Alt Urgell entre el 17/02/2017 y el 1/04/201724 |
| Figura 16. Ev | volución de la longitud (arriba), latitud (en medio) y profundidad (abajo) de los hipocentros de los terremotos ocurridos en la zona del Alt Urgell durante el año 2017 |
| Figura 17. Di | stribución espaciotemporal de los hipocentros de los terremotos ocurridos en la zona del Alt Urgell a partir del día 17/02/2017 (Frontera et al., 2021) |
| Figura 18. Re | elación de Gutenberg-Richter para la serie sísmica del Alt Urgell de 2017 (Frontera et al., 2021)27 |
| Figura 19. Di | stribución espacial de los epicentros de la serie ocurrida en la zona del Alt Urgell durante el año 2017. El color y tamaño de los círculos indica su magnitud 28 |
| Figura 20. No | úmero de terremotos, clasificados por rango de magnitud, ocurridos en la zona del Alt Urgell durante todo el año 2019 |
| Figura 21. No | úmero de terremotos, clasificados por rango de magnitud, ocurridos en la zona del Alt Urgell entre el 2/04/2019 y el 1/05/201929 |
| Figura 22. Ev | volución de la longitud (arriba), latitud (en medio) y profundidad (abajo) de los hipocentros de los terremotos ocurridos en la zona del Alt Urgell durante el año 2019 |
| Figura 23. Di | stribución espaciotemporal de los hipocentros de los terremotos ocurridos en la zona del Alt Urgell a partir del día 3/04/2019, junto con el mecanismo focal del terremoto principal de la serie, de magnitud MI 4.0, ocurrido el día 3/04/2019 (Frontera et al., 2021) |
| Figura 24. Re | elación de Gutenberg-Richter para la serie sísmica del Alt Urgell de 2017 (Frontera et al., 2021) |



1 INTRODUCCIÓN

La presente "Guía para la identificación de patrones de series sísmicas" se ha elaborado en el marco del proyecto POCRISC (POr una Cultura común del Rlesgo Sísmico), como entregable de la acción 5. En esta acción se prevé dotar de herramientas prácticas a los servicios de protección civil y a la comunidad sismológica para intervenir en caso de sismo.

Después de la ocurrencia de un terremoto fuerte (sismo principal), en la misma zona ocurren otros sismos de magnitud menor debidos a reajustes de la falla responsable del terremoto más grande, llamados réplicas. Otras veces, antes de un sismo grande, ocurren terremotos asociados al mismo sistema tectónico llamados precursores. Al conjunto de todos estos terremotos, precursores, principal y réplicas, se le llama serie o secuencia sísmica. El estudio de la serie en su conjunto es importante, en primer término, para informar a las autoridades y a la ciudadanía sobre la evolución de la sismicidad en caso de que ocurra un sismo percibido por la población. Más adelante, este estudio contribuye a la descripción y comprensión de las características sismotectónicas de la zona.

Si bien el conocimiento previo de una zona sísmica no permite predecir cómo se comportará la sismicidad en el futuro, sí que posibilita identificar anomalías potencialmente significativas en el desarrollo de la secuencia.

El presente trabajo tiene como objetivo la identificación de ciertos patrones o tendencias características de las diferentes series ocurridas en el Pirineo. En este sentido, la sección 2 está dedicada a la exposición teórica de los diferentes aspectos tenidos en cuenta para la identificación de las tendencias mencionada más arriba. El análisis exhaustivo de todas las secuencias conocidas queda fuera del alcance de este estudio, de manera que, a modo de ejemplo, en la sección 3 se han seleccionado tres series ocurridas en los últimos años en el Pirineo catalán (Selva 2017, Alt Urgell 2017 y 2019) y se detallan los resultados del análisis.

Finalmente, en la sección 4 se sintetizan las conclusiones extraídas del trabajo y se realizan una serie de recomendaciones de cara al futuro.



2 METODOLOGÍA

Los terremotos no ocurren, por lo general, de manera aislada. La mayor parte de las veces se producen en grupos ligados causalmente, aunque nuestro conocimiento de las relaciones que los ligan es escaso. Denominaremos a estos grupos como series sísmicas. Es común que alrededor de la localización de un evento mayor podamos identificar, en algunos casos, terremotos más pequeños que lo preceden y que llamamos precursores y, mucho más común y en la mayoría de los casos, otros menores que le siguen y que conocemos como réplicas. A posteriori, diremos que el evento mayor es el principal y los demás están ligados a este.

En otros casos no tan frecuentes, los terremotos se agrupan en el tiempo y espacio, pero sin que exista un evento característico singular por su energía. En estos casos nos referimos a la ocurrencia de enjambres sísmicos.

Aunque el conocimiento de los procesos físicos involucrados en estas estructuras sea muy deficiente, sí que podemos establecer algunas relaciones empíricas que nos permiten identificar los eventos dentro de una serie y, aunque no sea posible una predicción formal, tener unas nociones de las pautas que puede seguir una serie en su evolución. Estos conocimientos serán útiles para posteriores tareas de prevención y mitigación de sus efectos.

Como se verá más adelante, para el presente trabajo se han seleccionado, a modo de ejemplo, tres series sísmicas ocurridas en la zona POCRISC. Para cada una de estas series se ha utilizado el catálogo elaborado por el ICGC. El análisis se ha realizado mediante las rutinas preparadas específicamente para el proyecto POCRISC, con el fin de estudiar cada uno de los aspectos que se detallan en los próximos apartados: tipo de serie, evolución temporal, evolución espaciotemporal, ley de Gutenberg-Richter y mecanismo focal.

Presentaremos a continuación algunas nociones básicas sobre las series sísmicas y su caracterización para centrarnos, a continuación, en el análisis de algunas series acaecidas en los Pirineos.

2.1 Precursores y réplicas. Patrones de crisis sísmicas, modelos clásicos.

Como ya hemos apuntado, los terremotos no ocurren aleatoriamente en el espacio. Mayoritariamente se concentran en zonas donde la estructura cortical, distribución de esfuerzos sobre la corteza, etc., es favorable para su ocurrencia, como es el caso de los Pirineos. En caso de terremotos de mediana magnitud (pongamos por caso terremotos percibidos ampliamente en la zona epicentral), sabemos por experiencia que este puede ser precedido, en la misma zona, por terremotos más pequeños (percibidos por la población o no) y, con casi absoluta seguridad, será seguido inmediatamente de otros terremotos más pequeños que, además, disminuirán en tamaño y cantidad con el tiempo. Como ya hemos mencionado, a los precedentes del evento mayor los llamamos precursores y a los posteriores, réplicas.



A partir de estas definiciones podemos identificar diferentes estructuras en las series de sismos. Si un terremoto principal (M), tiene precursores (P) y réplicas (R), diremos que la serie presenta una estructura del tipo PMR. Si representamos el número de eventos diarios obtendremos una gráfica parecida al ejemplo que mostramos en la Figura 1.

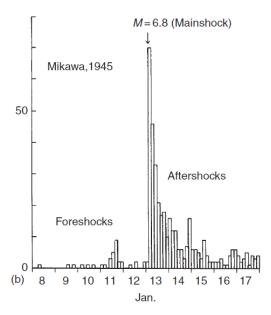


Figura 1. Ejemplo de serie sísmica del tipo sismo principal con precursores y réplicas (PMR). Se trata del sismo de 1945 en la bahía de Mikawa (Utsu, 2002).

Si el evento principal se presenta de forma brusca, sin aviso previo, y luego se suceden las réplicas, diremos que la estructura de la serie es del tipo MR (es la más común en los Pirineos). En este caso la gráfica obtenida será parecida al ejemplo que mostramos en la Figura 2. En cambio, el fenómeno contrario no ocurre. Es decir, no tenemos ejemplos de series premonitorias que acaben con un sismo principal sin réplicas posteriores.

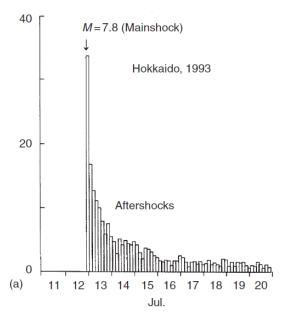


Figura 2. Ejemplo de serie sísmica del tipo sismo principal con réplicas (MR). Se trata del sismo de 1993 ocurrido en el sur oeste de Hokkaido (Utsu, 2002).



Un último caso se produce cuando observamos un crecimiento y posterior decrecimiento en el tiempo de la actividad sísmica en un foco, pero no es posible definir un terremoto principal entre todos los ocurridos (Figura 3). En este caso nos referimos a enjambres sísmicos, que identificaremos con la sigla E. Es un caso relativamente común en los Pirineos. En resumen, observamos tres estructuras diferentes en las series sísmicas, PMR, MR y E.

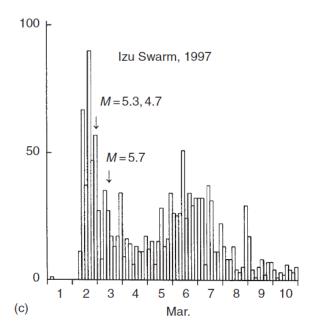


Figura 3. Ejemplo de serie sísmica del tipo enjambre (E). Se trata del sismo de 1997 en la península de Izu (Utsu, 2002).

2.2 Evolución temporal

Los tres tipos de series definidos se caracterizan por su evolución temporal. De forma empírica sabemos que cuando ocurre un terremoto que llamaremos principal le sucederán réplicas. Su distribución en el tiempo sigue un patrón estadístico conocido como ley de Omori-Utsu.

Esta ley totalmente empírica, definida primeramente por Omori (1894) a partir del análisis estadístico, afirma que después de un terremoto principal el número de réplicas disminuye en el tiempo siguiendo un patrón de la forma

$$n(t) = K/(c + t)$$

donde n(t) es el número de sismos n ocurridos en un cierto tiempo t posterior al terremoto principal y K y c parámetros a ajustar.

Esta versión fue modificada por Utsu (1961), que propuso

$$n(t) = K/(c + t)^p$$

donde *p* es otro parámetro que ajustar, y que normalmente oscila entre 0.7 y 1.5. En cualquier caso, ambas relaciones implican que el número de replicas disminuye en el tiempo.

Como se verá más adelante, las series tomadas como ejemplo para este trabajo tienen una magnitud máxima moderada y los sismos de cada secuencia no son muy numerosos. En estos casos, los ajustes de la ley de Omori-Utsu suelen ser de poca calidad, motivo por el cual no



se han incluido en este documento. En su lugar, se representa la cantidad de terremotos ocurridos cada día en forma de histograma, de forma que se puede observar cualitativamente la tendencia.

La ley de Omori-Utsu caracteriza el número de réplicas, no su magnitud. Pero también se ha observado que la magnitud de las réplicas se distribuye de forma estadística según la relación definida por Gutenberg y Richter, explicada en el apartado 2.4

2.3 Evolución epaciotemporal

Las series sísmicas pueden presentar también una evolución espaciotemporal. Entendemos esta como una migración de la localización de los hipocentros en el espacio con el paso del tiempo. La rotura de una falla por la acumulación de esfuerzos, que causa un terremoto, será también la causa de reajustes en otras zonas de la falla colindantes con la zona de ruptura. Estos reajustes se pueden presentar en muchos casos como una migración de los hipocentros, que puede contribuir a la definición del plano de la falla causante del terremoto.

2.4 Ley de Gutenberg-Richter

Como se ha apuntado anteriormente, existe una ley empírica que describe la distribución de magnitudes de los sismos que tienen lugar en una zona determinada.

La ley de Gutenberg-Richter (1949) es un modelo para describir la sismicidad de una fuente sísmica atendiendo a la distribución de magnitudes de los sismos que en ella tienen lugar. La distribución de tamaños de terremotos en un determinado intervalo de tiempo se denomina ley de recurrencia. El modelo de Gutenberg-Richter, relaciona frecuencia de terremotos y magnitud. Esta ley establece una proporción constante entre el número de sismos grandes y pequeños para una determinada zona, asumiendo que el número acumulativo de sismos que superan cada grado de magnitud varía linealmente con este parámetro. La expresión de esta ley es

$$log N = a - M \cdot b$$

donde M es la magnitud, N es el número de sismos que tienen igual o mayor magnitud que M y a, b son constantes, siendo b la pendiente de la recta que nos da la proporción de sismos grandes frente a pequeños.

2.5 Mecanismo focal

Para sismos de magnitud moderada (a partir de MI 3.5, aproximadamente) se puede obtener el mecanismo focal, que da información sobre la geometría de la falla responsable del terremoto, es decir, estima el acimut, el buzamiento y el deslizamiento de la falla. Además, también puede calcularse la magnitud momento (Mw), relacionada directamente con la energía liberada por el seísmo. Estos parámetros se obtienen a partir del cálculo del tensor momento.



El cálculo del tensor de momento sísmico se ha realizado con el método desarrollado y descrito por Delouis (2014). Se ha utilizado la aplicación web FMNEAR (FMNEAR webservice, Delouis, Gerakis, Deschamps, Geoazur/Observatoire de la Côte d'Azur).

Este método, que supone mecanismos de tipo doble par de fuerzas, consiste en realizar un barrido de diferentes mecanismos focales hasta encontrar el mecanismo que comporta un mínimo en el ajuste de la forma de onda respecto a las funciones de Green previamente calculadas.

Los parámetros obtenidos son el mecanismo focal (acimut, buzamiento y deslizamiento de los dos planos), la magnitud de momento sísmico y la profundidad calculada a partir del mejor ajuste.

Para valorar la calidad del resultado se proporciona un indicador llamado índice de confianza, que aglutina los siguientes parámetros: número de componentes utilizados con éxito en el cálculo, estabilidad del resultado y error cuadrático medio (root mean square, rms). Puede considerarse que un resultado es aceptable si su índice de confianza es igual o mayor de 70%. Además, se asigna una calidad del cálculo, de la A a la F, siendo A un mecanismo focal muy bien determinado y F, sin determinar.

Si bien el mecanismo focal da información sobre el régimen de esfuerzos en la región (de tipo extensivo para fallas normales; de tipo compresivo para fallas inversas; de cizalla; o una combinación del primero o el segundo con el tercero), este cálculo deja una ambigüedad con respecto al plano de falla responsable del sismo. El estudio de las réplicas es una herramienta muy valiosa para resolver esta indeterminación.



3.1 Identificación de series sísmicas en la zona POCRISC del Pirineo oriental

La zona de estudio del proyecto POCRISC comprende todos los territorios situados en la cordillera pirenaica junto con áreas cercanas. Comprende regiones de tres estados, Andorra, Francia (Pyrénées Atlantiques, Hautes Pyrénées, Haute Garonne, Ariège y Pyrénées Orientales) y España (Bizkaia, Gipuzkoa, Araba, Nafarroa, La Rioja, Zaragoza, Huesca, Lleida, Tarragona, Barcelona y Girona), tal como se muestran en la Figura 4.



Figura 4. Mapa de la zona POCRISC

Para este trabajo se han identificado las series de la zona oriental de la zona POCRISC. En el mapa de la Figura 5 se muestra con más detalle la ubicación de las zonas epicentrales mencionadas más adelante, en la Tabla 1 y la Tabla 2.



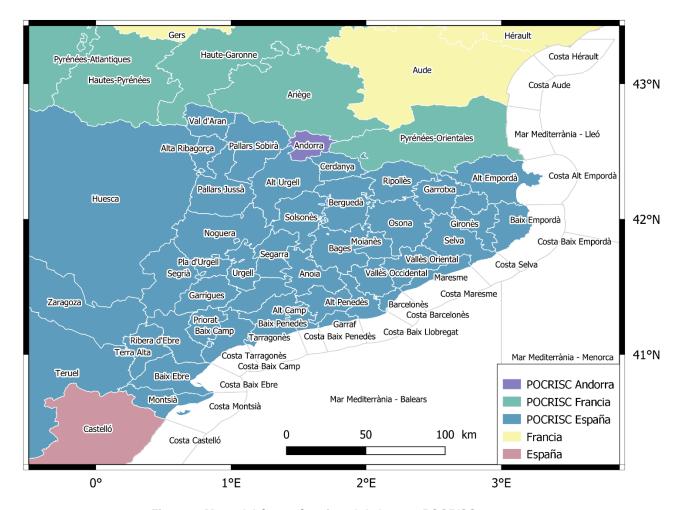


Figura 5. Mapa del área más oriental de la zona POCRISC.

En la Tabla 1 se muestran todas las series sísmicas identificadas en los boletines sísmicos del ICGC (ICGC, 1984-2019) desde que existe la red sísmica de Cataluña y para las cuales existen datos instrumentales de los diferentes sismos de cada serie. A continuación, se definen cada uno de los campos de la tabla:

- Fecha: Día, mes y año en el que comenzó la serie
- Región: De la zona POCRISC, región de España, Francia o Andorra donde se registraron la mayoría de los eventos de la serie (véase mapa de la Figura 5)
- Magnitud: Magnitud del mayor sismo de la serie.
- Intensidad: Intensidad macrosísmica del mayor sismo de la serie.
- Número de sismos: Número de sismos posteriores y anteriores al sismo principal, en caso de que no se pueda distinguir un terremoto principal solo se especifica el número total de sismos.
- Tipo: Grupo al que pertenece la serie sísmica según su magnitud y distribución temporal (apartado 2.1).



En el caso de no tener la suficiente información para rellenar alguno de los apartados estos se dejarán en blanco.

Tabla 1. Listado de series sísmicas identificadas a partir de los boletines sismológicos publicados por el ICGC entre los años 1984 y 2019 (https://icgc.cat/).

| | | | | Número de | sismos | |
|------------|----------------------|----------|------------|-------------|----------|------|
| Fecha | Región | Magnitud | Intensidad | Precursores | Réplicas | Tipo |
| 02/04/2019 | Alt Urgell | 4.0 | IV | 0 | 734 | MR |
| 28/03/2017 | Selva | 3.8 | III | 61 | 291 | PMR |
| 17/02/2017 | Alt Urgell | 3.2 | IV | 847 | • | Е |
| 02/03/2016 | Aude | 3.3 | | 0 | 18 | MR |
| 10/06/2016 | Pla de l'Estany | 3.6 | III | 2 | 30 | PMR |
| 03/10/2016 | Selva | 3.6 | IV | 90 | 234 | PMR |
| 02/08/2015 | Vallès Oriental | 2.7 | 11-111 | 15 | | Е |
| 29/10/2015 | Golf de Roses | 4.3 | IV | 0 | 89 | MR |
| 18/11/2015 | Cerdanya | 3.0 | 11-111 | 32 | • | Е |
| 29/04/2014 | Hautes-Pyrenées | 4.4 | V | 1 | 10 | PMR |
| 05/01/2013 | Pyrenées-Atlantiques | 3.7 | | 20 | 3 | PMR |
| 02/10/2013 | Costa Castellón | 4.3 | III | 30 | 10 | PMR |
| 10/02/2012 | Cerdanya | 2.6 | III | 1 | 20 | PMR |
| 11/04/2012 | Costa Maresme | 2.9 | IV | 0 | 10 | MR |
| 19/04/2012 | Alta Ribagorça | 2.6 | II | 1 | 10 | PMR |
| 28/04/2012 | Selva | 2.5 | | 0 | 20 | MR |
| 22/05/2012 | Pallars Sobirà | 2.9 | IV | 2 | 30 | PMR |
| 30/12/2012 | Pyrenées-Atlantiques | 4.3 | | 4 | 15 | PMR |
| 14/11/2010 | Hautes-Pyrenées | 3.7 | | 2 | 30 | PMR |
| 19/12/2010 | Selva | 3.7 | IV-V | 2 | 5 | PMR |
| 15/01/2009 | Baix Penedès | 2.5 | II | 0 | 10 | MR |
| 04/12/2009 | Solsonès | 1.9 | | 5 | 15 | PMR |
| 22/07/2008 | Selva | 3.8 | IV | 10 | 30 | PMR |
| 07/07/2007 | Alt Urgell | 2.6 | | 30 | 100 | PMR |
| 12/06/2006 | Alt Urgell | 2.5 | П | 5 | 10 | PMR |
| 17/11/2006 | Hautes-Pyrenées | 4.9 | IV | 5 | 322 | PMR |
| 26/05/2005 | Alta Ribagorça | 3.4 | | 5 | 10 | PMR |
| 27/12/2005 | Alt Urgell | 3.0 | IV | 0 | 20 | MR |
| 10/05/2004 | Pyrénées-Orientales | 2.1 | | 20 | 10 | PMR |
| 01/06/2004 | Ripollès | 3.5 | IV | 0 | 30 | MR |
| 21/09/2004 | Cerdanya | 4.0 | IV-V | 0 | 40 | MR |
| 26/02/2003 | Ripollès | 3.8 | IV-V | 0 | 30 | MR |
| 16/05/2002 | Hautes-Pyrenées | 4.4 | IV | 0 | 10 | MR |
| 11/06/2002 | Selva | 2.5 | | 0 | 5 | MR |
| 03/01/2000 | Garrotxa | 3.0 | III | 0 | 20 | MR |
| 12/07/1997 | Pyrénées-Orientales | 3.0 | | 0 | 5 | MR |
| 07/08/1997 | Pyrénées-Orientales | 3.2 | | 0 | 5 | MR |



| Fecha | Pogión | Magnitud | Intensidad | Número de | Tino | |
|------------|---------------------|----------|------------|-------------|----------|------|
| recna | Región | Magnitud | intensidad | Precursores | Réplicas | Tipo |
| 18/02/1996 | Pyrénées-Orientales | 5.2 | IV | 0 | 100 | MR |
| 12/09/1996 | Alt Urgell | 2.9 | IV | 10 | 5 | PMR |
| 07/10/1996 | Hautes-Pyrenées | 2.9 | II | 10 | 10 | PMR |
| 15/05/1995 | Mar Mediterráneo | 4.6 | IV | 0 | 10 | MR |
| 31/12/1995 | Hautes-Pyrenées | 3.5 | III | 3 | 10 | PMR |
| 15/06/1994 | Ariège | 3.3 | | 0 | 10 | MR |
| 08/10/1993 | Cerdanya | 3.3 | III | 0 | 20 | MR |
| 15/12/1991 | Mar Mediterráneo | 3.2 | | 1 | 5 | PMR |
| 20/02/1988 | Alt Urgell | 3.6 | IV | 5 | 20 | PMR |

En la Tabla 2 se pueden observar las series sísmicas identificadas en el Atlas Sísmico de Cataluña (Susagna y Goula, 1999) que recopila los sismos percibidos ocurridos con anterioridad a la existencia de la red sísmica de Cataluña y para los que solo existen datos de encuestas macrosísmicas y documentos históricos.

A diferencia de los boletines sismológicos del ICGC, el Atlas Sísmico de Cataluña distingue entre sismos precursores, sismos principales, réplicas y sismos de enjambre, lo cual ha facilitado su clasificación en los diferentes tipos de series sísmicas. En el caso de no tener la suficiente información para rellenar alguno de los apartados estos se dejarán en blanco.

Por ser información de origen macrosísmico, es decir deducida a partir de la información de percepción y daños, es imposible saber el número real de precursores y réplicas dado que muchas de ellas no son percibidas por la población. Por eso, en la Tabla 2 el campo del número de precursores es cero para la mayoría de las series. Dado que la mayoría de estas secuencias identificadas en el catálogo macrosísmico causaron daños, es muy probable que tuvieran precursores que solo habrían sido registrados de manera instrumental. De esta manera se plantea la duda plausible de que estas series pudieran ser realmente del tipo PMR. Los enjambres del Alt Urgell en 1788 no se consideran como tal en el Atlas Sísmico de Cataluña, pero en Martínez Solares (2003) se clasifica como enjambre con un total de 15 sismos.

Tabla 2. Listado de series sísmicas recopiladas del Atlas Sísmico de Cataluña (Susagna y Goula, 1999). Los datos para la serie de Alt Urgell de 1788 provienen de Martínez Solares (2003).

| Focha | Fecha Región In | | Número de | Tipo | |
|------------|----------------------|----------|-------------|----------|-----|
| i ecna | | | Precursores | Réplicas | Про |
| 18/11/1920 | Pyrénées-Orientales | IV-V | 0 | 6 | MR |
| 19/11/1923 | Vall d'Aran | VIII | 0 | 11 | MR |
| 12/03/1927 | Selva | VIII | 0 | 5 | MR |
| 30/11/1928 | Maresme | | 4 | 11 | PMR |
| 14/03/1970 | Andorra | V-VI | 4 | 7 | PMR |
| 29/02/1980 | Pyrénées-Atlantiques | VIII | 0 | 10 | MR |
| 05/12/1855 | Haute-Garone | VII-VIII | 0 | 6 | MR |
| 20/07/1854 | Hautes-Pyrenées | VII-VIII | 2 | 9 | PMR |



| Fecha | Región | Intensidad | Número de | Tipo | |
|------------|--------------------------|------------|-------------|----------|-----|
| i eciia | Kegion | Intensidad | Precursores | Réplicas | Про |
| 03/10/1845 | Ribera d'Ebre | VII | 1 3 | | PMR |
| 11/01/1788 | Alt Urgell | VI | 15 | | Е |
| 27/12/1755 | Pyrénées-Orientales | VI-VII | 0 | 7 | MR |
| 24/05/1750 | Hautes-Pyrénées VIII 0 9 | | MR | | |
| 19/03/1427 | Selva | VIII-IX | 5 | 5 | PMR |
| 02/03/1373 | Alta Ribagorça | VIII-IX | 0 | 6 | MR |

Las regiones en las que han sucedido más series sísmicas son los Hautes-Pyrénées, la Selva, el Alt Urgell y los Pyrénées-Orientales.

3.2 Análisis de series seleccionadas

A modo de ejemplo, se han analizado las tres últimas series ocurridas en la zona de los Pirineos orientales en el período estudiado, concretamente en las zonas del Alt Urgell i la Selva, indicadas en el mapa de la Figura 6.

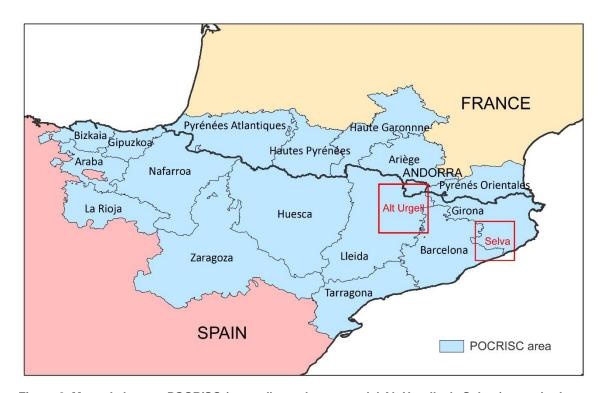


Figura 6. Mapa de la zona POCRISC (en azul), con las zonas del Alt Urgell y la Selva (encuadradas en rojo).



En la Tabla 3 se detallan las fechas inicio y final de las series, el terremoto de mayor magnitud junto con el día de ocurrencia, el número total de seísmos de la serie y el tipo asignado a cada una de ellas.

Tabla 3. Para cada una de las series, nombre asignado, fechas de ocurrencia, terremoto de mayor magnitud, número total de seísmos de la serie y tipo.

| Nombre de la serie | Fecha de inicio | Fecha de finalización | Magnitud máxima | Número de sismos | Tipo de serie |
|--------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|---|---------------------|
| Selva 2017 | 28/03/2017 | 1/10/2017 | 3.8 (15/04/2017) | 353 (61 precursores + 291 réplicas) | PMR |
| Alt Urgell 2017 | 17/02/2017 | 1/04/2017 | 3.2 (20/02/2017) | 847 | E |
| Alt Urgell 2019 | 2/04/2019 | 1/05/2019 | 4.0 (3/04/2019) | 735 (734 réplicas) | MR |



3.2.1 Selva 2017

El mapa de la Figura 7 muestra la distribución espacial de los epicentros de todo el año 2017 en la zona de la Selva.

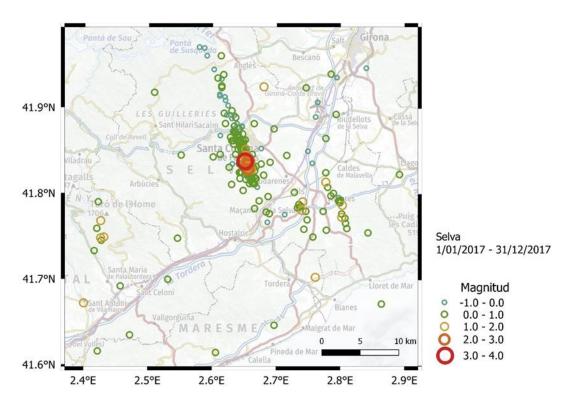


Figura 7. Distribución espacial de los epicentros de la serie ocurrida en la zona de la Selva durante el año 2017. El color y tamaño de los círculos indica su magnitud.

Como se puede ver en el histograma de la Figura 8 y la Figura 9, a finales de marzo del año 2017 se produjo un aumento de la sismicidad en la zona de la Selva. El día 29/03/2017 se produjo un sismo de magnitud local MI 3.0, al que se considera un precursor del sismo principal de la serie, ocurrido el día 15/04/2017, de magnitud MI 3.8. Así, esta serie es del tipo precursor-sismo principal-réplicas. En total se localizaron 353 terremotos.



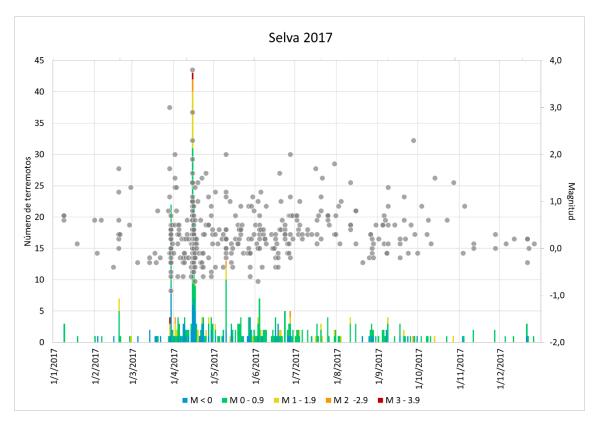


Figura 8. Número de terremotos, clasificados por rango de magnitud, ocurridos en la zona de la Selva durante todo el año 2017.

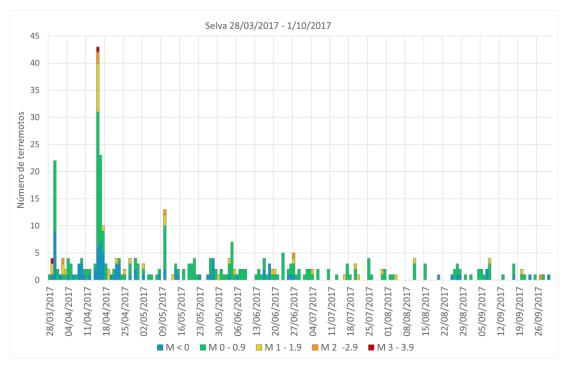


Figura 9. Número de terremotos, clasificados por rango de magnitud, ocurridos en la zona de la Selva entre los días 28 de marzo y 1 de octubre de 2017.



Según se puede observar en la Figura 10 y la Figura 11 no se produce una migración significativa de los epicentros a medida que se desarrolla la serie.

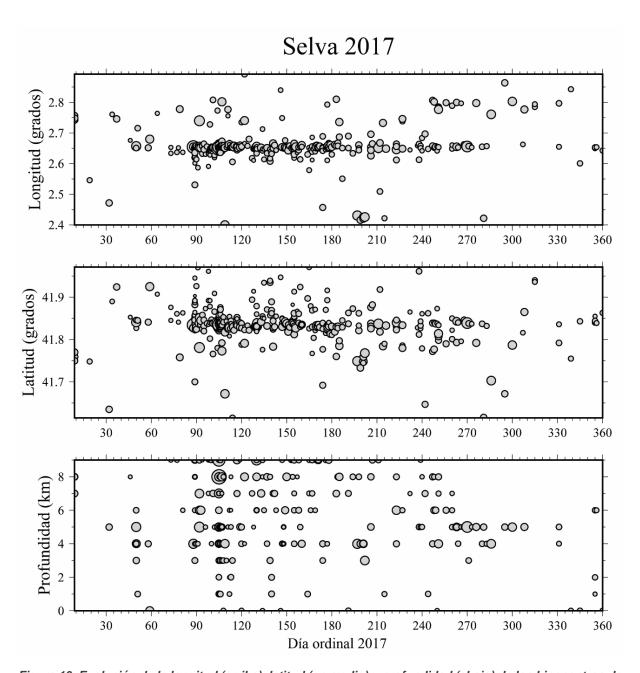


Figura 10. Evolución de la longitud (arriba), latitud (en medio) y profundidad (abajo) de los hipocentros de los terremotos ocurridos en la zona de la Selva durante el año 2017.



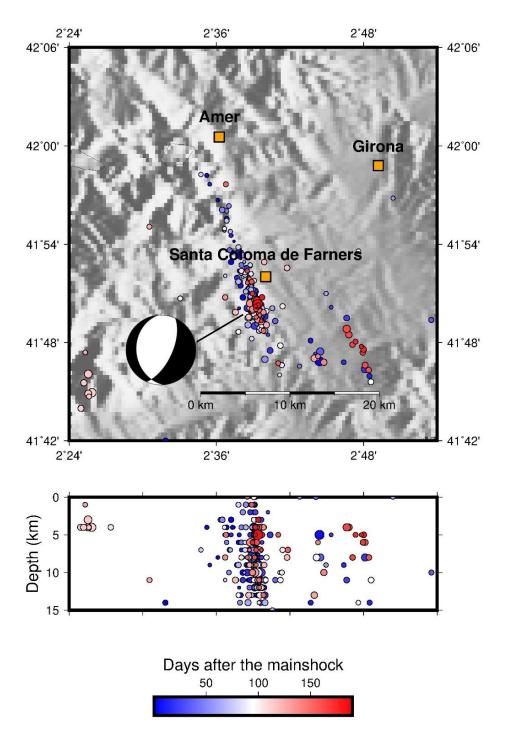


Figura 11. Distribución espaciotemporal de los hipocentros de los terremotos ocurridos en la zona de la Selva a partir del día 28/03/2017, junto con el mecanismo focal del terremoto principal de la serie, de magnitud MI 3.8, ocurrido el día 15/04/2017 (Frontera et al., 2021)



El mecanismo focal del terremoto de mayor magnitud de la serie, MI 3.8, ocurrido el día 15/04/2017, es de tipo normal. En la Tabla 4 presentamos un resumen del resultado del cálculo del tensor de momento sísmico del día 15 de abril de 2017: la fecha y hora origen del seísmo; la latitud y la longitud del epicentro; la profundidad hipocentral, considerada para iniciar el cálculo del tensor de momento sísmico (Prof. ini.); la magnitud local (MI); el mecanismo focal de cada uno de los planos (acimut, buzamiento y deslizamiento) y una representación gráfica del mecanismo; la magnitud de momento sísmico calculado (Mw); la profundidad para la que se ha encontrado un mejor ajuste (Prof. MF); el rms; el índice de confianza (IC.); la calidad, el número de componentes disponibles para el cálculo (Ni), y el número de componentes no descartados en el cálculo (Nu).

Tabla 4. Parámetros principales de la determinación del mecanismo focal del sismo del día 15/04/2017 ocurrido en la zona de la Selva.

| Fecha | Hora (TU) | Latitud (°) | Longitud (°) | | Prof. ini. (km) | MI |
|------------|---------------|----------------|---------------------------------|---------|-----------------|-----|
| 15/04/2017 | 11:04:36 | 41.838 | 2.651 | | 8 | 3.8 |
| Plano | Acimut (°) | Buzamiento (°) | uzamiento (º) Deslizamiento (º) | | | |
| A | 175.0 | 30.0 | 30.0 -116.1 | | _ ((/ | |
| В | 24.4 | 63.3 | -75.8 | | | |
| Mw | Prof. MF (km) | rms | IC (%) | Calidad | Ni | Nu |
| 3.3 | 8 | 0.5 | 79 | В | 54 | 18 |

En el caso de la serie de la Selva, el ajuste de la ley de Gutenberg-Richter puede verse en la Figura 12. El valor de b (b = 0.82) indica una mayor proporción de sismos grandes que de sismos pequeños para esta secuencia.

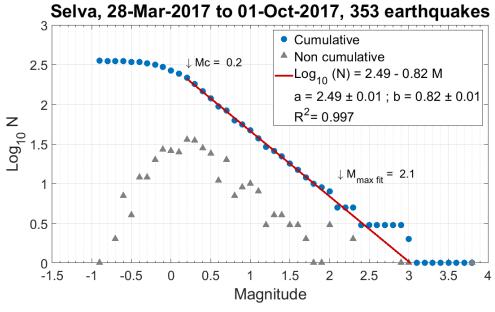


Figura 12. Relación de Gutenberg-Richter para la serie sísmica de la Selva de 2017 (Frontera et al., 2021).



3.2.2 Alt Urgell 2017

El mapa de la Figura 13 muestra la distribución espacial de los epicentros de todo el año 2017 en la zona del Alt Urgell.

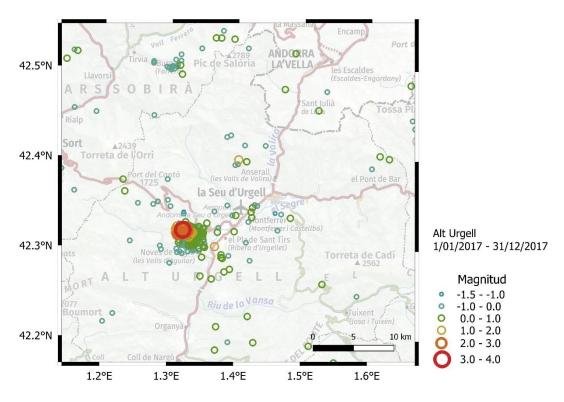


Figura 13. Distribución espacial de los epicentros de la serie ocurrida en la zona del Alt Urgell durante el año 2017. El color y tamaño de los círculos indica su magnitud.

Como se puede ver en el histograma de la Figura 14 y la Figura 15, a mediados de febrero del año 2017 se produjo un aumento de la sismicidad en la zona del Alt Urgell. El día 20/02/2017 se produjo un sismo de magnitud local MI 3.2, el más grande de la serie. Esta serie es del tipo enjambre. En total se localizaron 847 terremotos.



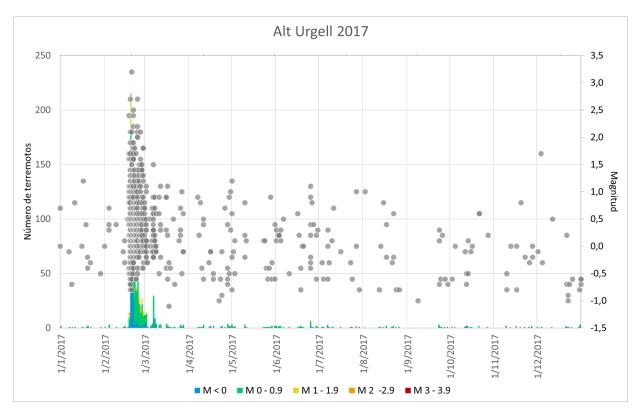


Figura 14. Número de terremotos, clasificados por rango de magnitud, ocurridos en la zona del Alt Urgell durante todo el año 2017.

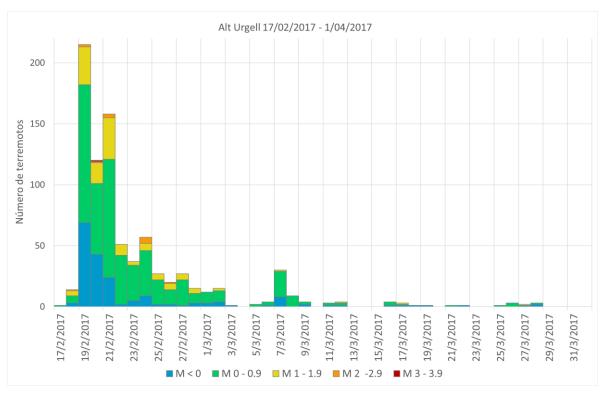


Figura 15. Número de terremotos, clasificados por rango de magnitud, ocurridos en la zona del Alt Urgell entre el 17/02/2017 y el 1/04/2017.



Según se puede observar en la Figura 16 y la Figura 17 no se produce una migración significativa de los epicentros a medida que se desarrolla la serie.

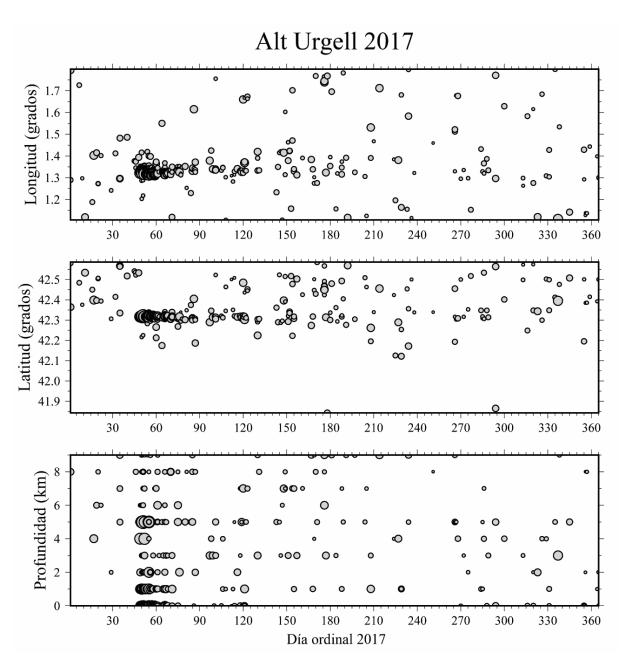


Figura 16. Evolución de la longitud (arriba), latitud (en medio) y profundidad (abajo) de los hipocentros de los terremotos ocurridos en la zona del Alt Urgell durante el año 2017.



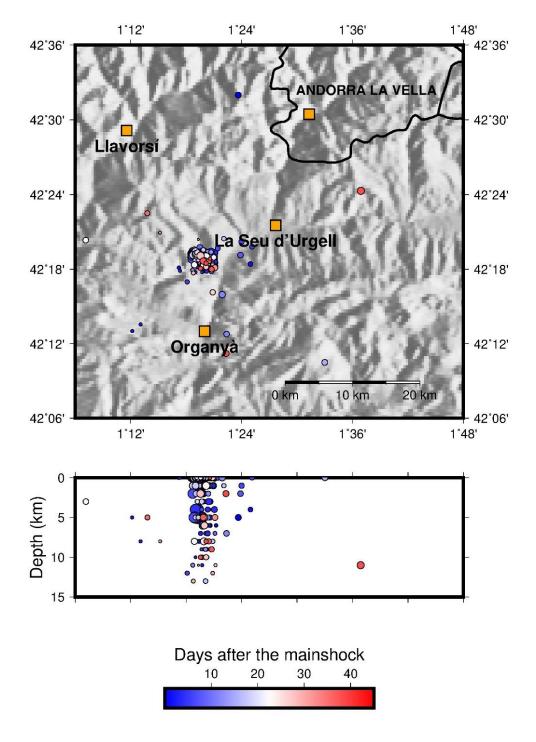


Figura 17. Distribución espaciotemporal de los hipocentros de los terremotos ocurridos en la zona del Alt Urgell a partir del día 17/02/2017 (Frontera et al., 2021).



En el caso de la serie del Alt Urgell de 2017, el ajuste de la ley de Gutenberg-Richter puede verse en la Figura 18Figura 12. El valor de b (b = 1.01) indica una proporción muy similar de sismos grandes y pequeños para esta secuencia.

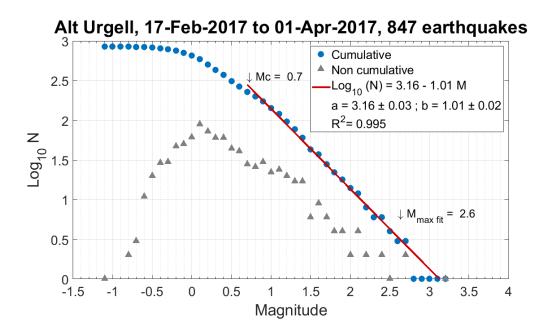


Figura 18. Relación de Gutenberg-Richter para la serie sísmica del Alt Urgell de 2017 (Frontera et al., 2021).



3.2.3 Alt Urgell 2019

El mapa de la Figura 19 muestra la distribución espacial de los epicentros de todo el año 2019 en la zona del Alt Urgell.

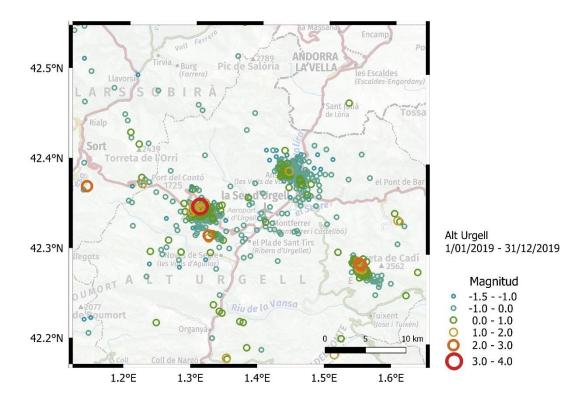


Figura 19. Distribución espacial de los epicentros de la serie ocurrida en la zona del Alt Urgell durante el año 2017. El color y tamaño de los círculos indica su magnitud.

Como se puede ver en el histograma de la Figura 20 y la Figura 21, a principios de abril del año 2019 se produjo un aumento de la sismicidad en la zona del Alt Urgell. El día 3/04/2019 se produjo un sismo de magnitud local MI 4.0, el más grande de la serie. Durante los días siguientes, se produjeron más de 730 réplicas, la mayor de las cuales fue de magnitud 2.5. Esta serie es del tipo sismo principal – réplicas. En total se localizaron 735 terremotos.

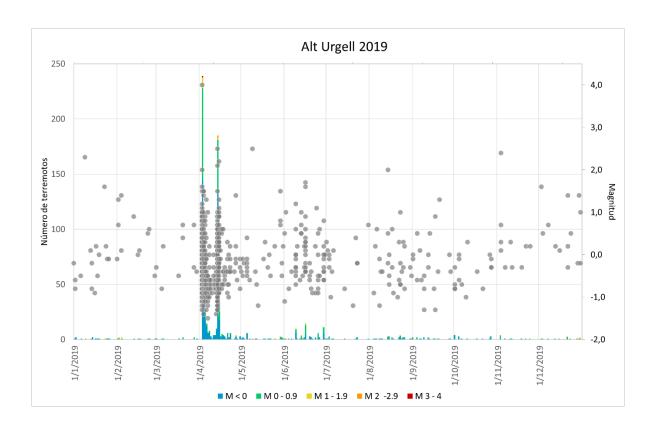


Figura 20. Número de terremotos, clasificados por rango de magnitud, ocurridos en la zona del Alt Urgell durante todo el año 2019.

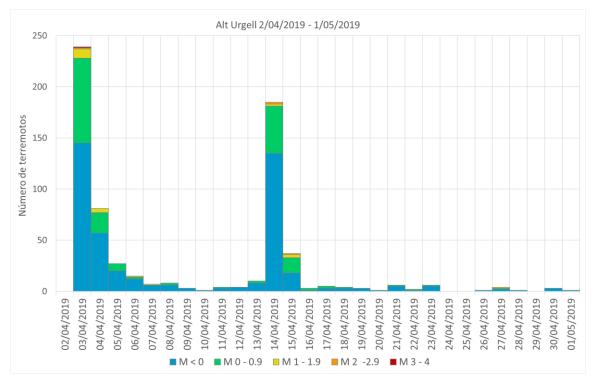


Figura 21. Número de terremotos, clasificados por rango de magnitud, ocurridos en la zona del Alt Urgell entre el 2/04/2019 y el 1/05/2019.



Según se puede observar en la Figura 22 y la Figura 23, durante esta secuencia se produjo una migración significativa de los epicentros a medida que se desarrolla la serie, produciéndose hasta tres núcleos de actividad sísmica. El sismo principal se produjo en el grupo situado más al oeste, a continuación, la sismicidad migró al noreste, algunos días más tarde se desplazó al sureste y la serie acaba en la zona donde se había iniciado.

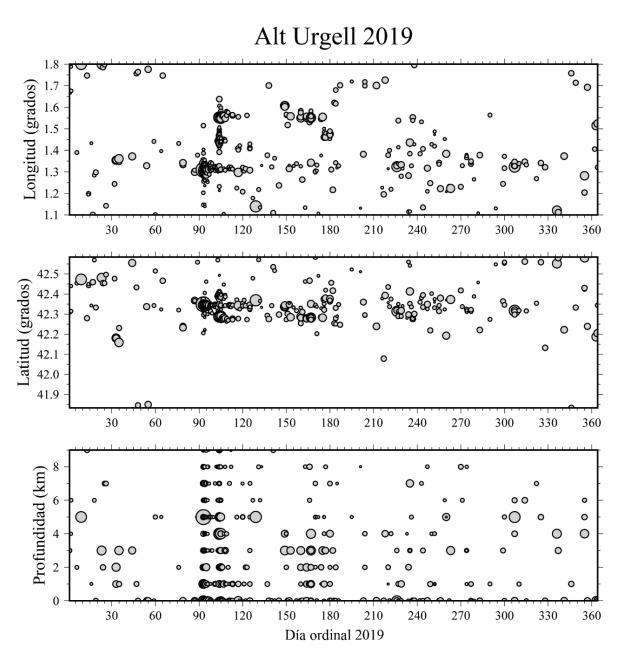


Figura 22. Evolución de la longitud (arriba), latitud (en medio) y profundidad (abajo) de los hipocentros de los terremotos ocurridos en la zona del Alt Urgell durante el año 2019.



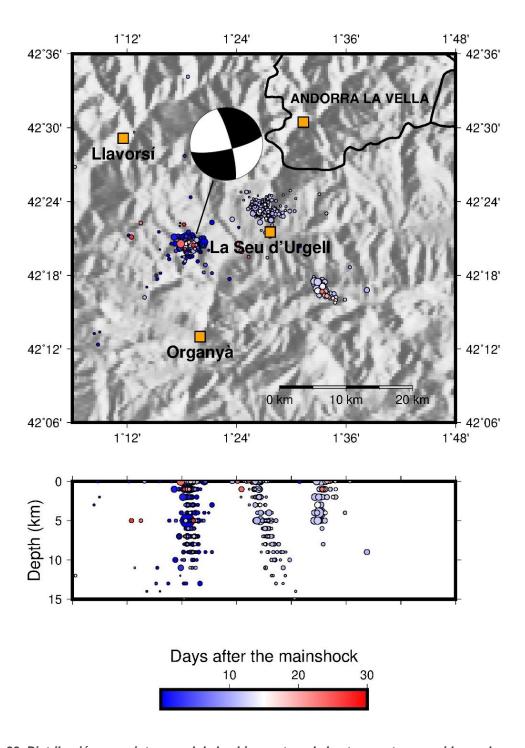


Figura 23. Distribución espaciotemporal de los hipocentros de los terremotos ocurridos en la zona del Alt Urgell a partir del día 3/04/2019, junto con el mecanismo focal del terremoto principal de la serie, de magnitud MI 4.0, ocurrido el día 3/04/2019 (Frontera et al., 2021).



El mecanismo focal del terremoto de mayor magnitud de la serie, MI 4.0, ocurrido el día 3/04/2019, es de tipo falla transformante. En la Tabla 5 presentamos un resumen del resultado del cálculo del tensor de momento sísmico del día 3 de abril de 2019: la fecha y hora origen del seísmo; la latitud y la longitud del epicentro; la profundidad hipocentral, considerada para iniciar el cálculo del tensor de momento sísmico (Prof. ini.); la magnitud local (MI); el mecanismo focal de cada uno de los planos (acimut, buzamiento y deslizamiento) y una representación gráfica del mecanismo; la magnitud de momento sísmico calculado (Mw); la profundidad para la que se ha encontrado un mejor ajuste (Prof. MF); el rms; el índice de confianza (IC.); la calidad, el número de componentes disponibles para el cálculo (Ni), y el número de componentes no descartados en el cálculo (Nu).

Tabla 5. Parámetros principales de la determinación del mecanismo focal del sismo del día 3/04/2019 ocurrido en la zona del Alt Urgell.

| Fecha | Hora (TU) | Latitud (°) | Longitud (°) | | Prof. ini. (km) | MI |
|-----------|---|-------------|--------------|---------|-----------------|-----|
| 3/04/2019 | 15:29:51 | 42.349 | 1.310 | | 5 | 4.0 |
| Plano | Plano Acimut (°) Buzamiento (°) Deslizamiento (°) | | | \ | | |
| А | A 345.0 80.0 -13.4 | | | | | |
| В | 77.4 | 76.8 | -16 | 9.7 | | / |
| Mw | Prof. MF (km) | rms | IC (%) | Calidad | Ni | Nu |
| 4.0 | 3 | 0.6 | 80 | А | 99 | 68 |

En el caso de la serie del Alt Urgell de 2019, el ajuste de la ley de Gutenberg-Richter puede verse en la Figura 24. El valor de b (b = 0.92) indica una proporción de sismos grandes algo mayor que de sismos pequeños para esta secuencia.

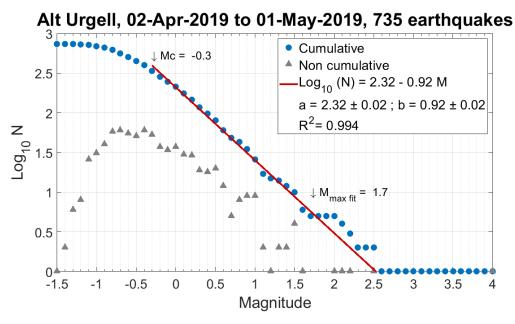


Figura 24. Relación de Gutenberg-Richter para la serie sísmica del Alt Urgell de 2017 (Frontera et al., 2021)



4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las series sísmicas, de mayor o menor envergadura, se producen a lo largo de toda la zona pirenaica. Los estudios realizados hasta el momento no permiten una regionalización más detallada de las mismas.

Para el presente trabajo se han seleccionado, a modo de ejemplo, tres series sísmicas ocurridas en la zona POCRISC. El análisis se ha realizado mediante las rutinas preparadas específicamente para el proyecto POCRISC, con el fin de estudiar cada uno de los aspectos que las caracterizan.

Las series seleccionadas responden a tipos diferente de secuencia. La serie de la Selva de 2017 es de tipo precursor – principal – réplicas; la del Alt Urgell de 2017 es de tipo enjambre; y la del Alt Urgell de 2019, de tipo principal – réplicas. Con estos ejemplos, se ha observado que en una misma región se producen series de diferentes tipos, sin un patrón determinado. A partir de los estudios realizados sí que parece existir cierta diferencia entre diversas regiones en los parámetros seleccionados para la caracterización de las series, pero serán necesarios estudios más detallados tanto de series sísmicas de estas zonas como de series de otras zonas sísmicas para establecer una zonificación.



5 BIBLIOGRAFÍA

Delouis, B. (2014). FMNEAR: determination of focal mechanism and first estimate of rupture directivity using near source records and a linear distribution of point sources. Bulletin of the Seismological Society of America, 104 (3), 1479-1500, doi:10.1785/0120130151.

Frontera Genovard, T, Batlló Ortiz, J., Lemoine, A., Jara Salvador, J.A., Figueras Vila, S., and Irizarry Padilla, P. (2021). Analysis of recent seismic sequences in the Catalan Pyrenees (NE Iberian Peninsula). Poster, 37th General Assembly of the European Seismological Commission, 19-24/09/2021.

Gutenberg, B. y Richter, C. (1949). Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Martínez Solares J. M. (2003). Sismicidad histórica de la península ibérica. Física de la Tierra, Vol. 15, pág. 13-28.

Omori, F (1894). On the aftershocks of earthquakes, Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo, vol. 7, pages 111–200.

Susagna i Vidal, M. y Goula i Surinach, X. (1999). Atles sísmic de Catalunya. Volum 1: Catàleg de sismicitat. 1ª Edición, Barcelona, Institut Cartogràfic de Catalunya.

Utsu, T. (1961). A statistical study of the occurrence of aftershocks, Geophysical Magazine, vol. 30, pages 521–605.

Utsu, T. (2002). Statistical Features of Seismicity,. En Lee, W., Kanamori, H., Jennings, P., y Kisslinger (editores), International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology Part A, 1a Edición.

