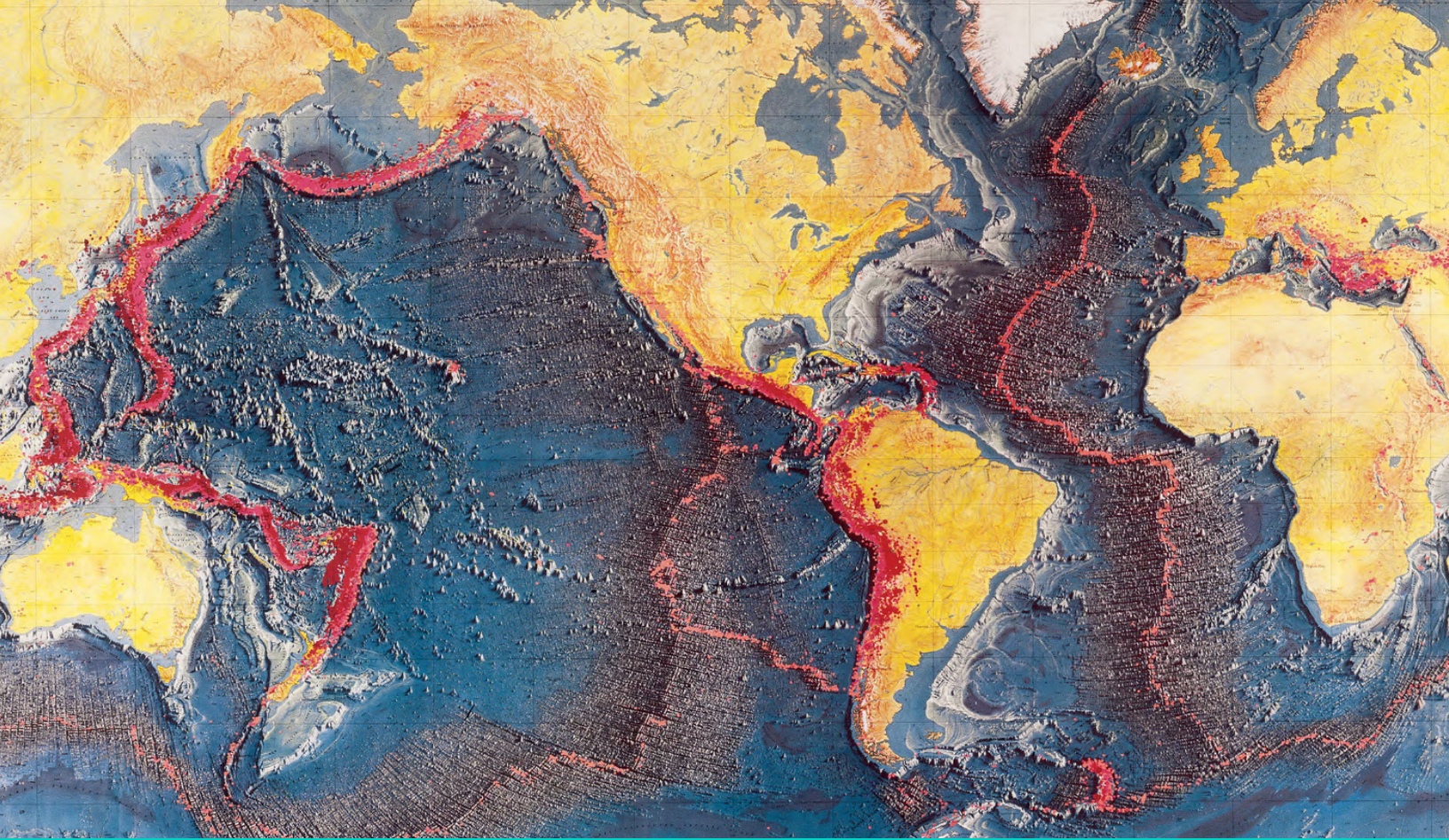




INFORME ASESORÍA I

ANÁLISIS GLOBAL DE GRANDES TERREMOTOS:



Distribución espacial y
temporal de eventos extremos

INSTITUCIÓN

Universidad de Santiago de Chile

FECHA

30 de junio de 2026

PRESENTADO POR

María José Valderrama Nuñez
Tamar Isai Rojas Castillo

PRESENTADO PARA

Dr. Luis Felipe Figueroa
Dr. Francisco Plaza Vega

Tabla de contenidos

1	Resumen ejecutivo	3
2	Formulación del problema y pregunta estadística	3
3	Antecedentes	4
3.1	Distribución global de la sismicidad	4
3.2	Categorización de los eventos según magnitud	5
4	Objetivos	5
4.1	Objetivo general	5
4.2	Objetivos específicos	5
5	Alcance del informe	6
5.1	Declaración y lineamientos para el uso responsable de inteligencia artificial	6
6	Metodología	7
6.1	Caracterización descriptiva	7
6.2	Caracterización temporal	8
6.3	Caracterización espacial	8
6.4	Análisis exploratorio de asociatividad	9
6.5	Criterios de interpretación estadística	9
7	Resultados y discusión	10
7.1	Caracterización descriptiva	10
7.1.1	Magnitud	10
7.1.2	Profundidad	11
7.1.3	Significancia USGS	12
7.1.4	Ajuste de la localización RMS	13
7.1.5	Variables categóricas	14
7.2	Caracterización temporal	15
7.2.1	Frecuencia temporal de los eventos	15
7.2.2	Composición temporal por categoría de magnitud	15
7.2.3	Recurrencia temporal	16
7.2.4	Evolución del tipo de magnitud reportado	16
7.2.5	Evolución temporal del ajuste RMS	17
7.3	Caracterización espacial	18
7.3.1	Zona por Magnitud y Profundidad	18
7.3.2	Zona por Tipo de Magnitud	19
7.3.3	Zona por Significancia USGS	20
7.3.4	Zona por Caracterización Temporal	20
7.3.5	Zona por Condiciones de Reporte	21
7.4	Análisis exploratorio de asociatividad	21
7.4.1	Asociación entre variables numéricas	22
7.4.2	Asociación entre variables categóricas	22
7.5	Supuestos, limitaciones y sensibilidad	22
8	Conclusiones y recomendaciones	24
9	Propuesta metodológica para la etapa inferencial	24
10	Referencias	27
11	Anexos reproducibles	29

1. Resumen ejecutivo

Este informe caracteriza la distribución espacial y temporal de 1.186 terremotos de magnitud $M \geq 6,5$ registrados por la United States Geological Survey (USGS) entre 2000 y 2025. El Cinturón de Fuego del Pacífico concentra 892 eventos, equivalentes al 75,21 % del catálogo y a una tasa de 34,3 eventos por año. Ninguna de las otras zonas presenta una frecuencia comparable: el Cinturón Alpino-Himalayo registra 63 eventos y la Dorsal Meso-Atlántica, 28. Las magnitudes son similares entre el Cinturón de Fuego, el Cinturón Alpino-Himalayo y el resto del mundo, con medias cercanas a 6,9. La Dorsal Meso-Atlántica presenta una media menor de 6,69. Las diferencias espaciales son más evidentes en la profundidad: el Cinturón de Fuego incluye eventos superficiales, intermedios y profundos; el Cinturón Alpino-Himalayo no registra eventos profundos y la Dorsal Meso-Atlántica presenta únicamente eventos superficiales.

En la dimensión temporal, la categoría “Fuerte” concentra la mayoría de los registros. Los 387 eventos de magnitud igual o superior a 7,0 presentan una mediana de 15,6 días entre eventos consecutivos, mientras que para los eventos “Grandes o extremos” esta aumenta a 123 días. Las tasas anuales muestran fluctuaciones entre periodos, pero no una tendencia uniforme en la frecuencia de los eventos. El Cinturón de Fuego mantiene el mayor número de registros durante todo el periodo. Por su parte, la mediana del RMS disminuye de 1,030 segundos en 2000-2009 a 0,745 segundos en 2020-2025, sin que este resultado demuestre por sí solo una mayor precisión de las localizaciones.

En conjunto, los resultados indican que el Cinturón de Fuego se diferencia principalmente por la frecuencia y continuidad de su actividad. En significancia USGS, en cambio, ocho de los diez eventos con mayor puntaje se ubican en el Cinturón Alpino-Himalayo. En magnitud, el valor máximo del catálogo corresponde a 9,10 y se registra en el Cinturón de Fuego. Estas conclusiones describen el catálogo analizado y no permiten estimar peligro sísmico, establecer causalidad ni representar la recurrencia de una falla específica.

Se adjuntan los siguientes enlaces como productos derivados del informe.

- Repositorio GitHub: [MariaJoseVN/USGS-earthquake-analysis.git](https://github.com/MariaJoseVN/USGS-earthquake-analysis.git)
- Mapa Georreferenciado Interactivo: [Abrir mapa interactivo](#)
- Dashboard Interactivo: [Abrir dashboard interactivo](#)

2. Formulación del problema y pregunta estadística

El estudio se articula en torno a la siguiente pregunta estadística:

¿Cómo se diferencian la frecuencia, magnitud y profundidad de los terremotos $M \geq 6,5$ registrados por USGS entre 2000 y 2025 según la zona sísmica en que ocurren, y qué tan comparable es el Cinturón de Fuego con otros cinturones sísmicos globales?

Esta pregunta surge del encargo de comparar la actividad del Cinturón de Fuego del Pacífico con el resto del mundo bajo una definición explícita y reproducible. La categoría “resto del mundo” se conserva para cerrar el total del catálogo, pero se interpreta con cautela porque constituye un conjunto **heterogéneo** de eventos asociados a distintos contextos tectónicos. La **unidad de análisis** corresponde a cada evento sísmico registrado en el catálogo USGS. La **variable de agrupación** es la zona sísmica, definida como Cinturón de Fuego, Cinturón Alpino-Himalayo, Dorsal Meso-Atlántica y resto del mundo. Las **variables principales de comparación** son la frecuencia de ocurrencia, la magnitud y la profundidad. El **alcance** del análisis es descriptivo y exploratorio, por lo que los resultados caracterizan el catálogo observado y no representan predicción, causalidad ni estimación de amenaza sísmica.

3. Antecedentes

Antes de continuar, se sugiere revisar la *guía conceptual de la USGS*, que explica las diferencias entre magnitud e intensidad y presenta las escalas de Richter, magnitud de momento y Mercalli (*USGS Earthquake Hazards Program, s. f.-c*). Es deseable su lectura previa para distinguir apropiadamente los conceptos que se tratan en el presente informe.

La actividad sísmica constituye un fenómeno geofísico que ocurre a escala mundial. En este contexto, los catálogos abiertos de terremotos permiten acceder a registros sistemáticos de estos eventos sísmicos. Su relevancia radica en su utilidad para la caracterización territorial, la gestión institucional y la comprensión de patrones espaciales y temporales asociados a zonas tectónicamente activas.

La fuente principal de información del presente informe corresponde al catálogo de terremotos de la *United States Geological Survey (USGS)*, que se utiliza por su cobertura global, disponibilidad pública y trazabilidad de consulta.

3.1. Distribución global de la sismicidad

La sismicidad de mayor magnitud no se distribuye de forma homogénea sobre el planeta: históricamente se concentra en tres grandes cinturones asociados a los límites entre placas tectónicas (*USGS, s. f.*). El cinturón circumpacífico o “Cinturón de Fuego” concentra cerca del 81 % de los grandes terremotos; el cinturón Alpino-Himalayo, aproximadamente el 17%; y la Dorsal Meso-Atlántica corresponde a un límite divergente de menor frecuencia. El resto de los eventos ocurre de manera dispersa fuera de estas franjas (*USGS, s. f.*).

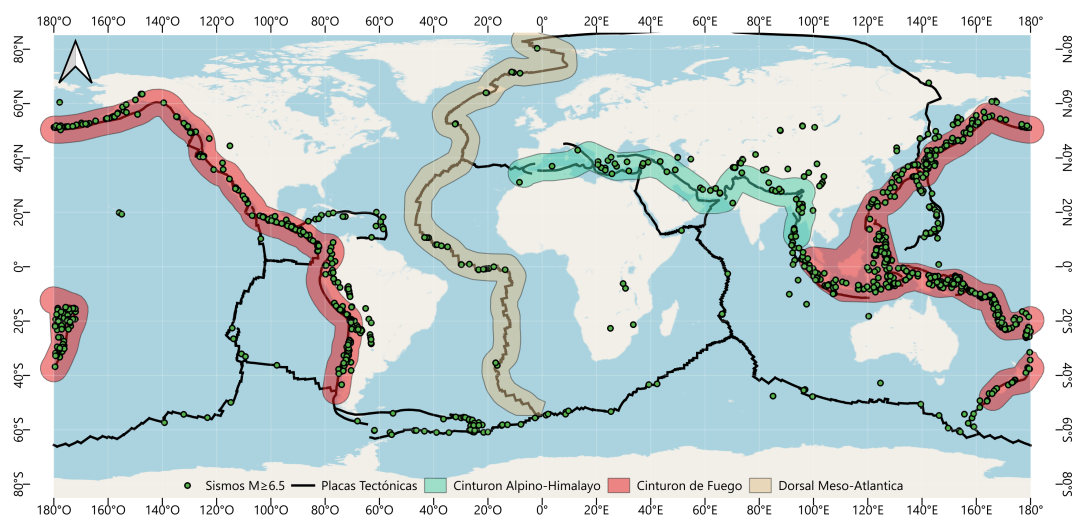


Figura 1. Eventos sísmicos y las zonas utilizadas para la comparación espacial.

Los límites entre placas coinciden con los principales cinturones sísmicos del planeta y sirven de referencia para la comparación espacial desarrollada en el informe. La descripción detallada de cada cinturón se documenta en el anexo correspondiente. (véase *anexo de zonas sísmicas*).

3.2. Categorización de los eventos según magnitud

La bibliografía revisada entrega distintos aportes para interpretar la magnitud sísmica. Una base clásica permite distinguir terremotos mayores, asociados a magnitudes cercanas o superiores a $M \geq 7,0$, y grandes terremotos, próximos a $M \geq 7,8$ (*Gutenberg y Richter 1944*). También se respalda la utilidad de trabajar con catálogos globales y umbrales altos de magnitud para estudiar la ocurrencia de grandes terremotos (*Kagan y Jackson 2016*). Finalmente, los eventos $M \geq 8,0$ presentan relevancia instrumental y científica dentro del registro global (*Ammon et al. 2010*). Estos antecedentes sirven como referencia conceptual para la posterior definición metodológica de categorías de magnitud dentro del catálogo analizado.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Caracterizar, de manera descriptiva, documentada y reproducible, la estructura espacial y temporal de los grandes terremotos ($M \geq 6,5$) registrados a nivel mundial en el catálogo de la USGS durante el período 2000-2025, integrando magnitud, profundidad, recurrencia, zonas sísmicas y condiciones de reporte, con el fin de identificar patrones relevantes de ocurrencia y comparabilidad del registro, y de establecer una base metodológica sólida para una eventual etapa de análisis inferencial. El umbral $M \geq 6,5$ delimita el foco en terremotos de relevancia según el interés del encargo.

4.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- **OE1. Establecer** una base analítica reproducible a partir del catálogo USGS, documentando la fuente, los parámetros de descarga, los criterios de selección y las decisiones de depuración aplicadas, como punto de partida para el análisis integrado.
- **OE2. Estructurar** la información sísmica en variables derivadas y categorías interpretables que articulen magnitud, profundidad, temporalidad, zona sísmica y condiciones de reporte dentro de una misma base de análisis.
- **OE3. Describir** la composición general del catálogo mediante la distribución de eventos por magnitud, profundidad y significancia, estableciendo una lectura inicial de la severidad y estructura de los grandes terremotos observados.
- **OE4. Evaluar** la dinámica temporal del catálogo mediante conteos, tasas, series, composición por magnitud y recurrencia global, para reconocer cómo cambia la ocurrencia de los eventos en el período 2000-2025 y bajo qué condiciones debe compararse entre décadas.
- **OE5. Caracterizar** la información descriptiva, temporal y espacial, para comparar las zonas sísmicas definidas, distinguiendo patrones de ocurrencia, magnitud y profundidad de posibles diferencias asociadas a cobertura o reporte.

5. Alcance del informe

Este informe corresponde a una primera etapa del análisis estadístico descriptivo y exploratorio, centrada en la distribución espacial y temporal de eventos sísmicos de gran magnitud a nivel global. La unidad de análisis es cada evento registrado en el catálogo de la USGS durante el período 2000-2025 con magnitud $M \geq 6,5$, por lo que las conclusiones se derivan exclusivamente de dicha fuente y deben interpretarse dentro de sus límites, cobertura y características.

El estudio no incluye predicción de terremotos, alerta temprana, estimación probabilística de amenaza sísmica ni modelación física del proceso tectónico.

El desarrollo se realiza en Positron, como entorno de trabajo para R y en QGIS, para la manipulación y visualización de datos georreferenciados. El flujo computacional se organiza mediante un script principal que ejecuta scripts específicos por etapa, con el fin de favorecer la trazabilidad, reproducibilidad y trabajo colaborativo del equipo. (véase *anexo de flujo de trabajo e implementación computacional*).

Las recomendaciones formuladas durante la reunión con los profesores fueron incorporadas cuando resultaron pertinentes para el alcance y los datos disponibles. Las propuestas no desarrolladas y sus fundamentos se documentan en el anexo correspondiente. (véase *acta de reunión y propuestas no incorporadas*).

5.1. Declaración y lineamientos para el uso responsable de inteligencia artificial

El equipo declara que sí utilizó herramientas de inteligencia artificial generativa como apoyo técnico, documental y editorial durante el desarrollo de la asesoría. Su uso se mantuvo bajo criterios de trazabilidad, revisión humana, contraste con los datos originales y ejecución reproducible. La selección de fuentes, la construcción del análisis, la interpretación de los resultados, las conclusiones y las decisiones finales permanecieron bajo responsabilidad de los integrantes, y ninguna asistencia modificó los datos ni los resultados estadísticos presentados.

La declaración detallada de herramientas, fechas, propósitos, productos asociados, tipos de apoyo y verificaciones realizadas se presenta en el anexo correspondiente. (véase *anexo de uso de inteligencia artificial*).

6. Metodología

6.1. Caracterización descriptiva

La caracterización descriptiva se realizó sobre la base **sismos**, construida a partir de **sismos_raw** después de la selección de variables, la revisión de consistencia y la creación de variables derivadas. La unidad de análisis corresponde a cada evento registrado por USGS entre 2000 y 2025 con magnitud igual o superior a $M \geq 6,5$. Se determinaron la extensión temporal y el número de eventos para establecer el universo sobre el cual se calcularon los resúmenes posteriores.

Las variables numéricas se caracterizaron mediante medidas de tendencia central, dispersión, posición y valores extremos. La media y la mediana se utilizaron conjuntamente para distinguir el nivel promedio del valor central cuando las distribuciones presentan asimetría. La desviación estándar permitió cuantificar la variabilidad, mientras que los cuantiles permitieron localizar la mitad central de los datos y describir la cola superior sin depender exclusivamente del máximo. Estos estadísticos se calcularon para **mag**, **depth**, **sig** y **rms**, con las adecuaciones requeridas por la naturaleza y disponibilidad de cada variable.

Para la magnitud se resumió su distribución continua y se calculó el máximo registrado en cada año. Los máximos anuales se ordenaron para identificar los años asociados con los valores superiores del catálogo, los cuales no quedan representados por las medidas centrales. Además, **mag** se transformó en **magnitud_cat**, con las categorías “Fuerte”, “Mayor” y “Grande o extremo”, y se calcularon sus frecuencias y porcentajes para describir la composición del catálogo y permitir comparaciones temporales y espaciales posteriores.

La profundidad se analizó de forma continua y mediante **profundidad_cat**. La comparación entre media y mediana permitió evaluar la asimetría producida por la presencia de eventos de gran profundidad. La categorización en eventos “Superficial”, “Intermedio” y “Profundo” se utilizó para cuantificar la composición del catálogo y disponer de grupos comunes para los análisis posteriores. Los criterios de construcción de **magnitud_cat** y **profundidad_cat**, junto con el tratamiento de **magType**, se documentan en el anexo correspondiente. (véase *anexo de caracterización descriptiva*).

La significancia USGS (**sig**) se incorporó como un indicador compuesto de relevancia del evento. Además de su resumen general, se ordenaron los diez registros con mayor significancia para identificar los eventos asociados con la cola superior. Posteriormente, **sig** se resumió dentro de las categorías de magnitud y profundidad mediante número de observaciones, media, mediana, desviación estándar y máximo. Estas comparaciones se plantearon como descriptivas.

Las variables categóricas se describieron mediante frecuencias absolutas y porcentajes. **magType** se agrupó en **mww**, **mwc**, **mwb** y “otros” para evitar la fragmentación producida por tipos poco frecuentes. Para los tres tipos principales se resumió la magnitud mediante número de observaciones, media, mediana, desviación estándar, mínimo y máximo. La categoría “otros” no se incluyó en esta comparación por reunir métodos heterogéneos y con baja frecuencia. Por su parte, **magSource** se utilizó para describir la procedencia institucional de las magnitudes reportadas y contextualizar la comparabilidad del catálogo, sin interpretarla como una clasificación de calidad.

Por último, el ajuste de la localización se caracterizó mediante **rms**. Se cuantificaron sus valores observados y faltantes, y estos últimos se imputaron con la mediana de la década correspondiente para mantener todos los eventos sin trasladar valores extremos a los registros ausentes. El efecto de la imputación se evaluó comparando **rms** y **rms_imp** mediante sus principales estadísticos y cuantiles. La versión observada se utilizó en la descripción general y **rms_imp** en los análisis que requerían registros completos. La definición matemática y el procedimiento se detallan en el anexo correspondiente. (véase *anexo de RMS*).

6.2. Caracterización temporal

La caracterización temporal se realizó sobre `sismos_temporal`, objeto derivado de `sismos` mediante la incorporación de `fecha_mes` y la organización de los eventos por mes, año y década. Esta etapa tuvo como propósito describir la frecuencia de ocurrencia, la composición del catálogo y las condiciones de reporte a lo largo de 2000-2025.

La frecuencia se resumió mediante conteos mensuales y anuales del catálogo completo. Los meses sin registros se completaron con cero porque representan ausencia observada de eventos que cumplen el criterio de selección y no valores faltantes. A partir de los conteos anuales se calcularon el promedio, el máximo y el mínimo para establecer el nivel general y la amplitud de las variaciones interanuales. Los conteos mensuales y anuales se organizaron, además, como series temporales regulares de frecuencia 12 y 1, respectivamente, con el fin de mantener una secuencia continua del período analizado.

La composición temporal se examinó mediante `magnitud_cat`, conservando las categorías “Fuerte”, “Mayor” y “Grande o extremo” definidas en la caracterización descriptiva. Se calcularon conteos anuales y decadales por categoría. Para comparar 2000-2009 y 2010-2019 con el período incompleto 2020-2025, los conteos decadales se transformaron en tasas anuales promedio usando como denominador diez, diez y seis años observados, respectivamente. Esta estandarización permitió comparar la frecuencia relativa de los períodos sin atribuir al último tramo una menor actividad únicamente por su duración.

La recurrencia temporal global se calculó ordenando los eventos por `fecha_hora_utc` y obteniendo, para cada registro, los días transcurridos desde el evento anterior. El primer evento de cada grupo no genera un intervalo, por lo que el número de intervalos corresponde al número de eventos menos uno. El cálculo se realizó para el grupo agregado “Mayor o Grande o extremo”, equivalente a magnitudes iguales o superiores a 7,0, y para cada categoría de `magnitud_cat`. Los intervalos se resumieron mediante media, mediana, cuartiles 25 y 75, mínimo y máximo. La mediana y los cuartiles permitieron representar el espaciado habitual sin que los intervalos excepcionalmente prolongados determinaran por sí solos el resumen. Esta recurrencia corresponde al catálogo mundial y no a una falla o zona tectónica específica.

La evolución de los métodos de magnitud se evaluó mediante `magType_grupo`, conservando `mww`, `mwc` y `mwb` y agrupando los tipos menos frecuentes como “otros”. Se calcularon la composición porcentual anual de estos grupos y la participación anual de `mww` para determinar si la estructura metodológica del catálogo se mantuvo constante durante el período. Este análisis se utilizó para contextualizar las comparaciones temporales de magnitud, dado que los métodos reportados no presentan la misma participación en todos los años.

Por último, la evolución del ajuste de la localización se describió mediante `rms_imp`. Para cada año se calcularon la mediana y los cuantiles 25 y 75, y para los períodos 2000-2009, 2010-2019 y 2020-2025 se obtuvo el resumen equivalente. La mediana se utilizó como medida central por su menor sensibilidad a valores atípicos. El uso de la variable imputada permitió conservar todos los eventos y se sustentó en la comparación previa entre `rms` y `rms_imp`, que mostró un efecto prácticamente nulo de la imputación sobre la distribución. *(las limitaciones interpretativas de la recurrencia y de las comparaciones entre períodos se documentan en el [anexo de caracterización temporal](#)).*

6.3. Caracterización espacial

La caracterización espacial se realiza sobre `sismos`, a partir de `longitude` y `latitude`, con el fin de transformar la ubicación puntual de cada evento en una variable categórica que permita comparar zonas sísmicas. La variable `zona` se obtiene por intersección espacial entre los eventos y los polígonos de `area_regiones.geojson`, capa que delimita el Cinturón de Fuego, el Cinturón Alpino-Himalayo y la Dorsal Meso-Atlántica; los eventos que no intersectan ningún polígono se clasifican como “Resto del mundo”, categoría que reúne los eventos fuera de las tres zonas sísmicas principales. *(véase en más detalle el [anexo de zonas sísmicas](#)).*

Sobre **zona** se calculan la frecuencia de ocurrencia, mediante conteos, porcentajes y tasa anual, y su evolución temporal, mediante la serie anual de eventos por zona con su promedio, mínimo y máximo, para establecer cómo se distribuye la actividad entre zonas y si cada una la sostiene de forma continua o esporádica durante el período 2000-2025.

La magnitud (**mag**) y la profundidad (**depth**) se resumen por zona mediante media, mediana, desviación estándar, máximo y cuantiles, y se representan con diagramas de caja, para comparar el nivel, la dispersión y la cola de cada distribución entre zonas. La media y la mediana se interpretan de forma conjunta por la asimetría de la profundidad, y los cuantiles describen la cola superior que las medidas centrales no reflejan. La composición por **magnitud_cat** y **profundidad_cat** permite observar, de forma resumida, las diferencias estructurales entre zonas.

Se describe la composición del tipo de magnitud (**magType_grupo**) por zona para verificar si el método de estimación se reparte de forma homogénea entre las zonas y no condiciona la comparación de magnitud. La significancia USGS (**sig**) se resume por zona mediante media, mediana, desviación estándar y máximo, con diagramas de caja, para comparar la relevancia de los eventos entre zonas más allá de su magnitud.

Por último, se incorporan indicadores de comparabilidad del registro por zona, el número de estaciones (**nst_imp**), el ajuste de la localización (**rms_imp**) y la fuente de magnitud (**magSource**), que no corrigen los resultados pero permiten declarar si las comparaciones pueden estar condicionadas por cobertura instrumental, ajuste del evento o fuente de reporte. (*véase en más detalle el [anexo de caracterización espacial](#)*).

6.4. Análisis exploratorio de asociatividad

El análisis exploratorio de asociatividad se realizó sobre **sismos** para describir la dirección e intensidad de las relaciones observadas. Para las variables numéricas se utilizó la correlación de Spearman, adecuada para asociaciones monótonas sin exigir normalidad. La matriz incluyó todas las variables numéricas, excepto **nst** y **rms**, reemplazadas por **nst_imp** y **rms_imp**, y se calculó con observaciones completas por pares. Se priorizó la interpretación de **mag** con **sig** y del año con las variables instrumentales imputadas.

Para las variables categóricas se utilizó la V de Cramér como medida descriptiva normalizada entre 0 y 1. Se consideraron las variables de fuente, tipo de magnitud, zona y categorías de magnitud y profundidad, con énfasis en las asociaciones vinculadas con la estructura de reporte y la comparación espacial.

6.5. Criterios de interpretación estadística

El análisis se plantea como descriptivo y exploratorio. Por ello, los resultados se interpretan como resúmenes del catálogo analizado y no como estimaciones causales, predictivas o probabilísticas de amenaza sísmica.

7. Resultados y discusión

7.1. Caracterización descriptiva

7.1.1. Magnitud

El catálogo analizado considera eventos sísmicos registrados entre los años 2000 y 2025, lo que corresponde a un período de 26 años y 312 meses de observación. Bajo el criterio de selección definido para el estudio, se identifican 1.186 eventos con magnitud igual o superior a $M \geq 6,5$.

La magnitud de los eventos presenta una media de 6,90 y una mediana de 6,80, lo que indica que el catálogo se concentra cerca del umbral mínimo de selección definido para el estudio. El 75 % de los eventos alcanza magnitudes de hasta 7,10, mientras que el 90 % no supera 7,50 y el 95 % se mantiene bajo 7,70.

A partir de esta descripción continua, el análisis siguiente identifica los años con mayores máximos anuales y luego resume la composición del catálogo mediante categorías de magnitud.

La distribución observada confirma la lectura anterior, ya que se concentra en los valores más cercanos al umbral de inclusión y presenta una cola hacia magnitudes más altas.

Para revisar con mayor detalle los valores superiores de la distribución, se construye un ranking de los años con mayores magnitudes máximas registradas en el catálogo.

Puesto	1	2	3	4	5
Año(s)	2004, 2011	2010, 2025	2005, 2012	2001, 2007	2006, 2013, 2015
Magnitud máxima	9,10	8,80	8,60	8,40	8,30

Tabla 3. Ranking de mayores magnitudes máximas anuales del catálogo.

El ranking de máximos anuales muestra que los valores más altos se concentran en pocos años del período. Los máximos de 2004 y 2011 alcanzan magnitud 9,1, mientras que 2010 y 2025 registran 8,8. Esta lectura complementa el resumen global: aunque la mayor parte de los eventos se concentra bajo magnitud 7,7, existen años con eventos de magnitud excepcionalmente alta que influyen en la caracterización general del catálogo.

Para complementar el resumen numérico, la variable `mag` se categorizó en `magnitud_cat`. (véase [anexo de caracterización descriptiva](#)).

Categoría de magnitud	Eventos	Porcentaje
Fuerte	799	67,4 %
Mayor	328	27,7 %
Grande o extremo	59	5,0 %

Tabla 4. Distribución de eventos según categoría de magnitud.

Indicador	Valor
Año de inicio	2000
Año de término	2025
Años analizados	26
Meses analizados	312
Eventos con $M \geq 6,5$	1.186

Tabla 1. Alcance temporal y tamaño del catálogo analizado.

Estadístico	Valor	Estadístico	Valor
Media	6,90	Q25	6,60
Mediana	6,80	Q50	6,80
Desv. est.	0,417	Q75	7,10
Máx.	9,10	Q90	7,50
		Q95	7,70

Tabla 2. Resumen descriptivo de la magnitud de los eventos analizados.

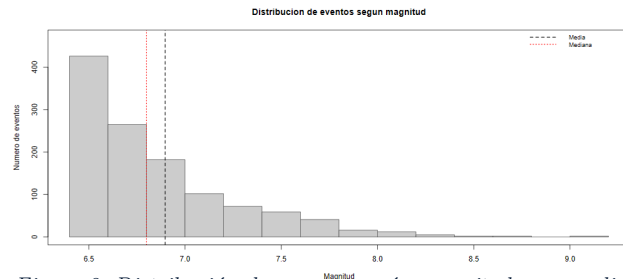


Figura 2. Distribución de eventos según magnitud, con media y mediana del catálogo.

La distribución por categoría de magnitud muestra que la mayor parte del catálogo corresponde a eventos clasificados como “Fuerte”, con 799 registros, equivalentes al 67,4 % del total. La categoría “Mayor” reúne 328 eventos, correspondiente al 27,7 %, mientras que los eventos “Grande o extremo” representan 59 casos, es decir, el 5,0 % del catálogo. Esta composición confirma que, aunque el estudio se concentra en eventos de magnitud elevada, la mayoría se ubica en el tramo inferior del rango analizado, mientras que los eventos de mayor magnitud constituyen un grupo reducido dentro del período 2000-2025.

7.1.2. Profundidad

En cuanto a la profundidad, el catálogo presenta una mediana de 26,0 km y una media de 93,1 km. La diferencia entre ambas medidas, junto con una desviación estándar de 164,1 km, muestra una distribución asimétrica. La mayoría de los eventos se concentra en profundidades bajas, pero existen registros de profundidad considerablemente mayor, con un máximo observado de 676,4 km.

Para complementar el resumen numérico, la variable `depth` se categorizó en `profundidad_cat`. (véase [anexo de caracterización descriptiva](#)).

Estadístico	Valor	Estadístico	Valor
Media	93,1	Q25	13,0
Mediana	26,0	Q50	26,0
Desv. est.	164,1	Q75	58,0
Máx.	676,4	Q90	354,8
		Q95	576,6

Tabla 5. Resumen descriptivo de la profundidad focal de los eventos analizados.

Categoría de profundidad	Eventos	Porcentaje
Superficial	913	77,0 %
Intermedio	150	12,6 %
Profundo	123	10,4 %

Tabla 6. Distribución de eventos según categoría de profundidad.

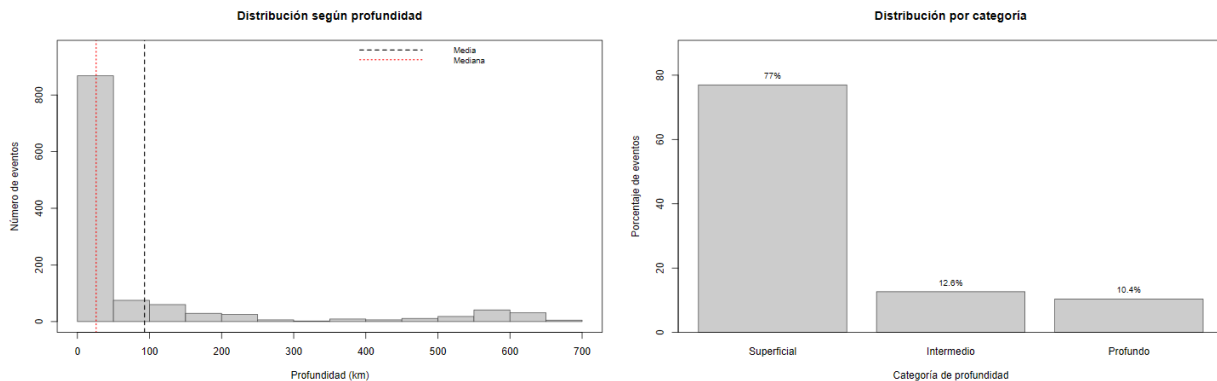


Figura 3. Distribución de eventos según profundidad continua y categoría de profundidad.

La composición por categoría confirma la concentración observada en el resumen numérico: 913 eventos, equivalentes al 77,0 % del catálogo, se clasifican como superficiales. Los eventos intermedios representan el 12,6 %, mientras que los profundos alcanzan el 10,4 %. En conjunto, la profundidad muestra una estructura dominada por eventos superficiales, aunque con una fracción menor de eventos intermedios y profundos que explica la cola superior de la distribución.

7.1.3. Significancia USGS

La variable **sig** resume la significancia asignada por USGS a cada evento. En términos descriptivos, la significancia media alcanza 839,7 puntos, mientras que la mediana corresponde a 732,0 puntos.

La mayor parte de los eventos se concentra en valores relativamente cercanos a la mediana. El 75 % del catálogo presenta una significancia igual o inferior a 852,3, mientras que el máximo observado alcanza 2910,0 puntos.

Una revisión se realiza mediante el ranking de eventos con mayor significancia USGS. Este ranking permite identificar qué registros explican los valores máximos observados. La columna **zona** se incluye como referencia descriptiva; su construcción y justificación se abordan en la metodología y en la caracterización espacial posterior.

Estadístico	Valor	Estadístico	Valor
Media	839,7	Q25	672,0
Mediana	732,0	Q50	732,0
Desv. est.	317,3	Q75	852,3
Mín.	650,0	Q90	1114,0
Máx.	2910,0	Q95	1445,8

Tabla 7. Resumen descriptivo de la significancia USGS de los eventos analizados.

Puesto	Año	Evento o lugar	Zona	Mag.	Prof.	sig
1	2010	Sierra El Mayor, B.C., México	Cinturón de Fuego	7,2	10,0	2910
2	2017	Tehuantepec, México	Cinturón de Fuego	8,2	47,4	2910
3	2023	Pazarcik, secuencia Kahramanmaras	Cinturón Alpino-Himalayo	7,8	10,0	2910
4	2025	Mandalay, Burma/Myanmar	Cinturón Alpino-Himalayo	7,7	10,0	2910
5	2016	Preci, Italia	Cinturón Alpino-Himalayo	6,6	8,0	2841
6	2015	Bharatpur, Nepal	Cinturón Alpino-Himalayo	7,8	8,2	2820
7	2017	Halabja, Iraq	Cinturón Alpino-Himalayo	7,3	19,0	2790
8	2025	Meseta tibetana meridional	Cinturón Alpino-Himalayo	7,1	10,0	2787
9	2023	Al Haouz, Marruecos	Cinturón Alpino-Himalayo	6,8	19,0	2690
10	2023	Elbistan, secuencia Kahramanmaras	Cinturón Alpino-Himalayo	7,5	7,4	2614

Tabla 8. Diez eventos con mayor significancia USGS dentro del catálogo analizado.

El ranking muestra que cuatro eventos alcanzan el valor máximo de significancia observado en el catálogo (2910 puntos). Además, varios de los registros con mayor significancia corresponden al Cinturón Alpino-Himalayo, aspecto que se retoma en la caracterización espacial. La lista no está formada únicamente por los eventos de mayor magnitud: aparecen registros de magnitud 6,6 y 6,8 con valores de **sig** muy altos. Esto refuerza que la significancia USGS debe interpretarse como un indicador compuesto de relevancia del evento, no como una medida equivalente a la magnitud.

Para contrastar se revisa la significancia según la categoría de magnitud y la categoría de profundidad.

Categoría de magnitud	Eventos	Media	Mediana	Desv. est.	Máximo
Fuerte	799	742,8	691	188,7	2841
Mayor	328	992,2	848	383,2	2910
Grande o extremo	59	1303,2	1064	509,5	2910

Tabla 9. Resumen descriptivo de la significancia USGS según categoría de magnitud.

La significancia media y mediana aumentan progresivamente desde la categoría “Fuerte” hasta “Grande o extremo”. Este patrón es esperable, dado que la magnitud forma parte de los elementos considerados por USGS para construir **sig**; sin embargo, la variabilidad dentro de cada grupo y la presencia de máximos elevados en más de una categoría confirman que la significancia también incorpora otros componentes de relevancia del evento.

La significancia según la categoría de profundidad describe cómo se distribuye este indicador entre eventos superficiales, intermedios y profundos.

Categoría de profundidad	Eventos	Media	Mediana	Desv. est.	Máximo
Superficial	913	854,3	732,0	347,3	2910
Intermedio	150	828,9	762,5	211,1	1890
Profundo	123	744,5	712,0	102,6	1152

Tabla 10. Resumen descriptivo de la significancia USGS según categoría de profundidad.

A diferencia de la comparación por magnitud, la significancia no presenta un aumento progresivo entre las categorías de profundidad. Los eventos superficiales registran la media, la dispersión y el máximo más elevados, mientras que los intermedios presentan la mediana mayor. Los eventos profundos muestran los valores centrales y la variabilidad más bajos. Estas diferencias son descriptivas y no permiten atribuir por sí solas la significancia a la profundidad del evento.

7.1.4. Ajuste de la localización RMS

El RMS resume, en segundos, las diferencias entre los tiempos de llegada de las ondas sísmicas observados en las estaciones y los calculados por el modelo de localización. Valores menores indican una mayor concordancia con el modelo, aunque no constituyen por sí solos una medida completa de confiabilidad.

Indicador	Valor
Total de eventos	1.186
RMS observado	1.177
RMS imputado	9
Porcentaje observado	99,2 %
Porcentaje imputado	0,759 %

Tabla 11. Disponibilidad e imputación de los valores RMS del catálogo.

El indicador presenta una alta disponibilidad: 1.177 de los 1.186 eventos cuentan con un valor originalmente observado, equivalentes al 99,2 % del catálogo. Solamente nueve registros, correspondientes al 0,76 %, requirieron imputación. Por tanto, los resultados descriptivos y temporales se sustentan casi completamente en información observada.

Para comprobar el efecto de este procedimiento, se comparan los principales estadísticos del RMS observado y de la versión completada mediante imputación.

La comparación confirma que la imputación tiene un efecto prácticamente nulo sobre la distribución. La mediana, la desviación estándar y la mayoría de los cuantiles permanecen sin cambios; solo se observan diferencias mínimas en la media y el percentil 95. En consecuencia, los nueve valores imputados permiten completar la variable sin modificar de manera sustantiva su comportamiento descriptivo.

Estadístico	Observado	Imputado
Observaciones	1.177	1.186
Media	0,964	0,965
Mediana	0,970	0,970
Desv. est.	0,219	0,219
Mínimo	0,070	0,070
Q25	0,840	0,840
Q75	1,100	1,100
Q90	1,230	1,230
Q95	1,312	1,310
Máximo	1,720	1,720

Tabla 12. Comparación descriptiva entre el RMS observado y el RMS imputado.

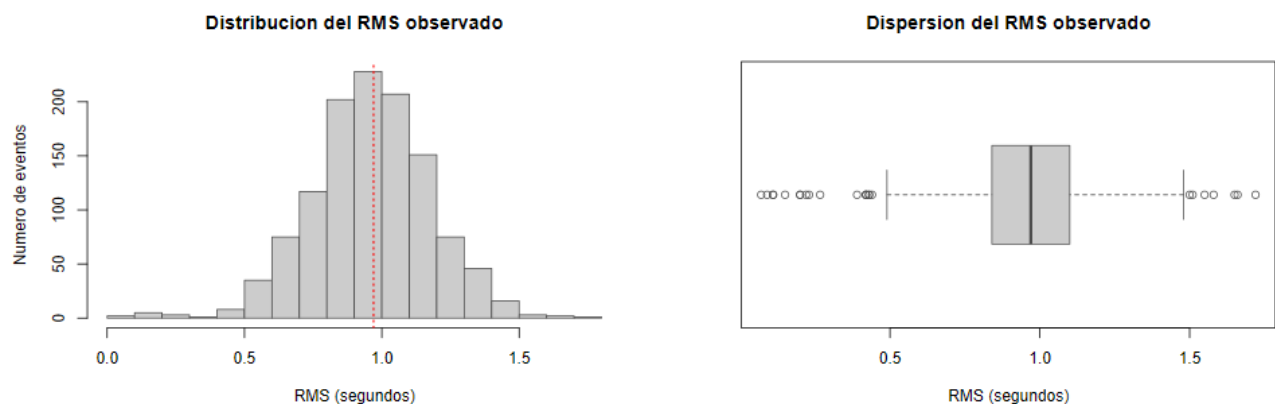


Figura 4. Distribución y dispersión del RMS observado en el catálogo.

La visualización muestra una distribución unimodal concentrada alrededor de la mediana de 0,97 segundos. La mitad central de los eventos se sitúa entre 0,84 y 1,10 segundos, mientras que el diagrama de caja

identifica valores atípicos tanto en el extremo inferior como en el superior. Estos registros reflejan ajustes menos habituales dentro del catálogo, pero no permiten calificar por sí solos la confiabilidad completa de cada localización.

7.1.5. Variables categóricas

7.1.5.1. Tipo de magnitud

El tipo de magnitud reportado, representado por `magType`, permite identificar el método empleado para estimar la magnitud de cada evento. El catálogo presenta un predominio de `mww`, seguido por `mwc` y `mwb`. Para facilitar las comparaciones posteriores, los tipos menos frecuentes se reunieron en la categoría “otros”. En conjunto, estas categorías agrupan 33 eventos, equivalentes al 2,78 % del catálogo.

<code>magType_grupo</code>	Eventos	Porcentaje
<code>mww</code>	647	54,6 %
<code>mwc</code>	390	32,9 %
<code>mwb</code>	116	9,78 %
Otros	33	2,78 %

Tabla 13. Distribución de eventos según la agrupación del tipo de magnitud.

Una vez descrita la frecuencia de los tipos de magnitud, se comparan los valores reportados para `mww`, `mwc` y `mwb`. Las categorías agrupadas como “otros” se excluyen de esta comparación debido a su reducido número de observaciones.

Tipo	Eventos	Media	Mediana	Desv. est.	Mínimo	Máximo
<code>mww</code>	647	6,91	6,80	0,421	6,50	9,10
<code>mwc</code>	390	6,91	6,80	0,425	6,50	8,30
<code>mwb</code>	116	6,79	6,70	0,273	6,50	7,80

Tabla 14. Resumen descriptivo de la magnitud para los tipos de magnitud más frecuentes.

Los tipos `mww` y `mwc` presentan resultados prácticamente equivalentes, ambos con una magnitud media de 6,91 y una mediana de 6,80. Por su parte, `mwb` registra valores ligeramente inferiores y una menor dispersión. Estas diferencias describen la composición del catálogo y no demuestran que un método produzca magnitudes sistemáticamente mayores o menores, ya que los tipos no fueron aplicados simultáneamente a los mismos eventos.

7.1.5.2. Origen de la magnitud

La variable `magSource` identifica la red que elaboró originalmente la magnitud reportada para cada evento, de acuerdo con la documentación de USGS (*USGS Earthquake Hazards Program, s. f.-a*). Sus valores corresponden a códigos de redes, instituciones o catálogos sismológicos, no a países. Por tanto, a diferencia de `magType`, no describe el método de estimación, sino la procedencia institucional del valor de magnitud registrado.

Fuente	Eventos	Porcentaje	Fuente	Eventos	Porcentaje
<code>us</code>	858	72,3 %	<code>ci</code>	2	0,169 %
<code>hrv</code>	185	15,6 %	<code>hv</code>	2	0,169 %
<code>gcmt</code>	112	9,44 %	<code>duputel</code>	1	0,084 %
<code>ak</code>	12	1,01 %	<code>iscgem</code>	1	0,084 %
<code>official</code>	7	0,590 %	<code>nn</code>	1	0,084 %
<code>nc</code>	4	0,337 %	<code>uw</code>	1	0,084 %

Tabla 15. Distribución de eventos según la fuente de magnitud reportada.

La fuente USGS-NEIC (`us`) concentra el 72,3 % de los eventos, seguida por Harvard/Global CMT (`hrv`) con 15,6 % y Global Centroid Moment Tensor Project (`gcmt`) con 9,44 %. En conjunto, estas tres fuentes representan aproximadamente el 97,4 % del catálogo, mientras que las restantes aportan solo el 2,6 %. Esta distribución describe la procedencia de los valores de magnitud y no implica una jerarquía de calidad entre las fuentes; su revisión permite contextualizar posteriormente la relación entre `magSource` y `magType_grupo`.

7.2. Caracterización temporal

7.2.1. Frecuencia temporal de los eventos

Entre 2000 y 2025 se registran 1.186 eventos, equivalentes a un promedio de 45,6 eventos por año. La frecuencia anual alcanza su valor máximo en 2010, con 61 eventos, y su valor mínimo en 2024, con 28 eventos. En términos descriptivos, la serie presenta oscilaciones interanuales alrededor de la media, con un aumento relativo durante la primera parte del período y una disminución posterior desde la mitad del tiempo de observación, sin que ello implique una tendencia sostenida para todo el intervalo.

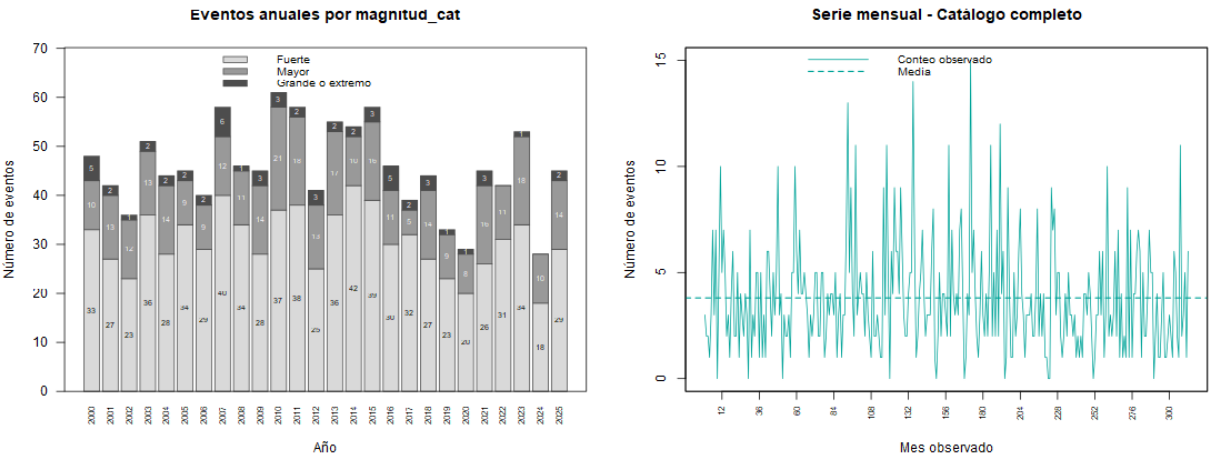


Figura 5. Comportamiento temporal del catálogo completo y composición anual por categoría de magnitud.

La visualización anual refuerza esta lectura: algunos años se ubican por sobre el nivel típico del período, especialmente 2007, 2010, 2011, 2013, 2014 y 2015, mientras que 2019, 2020 y 2024 presentan conteos más bajos. Por ello, la comparación decadal permite una lectura más estable que la revisión año a año.

7.2.2. Composición temporal por categoría de magnitud

Década	Categoría de magnitud	Eventos	Tasa anual
2000	Fuerte	312	31,2
2000	Mayor	117	11,7
2000	Grande o extremo	26	2,6
2010	Fuerte	329	32,9
2010	Mayor	134	13,4
2010	Grande o extremo	26	2,6
2020	Fuerte	158	26,3
2020	Mayor	77	12,8
2020	Grande o extremo	7	1,17

Tabla 16. Conteo y tasa anual promedio por período según categoría de magnitud.

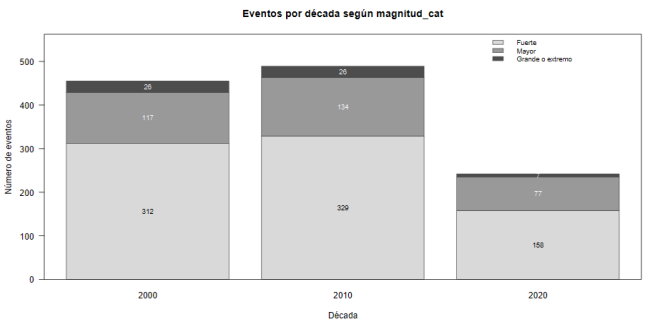


Figura 6. Composición de los eventos por período y categoría de magnitud.

Dado que el período 2020-2025 contiene solo seis años observados, la comparación decadal debe interpretarse mediante tasas anuales promedio y no a partir de conteos absolutos. Bajo este criterio, la década de 2010 presenta la mayor actividad relativa en las categorías “Fuerte” y “Mayor”, con tasas de 32,9 y 13,4 eventos por año, respectivamente. El período 2020-2025 mantiene una tasa de eventos “Mayor” cercana a la observada en 2010, pero muestra una menor tasa anual de eventos “Fuerte” y “Grande o extremo”. En conjunto, la comparación decadal evidencia fluctuaciones en la frecuencia de ocurrencia, sin mostrar un aumento o disminución uniforme en todas las categorías de magnitud.

7.2.3. Recurrencia temporal

Para complementar esta lectura de frecuencia, se analiza la recurrencia temporal global, entendida como el número de días transcurridos entre eventos consecutivos dentro del catálogo. Este análisis permite pasar de los conteos por período a una medida descriptiva del espaciamiento temporal entre eventos. Dado el enfoque categórico adoptado, se calcula la recurrencia tanto para el grupo agregado “Mayor o Grande o extremo”, equivalente a eventos con magnitud igual o superior a 7,0 dentro de la clasificación usada en este informe, como para cada categoría de `magnitud_cat` por separado.

Grupo de análisis	Eventos	Intervalos	Media	Mediana	Q1	Q3	Mín.	Máx.
Mayor o Grande o extremo	387	386	24,5	15,6	5,2	32,8	0,0	177,0
Fuerte	799	798	11,9	7,3	2,6	16,6	0,0	100,0
Mayor	328	327	28,9	19,6	7,2	40,0	0,0	189,0
Grande o extremo	59	58	159,0	123,0	36,5	216,0	0,0	905,0

Tabla 17. Resumen de recurrencia temporal entre eventos consecutivos según grupo de magnitud.

Desde una perspectiva descriptiva, la recurrencia temporal muestra que los eventos de mayor magnitud presentan intervalos más amplios entre ocurrencias consecutivas dentro del catálogo global. El grupo agregado “Mayor o Grande o extremo”, comparable con los eventos desde magnitud 7,0, registra 387 eventos y una mediana de 15,6 días entre eventos consecutivos. Al separar por categorías, los eventos “Mayor” presentan una mediana de 19,6 días, mientras que los eventos “Grande o extremo” muestran una mediana considerablemente mayor, de 123,0 días. Esta diferencia es coherente con la menor frecuencia de los eventos de magnitud más alta dentro del período analizado. Además, la distancia entre media y mediana, especialmente en “Grande o extremo”, sugiere una distribución asimétrica, con algunos períodos prolongados sin eventos de esa categoría. En conjunto, estos resultados describen el espaciamiento temporal de los grandes terremotos en el catálogo global, sin implicar regularidad física ni recurrencia de una falla o zona específica.

7.2.4. Evolución del tipo de magnitud reportado

Además, se revisa la evolución temporal de `magType`, ya que la magnitud reportada por USGS puede provenir de distintos métodos de estimación (*USGS Earthquake Hazards Program, s. f.-d*). Primero se estudia la frecuencia de cada tipo de magnitud y, para evitar categorías con muy pocas observaciones, se construye `magType_grupo`, conservando `mww`, `mwc` y `mwb`, y agrupando el resto como “otros”. Esta decisión permite observar la composición temporal de los métodos principales sin fragmentar el análisis en grupos poco informativos.

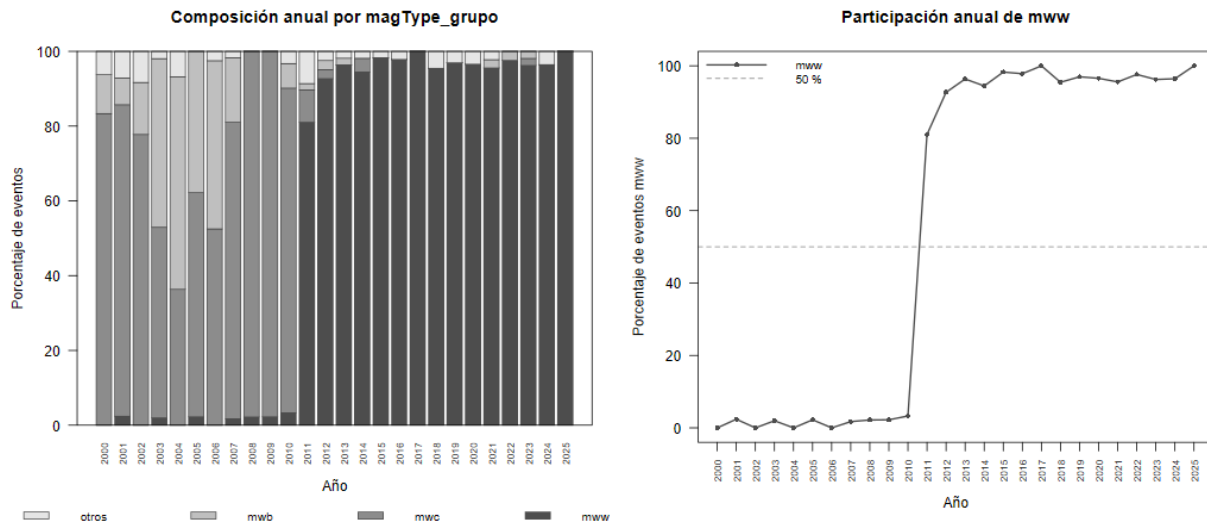


Figura 7. Evolución temporal de la composición por `magType_grupo` y participación anual de `mww`.

La evolución de `magType_grupo` muestra una transición marcada en la composición metodológica del catálogo. Durante la década de 2000 predominan tipos como `mwc` y `mwb`, mientras que desde 2011 aumenta fuertemente la participación de `mww`, que pasa a concentrar la mayor parte de los registros en los años posteriores. Dado que `mww` corresponde a la magnitud autoritativa de USGS cuando está disponible, este cambio sugiere una mayor presencia de un método de estimación más consistente en la segunda parte del período (*USGS Earthquake Hazards Program, s. f.-d*). Por ello, las comparaciones temporales de magnitud deben interpretarse considerando que el tipo de magnitud reportado no es homogéneo a lo largo de todo el catálogo.

7.2.5. Evolución temporal del ajuste RMS

La evolución temporal del ajuste de la localización se examinó mediante la mediana anual de `rms_imp` y su rango intercuartílico. La figura presenta las variaciones anuales, mientras que la tabla resume el nivel y la dispersión del indicador para los períodos 2000-2009, 2010-2019 y 2020-2025.

Período	Eventos	Mediana (s)	RIC (s)
2000-2009	455	1,030	0,920–1,140
2010-2019	489	0,980	0,850–1,120
2020-2025	242	0,745	0,640–0,900

Tabla 18. Resumen del RMS imputado según período.

Dado que la disminución más sostenida del RMS se observa desde 2019, se presentan los estadísticos anuales de este tramo para respaldar los valores destacados en la interpretación. La evolución completa del período se muestra en la figura.

Año	<i>n</i>	Mediana	RIC
2019	33	0,910	0,800–1,080
2020	29	0,850	0,690–1,010
2021	45	0,760	0,640–0,950
2022	42	0,700	0,620–0,853
2023	53	0,720	0,630–0,890
2024	28	0,755	0,640–0,853
2025	45	0,750	0,630–0,830

Tabla 19. RMS imputado anual, 2019-2025 (segundos).

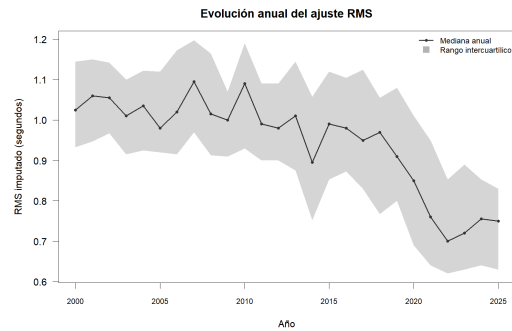


Figura 8. Evolución anual de la mediana y del rango intercuartílico del RMS imputado.

El RMS presenta una disminución temporal. Entre 2000-2009 y 2010-2019, la mediana disminuye de 1,030 a 0,980 segundos. El cambio es más marcado en 2020-2025, cuando alcanza 0,745 segundos. La evolución anual muestra que esta reducción se concentra desde 2019, con un mínimo de 0,700 segundos en 2022 y valores posteriores entre 0,720 y 0,755 segundos. El rango intercuartílico también se desplaza hacia valores menores. Esto indica una mayor concordancia entre los tiempos observados y calculados en los registros recientes, pero no demuestra por sí solo una mejora instrumental ni una mayor precisión de las coordenadas estimadas.

7.3. Caracterización espacial

La caracterización espacial asigna cada evento a una zona sísmica mediante intersección espacial y compara las zonas en frecuencia de ocurrencia, magnitud, profundidad, significancia y condiciones de reporte.

Entre 2000 y 2025, el Cinturón de Fuego concentra 892 eventos, equivalentes al 75,21 % del catálogo y a una tasa de 34,3 eventos por año, muy por sobre el resto de las zonas. El conjunto “Resto del mundo” reúne 203 eventos (17,12 %), mientras que el Cinturón Alpino-Himalayo y la Dorsal Meso-Atlántica registran 63 (5,31 %) y 28 eventos (2,36 %), respectivamente. Esta distribución es coherente con la concentración esperada de los grandes terremotos en el cinturón circumpacífico descrita en los antecedentes.

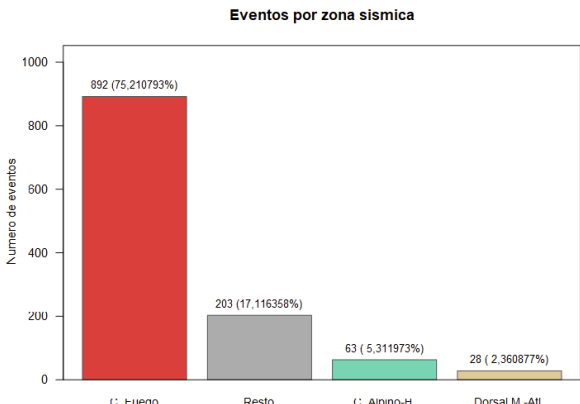


Figura 9. Nro. de eventos y participación % por zona sísmica.

7.3.1. Zona por Magnitud y Profundidad

Los tres cinturones con mayor actividad comparten un nivel de magnitud prácticamente idéntico, con medias en torno a 6,9 y medianas igualmente próximas. La Dorsal Meso-Atlántica es la única que se aparta, con una media menor, de 6,69, y la dispersión más baja del conjunto, de 0,19. En conjunto, estos resultados indican que la diferencia principal entre zonas radica en la frecuencia de ocurrencia y no en el nivel medio de magnitud, aspecto relevante para la pregunta estadística del informe.

Los valores de la profundidad difieren ampliamente entre zonas, desde una profundidad con una desviación estándar de 155,2 km en el Cinturón de Fuego y una desviación estándar de 5,0 km de la Dorsal Meso-Atlántica.

Indicador	C. Fuego	Resto mundo	C. Alp.-Him.	Dorsal M.-Atl.
Eventos	892	203	63	28
% del total	75,21	17,12	5,31	2,36
Tasa anual	34,3	7,8	2,4	1,1
Mag. media	6,90	6,92	6,91	6,69
Mag. mediana	6,80	6,80	6,70	6,60
Mag. desv. est.	0,42	0,42	0,41	0,19
Prof. media (km)	89,6	134,3	45,8	11,0
Prof. mediana (km)	29,4	16,0	16,1	10,0
Prof. desv. est. (km)	155,2	216,9	64,2	5,0

Tabla 20. Frecuencia, magnitud y profundidad de los eventos por zona sísmica.

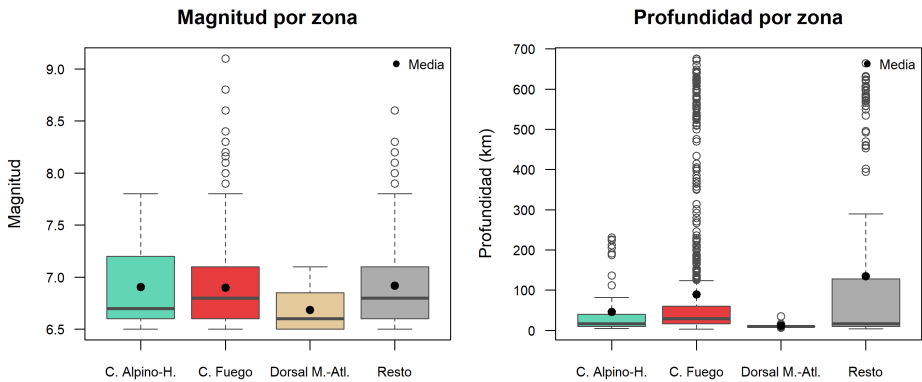


Figura 10. Distribución de magnitud y de profundidad por zona sísmica.

Los diagramas de caja reflejan esta doble situación. En magnitud, las distribuciones de las distintas zonas se superponen, con medianas y rangos intercuartílicos semejantes, mientras que en profundidad se distinguen con claridad: el Cinturón de Fuego presenta numerosos eventos profundos, frente a una Dorsal Meso-Atlántica con una profundidad completamente superficial.

	Cinturón de Fuego	Resto del mundo	C. Alpino-Himalayo	Dorsal M.-Atl.
Q25	6,60	6,60	6,60	6,50
Q50	6,80	6,80	6,70	6,60
Q75	7,10	7,10	7,20	6,82
Q90	7,50	7,60	7,58	6,93
Q95	7,80	7,70	7,70	7,06
Máx	9,10	8,60	7,80	7,10

Tabla 21. Cuantiles y máx. de magnitud por zona.

	Cinturón de Fuego	Resto del mundo	C. Alpino-Himalayo	Dorsal M.-Atl.
Q25	16,4	10,0	10,0	10,0
Q50	29,4	16,0	16,1	10,0
Q75	59,6	128,2	39,6	10,0
Q90	228,9	577,5	176,9	12,8
Q95	555,7	602,7	211,3	15,7
Máx	676,4	664,0	231,0	35,0

Tabla 22. Cuantiles y máx. de profundidad por zona (km).

El comportamiento por cuantiles precisa dónde aparecen las diferencias. En magnitud, los tres cinturones principales coinciden hasta el cuantil 75 y solo difieren en el extremo, donde el Cinturón de Fuego llega a 9,10 y la Dorsal Meso-Atlántica se detiene en 7,10. En profundidad, la separación surge antes: el Cinturón de Fuego y “Resto del mundo” mantienen colas profundas extensas, con cuantiles 95 de 555,7 km y 602,7 km, mientras que el Alpino-Himalayo presenta una cola moderada y la Dorsal Meso-Atlántica permanece plana, con sus cuantiles centrales en 10,0 km.

Zona	Fuerte	Mayor	Grande o extremo
Cinturón de Fuego	66,9	27,8	5,3
Resto del mundo	66,0	29,1	4,9
Cinturón Alpino-Himalayo	68,3	28,6	3,2
Dorsal Meso-Atlántica	89,3	10,7	0,0

Tabla 23. Composición porcentual de los eventos según categoría de magnitud y zona.

Zona	Superficial	Intermedio	Profundo
Cinturón de Fuego	77,1	13,6	9,3
Resto del mundo	71,4	8,9	19,7
Cinturón Alpino-Himalayo	82,5	17,5	0,0
Dorsal Meso-Atlántica	100,0	0,0	0,0

Tabla 24. Composición porcentual de los eventos según categoría de profundidad y zona.

En la composición por magnitud, las primeras tres zonas presentan un reparto casi idéntico: entre 66,0 % y 68,3 % de eventos “Fuerte”, entre 27,8 % y 29,1 % “Mayor” y entre 3,2 % y 5,3 % “Grande o extremo”. La Dorsal Meso-Atlántica es la excepción, con un 89,3 % de eventos “Fuerte” y ninguno en la categoría “Grande o extremo”.

En la composición por profundidad, los eventos superficiales predominan en todas las zonas, pero la proporción de eventos profundos las diferencia. Solo el Cinturón de Fuego (9,3 %) y “Resto del mundo” (19,7 %) registran una proporción apreciable de eventos profundos, mientras que el Cinturón Alpino-Himalayo no presenta ninguno, con un 82,5 % superficial y un 17,5 % intermedio, y la Dorsal Meso-Atlántica es completamente superficial.

7.3.2. Zona por Tipo de Magnitud

El tipo de magnitud (magType) corresponde al método con que la USGS estimó la magnitud de cada evento. El tipo de magnitud se reparte de forma homogénea entre las zonas. En las cuatro, **mw** es el método mayoritario, con participaciones entre 53,9 % y 58,7 %, seguido por **mb**, entre 31,5 % y 39,3 %; los tipos **mb** y “otros” son marginales en todos los casos. Esta homogeneidad indica que la comparación de tipo de magnitud entre zonas no está condicionada por el método de estimación, ya que ninguna franja se apoya en un tipo de magnitud distinto al del resto.

Zona	mw	mb	mb	Otros
Cinturón de Fuego	53,9	32,8	10,0	3,3
Resto del mundo	55,7	31,5	10,8	2,0
Cinturón Alpino-Himalayo	58,7	34,9	6,3	0,0
Dorsal Meso-Atlántica	57,1	39,3	3,6	0,0

Tabla 25. Composición porcentual de los tipos de magnitud reportados por zona.

7.3.3. Zona por Significancia USGS

La significancia USGS es la dimensión donde las zonas se diferencian con mayor claridad. El Cinturón Alpino-Himalayo presenta los valores más altos, con una mediana de 941 y una media de 1209,4, muy por encima del Cinturón de Fuego y de “Resto del mundo”, que coinciden en una mediana de 732, y de la Dorsal Meso-Atlántica, la más baja, con 670. Esta diferencia no proviene de la magnitud, similar entre las franjas en torno a 6,9, sino de los demás componentes de la significancia: los eventos del Cinturón Alpino-Himalayo son mayoritariamente superficiales y se localizan en regiones pobladas, condición que eleva su relevancia según el indicador de la USGS y que ya se reflejaba en el predominio de esta zona entre los diez eventos más significativos del catálogo. Su elevada dispersión, con una desviación estándar de 693,9 frente a 40,4 en la Dorsal Meso-Atlántica, confirma que esa alta significancia se concentra en un grupo de eventos de gran impacto.

Indicador	C. Alpino-H.	C. de Fuego	Dorsal M.-Atl.	Resto
Eventos	63	892	28	203
Media	1209,4	820,1	688,7	831,7
Mediana	941	732	670	732
Desv. est.	693,9	263,3	40,4	298,5
Máximo	2910	2910	779	2333
Magnitud media	6,91	6,90	6,69	6,92

Tabla 26. Significancia USGS por zona.

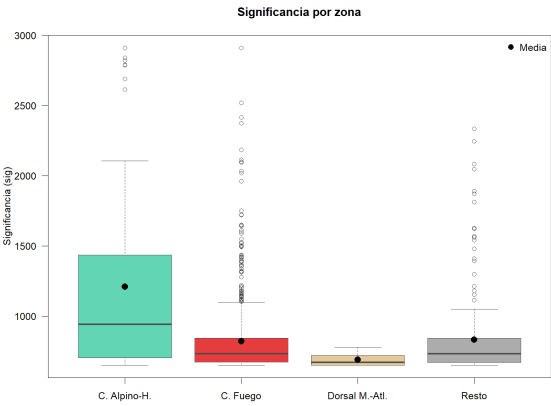


Figura 11. Distribución de la significancia USGS por zona sísmica.

7.3.4. Zona por Caracterización Temporal

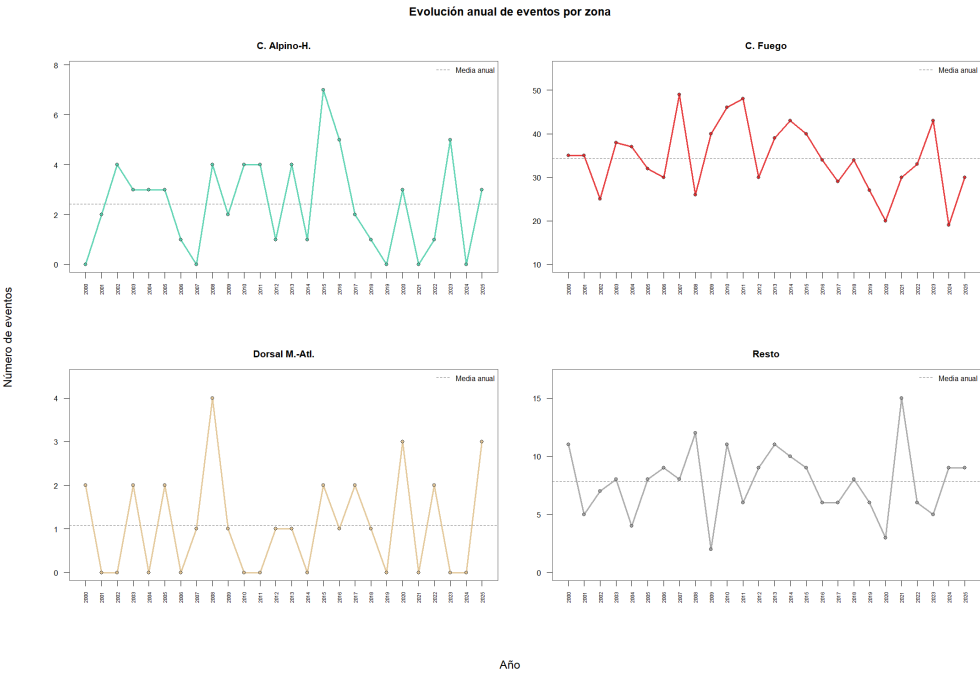


Figura 12. Evolución anual del número de eventos por zona sísmica, 2000-2025.

La evolución anual confirma el dominio del Cinturón de Fuego durante todo el período. Esta zona registra eventos cada año, con un promedio de 34,3 eventos y un mínimo anual de 19 eventos en 2024, que aun así supera el máximo de cualquier otra zona. Su serie fluctúa alrededor de la media, con años altos en 2007, 2010 y 2011 y años bajos en 2020 y 2024, sin una tendencia sostenida. Las demás zonas se mantienen en niveles bajos: “Resto del mundo” aparece todos los años con un promedio de 7,8 eventos, mientras que el Cinturón Alpino-Himalayo, con 2,4 eventos, y la Dorsal Meso-Atlántica, con 1,1, lo hacen de forma intermitente, con años sin registros, en especial la Dorsal, sin eventos en 11 de los 26 años. La diferencia

temporal entre zonas es, por tanto, de nivel y continuidad y no de patrón: el Cinturón de Fuego sostiene la ocurrencia año a año y las demás franjas contribuyen de manera baja o esporádica.

Zona	Media anual	Mín	Máx	Años sin eventos
Cinturón de Fuego	34,3	19	49	0
Resto del mundo	7,8	2	15	0
Cinturón Alpino-Himalayo	2,4	0	7	5
Dorsal Meso-Atlántica	1,1	0	4	11

Tabla 27. Resumen anual de eventos por zona (2000-2025).

7.3.5. Zona por Condiciones de Reporte

Las condiciones de reporte son homogéneas entre las zonas, lo que respalda la comparabilidad de los resultados anteriores. La fuente de magnitud **us** predomina en todas las zonas, con participaciones entre 71,2% y 76,8%. La cobertura instrumental (**nst**) presenta medianas similares en las tres zonas con mayor actividad, en torno a 442 a 454 estaciones, con un valor algo menor en la Dorsal Meso-Atlántica, de 378,5, coherente con su carácter oceánico y alejado; el ajuste de la localización (**rms**) sigue el mismo patrón, con medianas entre 0,94 y 0,97 segundos y un valor de 0,86 en la Dorsal.

En conjunto, las comparaciones de magnitud, profundidad y significancia entre zonas no están condicionadas de forma relevante por diferencias en cobertura instrumental, ajuste del evento o fuente de reporte.

Zona	nst mediana	rms mediana	Fuente us
Cinturón de Fuego	454,0	0,97	71,2 %
Resto del mundo	442,5	0,94	76,8 %
Cinturón Alpino-Himalayo	454,0	0,97	73,0 %
Dorsal Meso-Atlántica	378,5	0,86	75,0 %

Tabla 28. Condiciones de reporte por zona: mediana del número de estaciones (**nst**), mediana del ajuste RMS (en segundos) y participación de la fuente **us**.

7.4. Análisis exploratorio de asociatividad

El análisis exploratorio de asociatividad describe la dirección y la intensidad de las relaciones observadas en el catálogo. Para las variables numéricas se utilizan los coeficientes de Spearman y para las variables categóricas la V de Cramér.

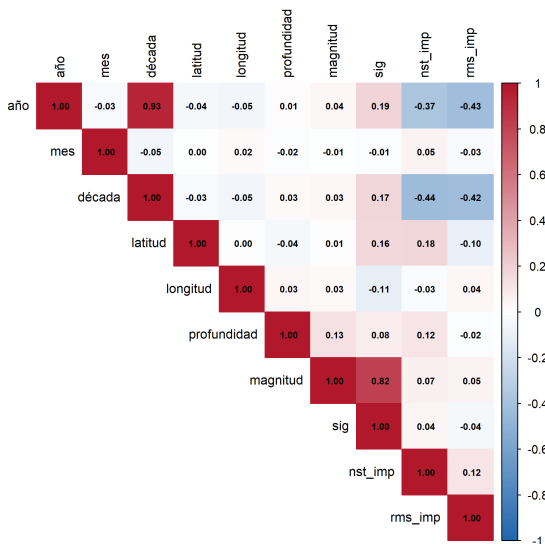


Figura 13. Matriz de correlación de Spearman entre las variables numéricas del catálogo.

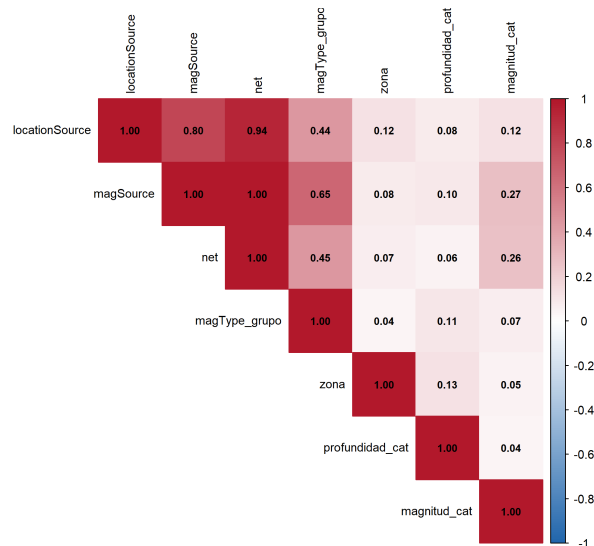


Figura 14. Matriz de asociación entre variables categóricas medida con la V de Cramér.

7.4.1. Asociación entre variables numéricas

La mayoría de las variables numéricas presenta asociaciones débiles. La correlación entre año y década ($\rho = 0,931$) es estructural, porque *decada* deriva de *año*. La principal asociación sustantiva corresponde a magnitud y significancia USGS ($\rho = 0,816$), coherente con la construcción de *sig* (*USGS Earthquake Hazards Program, s. f.-e*).

El año presenta asociaciones negativas moderadas con *rms_imp* ($\rho = -0,429$) y *nst_imp* ($\rho = -0,374$). La segunda requiere mayor cautela porque 402 valores fueron imputados mediante medianas decadales; en *rms_imp* solo se imputaron nueve registros.

Los coeficientes restantes son débiles o corresponden a variables derivadas, cíclicas o espaciales cuya correlación requiere una interpretación limitada. Los valores cercanos a cero no demuestran independencia. La relación entre magnitud y *sig* también se observa en los resúmenes por *magnitud_cat* de la Tabla 9.

7.4.2. Asociación entre variables categóricas

Las asociaciones categóricas más intensas corresponden a la estructura de reporte: *magSource* con *net* ($V = 1,00$), *locationSource* con *net* ($V = 0,94$) y *locationSource* con *magSource* ($V = 0,80$). También se observa una asociación moderada entre *magSource* y *magType_grupo* ($V = 0,65$), por lo que el tipo de magnitud se relaciona con la fuente que lo reporta.

Las asociaciones restantes son, en general, débiles. Las variables de fuente presentan valores inferiores a 0,13 con *zona* y *profundidad_cat*, y la relación entre estas dos últimas también es débil ($V = 0,13$). En consecuencia, las asociaciones principales corresponden a la estructura administrativa del catálogo y no muestran una relación intensa entre las variables geofísicas y las condiciones de reporte. Estos valores no demuestran independencia.

7.5. Supuestos, limitaciones y sensibilidad

El análisis supone que cada registro corresponde a un evento sísmico individual y utiliza como válidos los valores publicados por USGS. Los resultados caracterizan el catálogo analizado, es decir, eventos con magnitud igual o superior a 6,5 registrados entre 2000 y 2025. No representan la totalidad de la actividad sísmica mundial ni permiten establecer causalidad, predicción, peligro o riesgo sísmico.

La comparabilidad temporal y espacial depende de las decisiones de construcción del catálogo: umbral de magnitud, período observado, categorías definidas, delimitación de zonas, fuentes de reporte y métodos de estimación de magnitud. Las magnitudes no fueron homogeneizadas entre *magType*, por lo que parte de las diferencias temporales puede reflejar cambios en la composición del método reportado. Además, el período 2020-2025 contiene solo seis años; por ello, las comparaciones decadales se interpretaron mediante tasas anuales. La recurrencia se calculó como intervalo entre eventos consecutivos del catálogo global y no como recurrencia física de una falla o zona específica.

No se caracterizó la condición de réplica. El catálogo se construyó según la indicación de analizar sismos con magnitud igual o superior a 6,5, sin clasificar eventos principales y réplicas. Incorporar esa distinción requeriría criterios adicionales de secuencia sísmica, ventana temporal y proximidad espacial, lo que modificaría la unidad de análisis definida para este informe.

Las variables *nst* y *rms* se incorporaron como indicadores complementarios de comparabilidad del registro. Sus valores ausentes se imputaron mediante medianas decadales. En *rms*, la imputación afectó solo nueve registros y no modificó de forma relevante sus medidas descriptivas; por tanto, su uso es estable para la caracterización realizada. En *nst*, en cambio, se imputaron 402 valores, por lo que su interpretación temporal requiere mayor cautela. El RMS se interpretó como ajuste de localización, no como medida completa de precisión instrumental o espacial.

Las asociaciones observadas también tienen límites. Spearman resume relaciones monótonas, pero no captura adecuadamente la naturaleza cíclica del mes ni la dependencia espacial de las coordenadas. La V de Cramér describe intensidad de asociación entre categorías, pero valores bajos no prueban independencia. Algunas asociaciones altas responden a relaciones estructurales entre variables derivadas o administrativas.

La sensibilidad se evaluó solo en los aspectos modificados durante el análisis, principalmente el efecto de la imputación del RMS. No se realizó una sensibilidad formal variando el umbral de magnitud, las categorías o los polígonos de zonificación. Por ello, las conclusiones deben interpretarse bajo los criterios metodológicos definidos en este informe.

8. Conclusiones y recomendaciones

El informe caracterizó 1.186 terremotos de magnitud igual o superior a 6,5 registrados por USGS entre 2000 y 2025. Los resultados muestran que la distribución global de estos eventos no es espacialmente uniforme. El Cinturón de Fuego concentra 892 eventos, equivalentes al 75,21 % del catálogo y a una tasa de 34,3 eventos por año, muy por encima del resto de las zonas analizadas. Esta concentración confirma que la principal diferencia espacial observada corresponde a la frecuencia de ocurrencia y continuidad temporal de los eventos, más que al nivel medio de magnitud.

Respecto de la pregunta estadística, el Cinturón Alpino-Himalayo y la Dorsal Meso-Atlántica sí pueden ser usados como zonas de comparación con el Cinturón de Fuego, porque corresponden a cinturones sísmicos definidos y no a un conjunto residual heterogéneo. La comparación muestra que las magnitudes medias son similares entre el Cinturón de Fuego, el Cinturón Alpino-Himalayo y el resto del mundo, con valores cercanos a 6,9; la Dorsal Meso-Atlántica presenta una media menor, de 6,69. La diferencia más clara entre cinturones aparece en la profundidad: el Cinturón de Fuego incluye eventos superficiales, intermedios y profundos; el Cinturón Alpino-Himalayo no registra eventos profundos; y la Dorsal Meso-Atlántica concentra eventos completamente superficiales.

En términos temporales, la serie presenta fluctuaciones interanuales y diferencias entre períodos, pero no un aumento o disminución uniforme de la ocurrencia durante todo el intervalo. Los eventos de mayor magnitud son menos frecuentes y presentan mayores tiempos entre ocurrencias consecutivas: el grupo de magnitud igual o superior a 7,0 registra una mediana de 15,6 días, mientras que los eventos “Grande o extremo” alcanzan una mediana de 123,0 días. Estos intervalos describen el catálogo global y no deben interpretarse como recurrencia física de una falla o zona tectónica específica.

La caracterización de variables de reporte permitió contextualizar la comparabilidad de los resultados. El tipo de magnitud y la fuente de magnitud no muestran diferencias espaciales que invaliden la comparación principal entre zonas. El RMS presenta una disminución temporal, desde una mediana de 1,030 segundos en 2000-2009 a 0,745 segundos en 2020-2025, lo que indica mayor concordancia entre tiempos observados y calculados en registros recientes. Sin embargo, este resultado no demuestra por sí solo una mejora instrumental ni una mayor precisión de las coordenadas. La imputación del RMS tuvo efecto despreciable, mientras que la interpretación de `nst_imp` requiere mayor cautela por la mayor proporción de valores imputados.

Las asociaciones exploratorias refuerzan esta lectura descriptiva. La relación más fuerte entre variables numéricas corresponde a magnitud y significancia USGS, coherente con la construcción del indicador `sig`. Entre variables categóricas, las asociaciones más altas corresponden a variables administrativas o de reporte, como fuente y red. Por tanto, los patrones principales del informe se explican por la estructura espacial, temporal y de reporte del catálogo, sin que el análisis permita establecer causalidad, predicción, peligro sísmico ni independencia poblacional.

Se recomienda que el siguiente informe concentre la etapa inferencial en los hallazgos principales: comparación del vector de medias de magnitud y profundidad entre zonas, evaluación formal de supuestos multivariantes, análisis temporal de conteos y revisión de la comparabilidad del registro. Las extensiones sobre recurrencia, modelos de conteo o categorías de magnitud y profundidad deben aplicarse solo si son viables estadística y computacionalmente, y siempre manteniendo el alcance definido: caracterizar grandes terremotos a nivel mundial bajo el catálogo, umbral, período y zonificación adoptados.

9. Propuesta metodológica para la etapa inferencial

Para el siguiente informe se propone, de manera preliminar, una etapa inferencial orientada a formalizar los patrones descriptivos más relevantes: diferencias espaciales entre zonas, categorías de magnitud

y profundidad, ocurrencia temporal y condiciones de reporte. Las décimas y modelos indicados no constituyen una decisión cerrada; su aplicación quedará sujeta a una evaluación de viabilidad estadística, computacional y metodológica en la siguiente etapa. El eje principal sería la comparación espacial del vector respuesta $\mathbf{Y}_{hi} = (mag_{hi}, depth_{hi})'$, donde h indica zona e i identifica el evento dentro de esa zona. Se codifican las zonas como:

$$1 = \text{C. Fuego}, \quad 2 = \text{Resto}, \quad 3 = \text{C. Alp.-Him.}, \quad 4 = \text{Dorsal M.-Atl.}.$$

Así, $h = 1, \dots, k$, con $k = 4$, e $i = 1, \dots, n_h$, donde n_h es el número de eventos en la zona h . Se considera $\alpha = 0,05$ como nivel base. Para el diagnóstico de supuestos podría usarse además un criterio exploratorio más flexible, por ejemplo $\alpha = 0,10$, dado que la evidencia descriptiva sugiere asimetría y dispersión desigual; esto debe quedar sujeto a evaluación formal.

La propuesta principal se concentra en las décimas asociadas a supuestos multivariantes, comparación del vector de medias y revisión temporal básica. Los demás contrastes se plantean como extensiones metodológicas, respaldadas por el instructivo de la asesoría y por literatura de catálogos sísmicos, pero no constituyen el núcleo obligatorio del siguiente informe (*Instructivo de encargo 2026; Ogata 1988; Kagan y Jackson 2016; Siegel et al. 2024*).

1) Supuestos del modelo multivariante.

Antes de comparar zonas se evaluarían: 1.1) normalidad multivariante mediante Mardia; 1.2) homogeneidad de matrices de varianza-covarianza mediante M-Box, con $H_0 : \Sigma_{\text{Fuego}} = \Sigma_{\text{Resto}} = \Sigma_{\text{Alpino}} = \Sigma_{\text{Dorsal}}$; y 1.3) esfericidad de Bartlett, con $H_0 : |\mathbf{R}| = 1$. Estos resultados definirían si se justifica una ruta paramétrica.

2) Comparación del vector de medias entre zonas.

Si los supuestos son aceptables, se aplicaría MANOVA:

$$H_0 : \mu_{\text{Fuego}} = \mu_{\text{Resto}} = \mu_{\text{Alpino}} = \mu_{\text{Dorsal}} \quad \text{vs} \quad H_1 : \mu_h \neq \mu_{h'} \text{ para algún } h \neq h'.$$

Si los supuestos no se cumplen, se usarían alternativas no paramétricas o robustas; como mínimo, Kruskal-Wallis para `mag` y `depth` por separado, con comparaciones post-hoc si corresponde.

3) Categorías de magnitud y profundidad según zona.

Como extensión, se propone usar chi-cuadrado para contrastar independencia entre `zona` y `magnitud_cat`, y entre `zona` y `profundidad_cat`. La V de Cramér se mantendría como medida de intensidad de asociación.

4) Ocurrencia temporal global y por zona.

Para las series de conteo anual X_t y $X_{h,t}$ se mantiene como propuesta principal la décima de Dickey-Fuller aumentada para revisar estacionariedad:

$$H_0 : \phi = 1 \quad \text{v/s} \quad H_1 : \phi < 1.$$

De forma complementaria, podría considerarse KPSS y la independencia temporal podría evaluarse con Ljung-Box. Como extensión bibliográfica, se podrían usar modelos de conteo para comparar períodos o décadas, considerando que 2020-2025 es un período incompleto (*Instructivo de encargo 2026; Kagan y Jackson 2016*).

5) Recurrencia temporal según categoría de magnitud.

Como extensión bibliográfica, los tiempos entre eventos consecutivos podrían compararse por categoría o umbral de magnitud y contrastarse frente a una distribución exponencial. Ogata entrega la base general de procesos puntuales en sismología, mientras que la aplicación a tiempos entre eventos, modelos Poisson y umbrales de magnitud se vincula de forma más directa con Lombardi y Marzocchi, Kagan y Jackson, y Siegel et al. (*Ogata 1988; Lombardi y Marzocchi 2007; Kagan y Jackson 2016*;

Siegel et al. 2024). Esta propuesta debe mantener la interpretación descriptiva del informe: los intervalos pertenecen al catálogo global y no representan recurrencia física de una falla específica.

6) **Condiciones de reporte y comparabilidad.**

Como control, se propone evaluar si `nst_imp`, `rms_imp`, `magType_grupo` y `magSource` varían entre zonas o períodos. Este eje no busca explicar la sismicidad, sino verificar si las comparaciones principales podrían estar condicionadas por cobertura instrumental, ajuste de localización, método de magnitud o fuente de reporte. Su inclusión se vincula con la importancia de la homogeneidad y completitud de los catálogos sísmicos (*Cabello et al. 2025*; *Wiemer y Wyss 2000*).

10. Referencias

- Ammon, Charles J., Thorne Lay, y David W. Simpson. 2010. «Great Earthquakes and Global Seismic Networks». *Seismological Research Letters* 81 (6): 965-71. <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.6.965>.
- Cabello, Catalina, Gonzalo Montalva, y Felipe Leyton. 2025. «Integrated Seismic Catalog for Chile from 1513 to 2022». *Journal of South American Earth Sciences* 164: 105639. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105639>.
- Gutenberg, B., y C. F. Richter. 1944. «Frequency of Earthquakes in California». *Bulletin of the Seismological Society of America* 34 (4): 185-88.
- Instructivo de encargo. 2026. *Instructivo de encargo: Asesorías 1 y 2*. Universidad de Santiago de Chile.
- Kagan, Yan Y., y David D. Jackson. 2016. «Earthquake Rate and Magnitude Distributions of Great Earthquakes for Use in Global Forecasts». *Geophysical Journal International* 206 (1): 630-43. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw161>.
- Lombardi, Anna Maria, y Warner Marzocchi. 2007. «Evidence of Clustering and Nonstationarity in the Time Distribution of Large Worldwide Earthquakes». *Journal of Geophysical Research* 112: B02303. <https://doi.org/10.1029/2006JB004568>.
- Ogata, Yoshihiko. 1988. «Statistical Models for Earthquake Occurrences and Residual Analysis for Point Processes». *Journal of the American Statistical Association* 83 (401): 9-27. <https://doi.org/10.1080/01621459.1988.10478560>.
- Siegel, Cristián E., Patricio A. Toledo, Raúl Madariaga, y Jaime Campos. 2024. «Scaling of Earthquake Waiting Time Distributions in Northern Chile». *Geophysical Journal International* 236 (3): 1513-25. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad481>.
- USGS. s. f. *Where do earthquakes occur?* Earthquake Hazards Program, Frequently Asked Questions. Accedido 21 de junio de 2026. <https://www.usgs.gov/faqs/where-do-earthquakes-occur>.
- USGS Earthquake Hazards Program. 2025. *Earthquake and Energy Comparisons (Updated 2025)*. U.S. Geological Survey, Multimedia Gallery. <https://www.usgs.gov/media/images/earthquake-and-energy-comparisons-updated-2025>.
- USGS Earthquake Hazards Program. s. f.-a. *ANSS Comprehensive Earthquake Catalog (ComCat) Documentation: magSource*. U.S. Geological Survey. Accedido 26 de junio de 2026. <https://earthquake.usgs.gov/data/comcat/index.php/#magSource>.
- USGS Earthquake Hazards Program. s. f.-b. *ANSS Comprehensive Earthquake Catalog (ComCat) Documentation: rms*. U.S. Geological Survey. Accedido 27 de junio de 2026. <https://earthquake.usgs.gov/data/comcat/index.php/#rms>.
- USGS Earthquake Hazards Program. s. f.-c. *Earthquake Magnitude, Energy Release, and Shaking Intensity*. U.S. Geological Survey. Accedido 29 de junio de 2026. <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/earthquake-magnitude-energy-release-and-shaking-intensity>.
- USGS Earthquake Hazards Program. s. f.-d. *Magnitude Types*. U.S. Geological Survey. Accedido 25 de junio de 2026. <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/magnitude-types>.

- USGS Earthquake Hazards Program. s. f.-e. *Significance Product Documentation*. Product Distribution Layer User Guide. Accedido 26 de junio de 2026. <https://usgs.github.io/pdl/userguide/products/significance.html>.
- Wiemer, Stefan, y Max Wyss. 2000. «Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan». *Bulletin of the Seismological Society of America* 90 (4): 859-69. <https://doi.org/10.1785/0119990114>.

11. Anexos reproducibles

11.1. Descripción de datos y parámetros de descarga

11.1.1. Fuente de datos y parámetros de descarga

La fuente principal de información corresponde al catálogo público de terremotos de la USGS, específicamente el sitio [USGS Earthquake Catalog Search](#). La configuración utilizada se documenta en la siguiente bitácora de descarga.

Parámetro	Valor registrado
Fuente	USGS Earthquake Catalog Search
Formato de descarga	CSV
Archivo crudo conservado	BBDD/query.csv
Fecha de descarga	15/06/2026
Hora de descarga	22:05
Encargo asociado	Análisis global de grandes terremotos
Cobertura geográfica	Mundial (World / Worldwide)
Inicio del período	2000-01-01 00:00:00 UTC
Fin del período	2025-12-31 23:59:59 UTC
Magnitud mínima	$M \geq 6,5$
Magnitud máxima	Sin filtro
Profundidad mínima	Sin filtro
Profundidad máxima	Sin filtro
Estado de revisión	Any
Tipo de evento	Sin filtro específico
Ordenamiento	Time - Oldest First

Tabla 29. Parámetros de descarga registrados para la base principal de análisis.

El formato .CSV se utiliza como base principal del procesamiento estadístico, aunque paralelamente se utiliza un formato .GeoJSON con las mismas características en el software QGIS.

11.1.2. Datos originales

Una vez que los datos se descargan desde USGS según los parámetros indicados en la Tabla 29, el archivo crudo BBDD/query.csv se importa en R y se almacena inicialmente como el objeto **sismos_raw**. Esta base conserva las variables originales entregadas por USGS, sin modificaciones previas, y constituye el punto de partida del proceso de depuración, selección y construcción de variables derivadas. De forma complementaria, se importa BBDD/sig.csv como **sig_raw**, desde donde se incorpora la variable **sig** al objeto **sismos** mediante el identificador **id**.

Las variables originales del catálogo pueden organizarse en distintos grupos según su función:

- Variables de identificación y trazabilidad del evento, como **id**, **net**, **status**, **locationSource** y **magSource**.
- Variables temporales, principalmente **time**, a partir de la cual se construyen fechas, años, meses y décadas.
- Variables espaciales, como **latitude**, **longitude** y **place**, que se utilizan para ubicar los eventos y construir comparaciones geográficas.
- Variables correspondientes a características sísmicas del evento, como **mag**, **magType**, **depth** y **type**.

Además, la base original contiene variables asociadas a la medición instrumental, incertidumbre o calidad del procesamiento, tales como **nst**, **gap**, **dmin**, **rms**, **horizontalError**, **depthError**, **magError** y **magNst**. Estas variables se revisan durante el control de calidad. En el flujo actual se conservan **nst** y **rms** porque aportan información útil sobre cobertura instrumental y ajuste del evento, mientras que el resto de variables auxiliares se mantiene fuera de los análisis principales por su mayor proporción de valores faltantes o por no ser necesarias para responder los objetivos descriptivos del informe.

11.2. Depuración y control de calidad

La depuración de la base tiene como propósito evaluar si los registros provenientes de USGS son adecuados para el análisis descriptivo, temporal y espacial del encargo. El control de calidad considera valores faltantes, duplicados, tipo de evento, estado de revisión, consistencia temporal, consistencia espacial, unidades de medida y cumplimiento del umbral definido sobre **mag**.

El diagnóstico distingue entre variables centrales del análisis y variables auxiliares de **sismos_raw**. Las variables centrales no presentan problemas que obliguen a excluir registros: no se detectan duplicados por **id**, los eventos corresponden al tipo **earthquake**, las fechas se mantienen dentro del período 2000-2025 y las magnitudes cumplen el umbral de descarga definido.

Dentro de las variables auxiliares, **nst** y **rms** se incorporan al flujo actual porque entregan información complementaria sobre cobertura instrumental y calidad del ajuste del evento. **nst** registra el número de estaciones utilizadas o reportadas para localizar el sismo, mientras que **rms** resume el residuo del ajuste de localización. En la base descargada, **nst** presenta 402 valores faltantes de 1.186 registros y **rms** presenta 9 valores faltantes. Por esta razón, ambas variables se conservan en su versión original y, además, se crean **nst_imp** y **rms_imp** mediante imputación por mediana decadal. Esta decisión permite usarlas como indicadores de comparabilidad sin eliminar eventos del catálogo.

El resto de variables auxiliares asociadas a error, incertidumbre o procesamiento instrumental se conserva en la base cruda y no se incorpora a los análisis principales. Esta decisión evita sobrecargar el informe con variables que no son necesarias para los objetivos descriptivos actuales y que presentan patrones de ausencia más complejos.

Estas decisiones delimitan qué variables se conservan en la base analítica **sismos**, cuáles se transforman para el análisis y cuáles permanecen solo como antecedentes de la base cruda.

A partir de esta etapa, el análisis se consolida en el objeto **sismos**, que funciona como base depurada para las etapas posteriores. Este objeto reúne las variables solicitadas en el encargo que superan el control de calidad e incorpora las variables derivadas necesarias para la preparación temporal, la categorización de magnitud y profundidad, y la zonificación espacial. El detalle de su composición, origen y propósito analítico se presenta en la Tabla 30.

Variable	Origen	Descripción breve	Uso en el análisis
id	Original	Identificador único del evento	Control de duplicados y trazabilidad
time	Original	Fecha y hora original reportada por USGS	Base para construir variables temporales
fecha_hora_utc	Derivada	Fecha y hora en formato UTC	Orden temporal y recurrencia
fecha	Derivada	Fecha calendario del evento	Agrupación temporal
año	Derivada	Año del evento	Conteos anuales
mes	Derivada	Mes del evento	Conteos mensuales
decada	Derivada	Década calendario	Comparación decadal
fecha_mes	Derivada temporal	Mes calendario del evento	Serie mensual regular
latitude	Original	Latitud del epicentro	Zonificación espacial
longitude	Original	Longitud del epicentro	Zonificación espacial
depth	Original	Profundidad del evento en kilómetros	Caracterización descriptiva y espacial
profundidad_cat	Derivada	Categoría de profundidad	Comparación por profundidad
mag	Original	Magnitud reportada por USGS	Variable sísmica principal
magnitud_cat	Derivada	Categoría de magnitud: Fuerte, Mayor, Grande o extremo	Composición temporal, recurrencia y resultados
magType	Original	Tipo o método de magnitud reportado	Revisión metodológica de magnitud
magType_grupo	Derivada	Agrupación de magType : mww , mwc , mwb y otros	Evolución temporal y comparabilidad
magSource	Original	Fuente que reporta la magnitud	Comparabilidad de la medición
sig	Original complementaria	Indicador de significancia de USGS incorporado desde sig_raw	Caracterización complementaria
place	Original	Descripción geográfica del evento	Contexto espacial
type	Original	Tipo de evento	Control de eventos no tectónicos
status	Original	Estado de revisión del registro	Control de calidad
net	Original	Red que reporta el evento	Trazabilidad de fuente
locationSource	Original	Fuente de localización	Trazabilidad espacial
nst	Original	Número de estaciones reportadas	Indicador instrumental

Variable	Origen	Descripción breve	Uso en el análisis
<code>rms</code>	Original	Residuo RMS del ajuste	Indicador de calidad del ajuste
<code>nst_imp</code>	Derivada	<code>nst</code> imputada por mediana decadal	Comparabilidad instrumental
<code>rms_imp</code>	Derivada	<code>rms</code> imputada por mediana decadal	Comparabilidad del ajuste
<code>zona</code>	Derivada espacial	Zona sísmica asignada por intersección espacial	Comparación espacial

Tabla 30. Variables consideradas en la depuración, control de calidad y análisis estadístico.

11.3. Flujo de trabajo e implementación computacional

11.3.1. Positron y Código.R

El procesamiento estadístico se desarrolla en Positron mediante scripts de R organizados dentro del proyecto `USGS-earthquake-analysis`. Este entorno permite ejecutar de forma secuencial la importación de datos, depuración, construcción de variables derivadas y análisis descriptivo, temporal y espacial, manteniendo visibles los objetos generados y las salidas de consola para su revisión.

El análisis se organiza en torno al script principal `Código.R`, que centraliza la carga de paquetes, la importación de `sismos_raw` desde `BBDD/query.csv`, la importación de `sig_raw` desde `BBDD/sig.csv`, la unión de ambas fuentes mediante `id` y la preparación de la base analítica `sismos`. En esta etapa se construyen las variables temporales (`fecha_hora_utc`, `fecha`, `año`, `mes` y `decada`), las categorías `profundidad_cat` y `magnitud_cat`, y la agrupación `magType_grupo`.

La separación del código responde a una decisión operativa del equipo: cada script aborda una etapa específica del análisis, lo que permite revisar, depurar y modificar componentes particulares sin alterar todo el flujo de trabajo. Esta estructura también facilita el trabajo colaborativo, ya que permite avanzar sobre módulos distintos manteniendo un punto común de ejecución.

El proyecto se respaldó mediante control de versiones con Git desde Positron y un repositorio de GitHub. La rama `main` concentra la versión consolidada del trabajo, incluyendo bases de datos, scripts, bibliografía, recursos geográficos, informe, dashboard y mapa interactivo. Los commits permitieron registrar cambios, ordenar los insumos y productos derivados, y mantener trazabilidad del desarrollo computacional y documental.

La organización principal del flujo reproducible se resume en la Tabla 31.

Script	Propósito principal
<code>Código.R</code>	Ejecuta el flujo principal, carga librerías, importa las bases, une <code>sig_raw</code> con <code>sismos_raw</code> , prepara <code>sismos</code> y llama secuencialmente a los scripts posteriores.
<code>01_tratamiento_NAs.R</code>	Imputa <code>nst</code> y <code>rms</code> por mediana decadal para construir <code>nst_imp</code> y <code>rms_imp</code> .
<code>02_analisis_descriptivo.R</code>	Desarrolla la caracterización descriptiva general inicial.
<code>03_analisis_temporal.R</code>	Desarrolla el análisis temporal con catálogo completo, <code>magnitud_cat</code> y <code>magType_grupo</code> .
<code>04_analisis_espacial.R</code>	Construye <code>zona</code> y reúne la caracterización espacial final usada en el informe.
<code>02.1_analisis_descriptivo_significancia.R</code>	Profundiza el análisis descriptivo de <code>sig</code> ; se ejecuta después de <code>04_analisis_espacial.R</code> porque utiliza <code>zona</code> .
<code>02.2_analisis_descriptivo_categoricas.R</code>	Revisa <code>magType</code> , <code>magSource</code> y categorías analíticas; se ejecuta después de <code>04_analisis_espacial.R</code> porque utiliza <code>zona</code> .
<code>05_analisis_asociatividad.R</code>	Explora asociaciones entre variables numéricas y categóricas.

Tabla 31. Scripts principales del flujo reproducible y propósito de cada módulo.

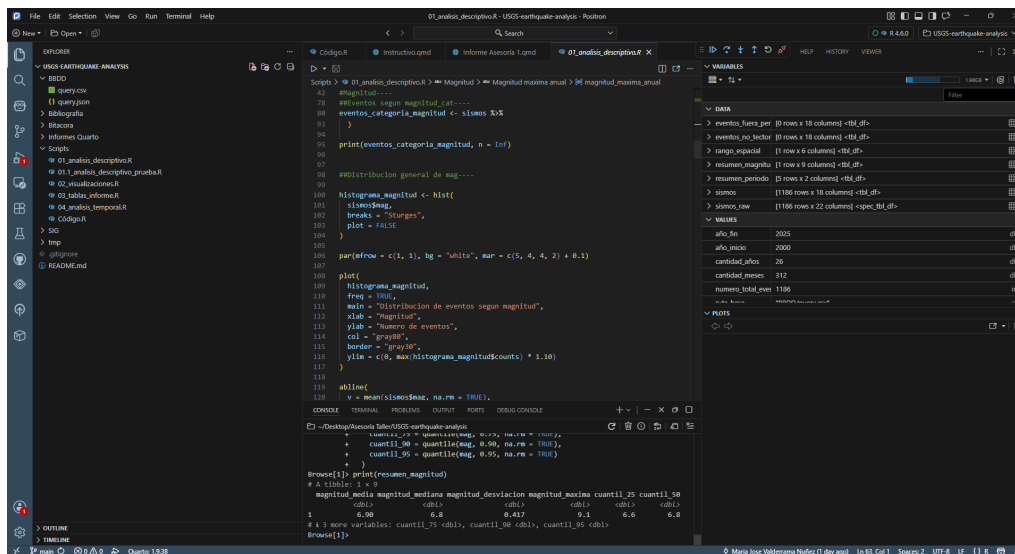


Figura 15. Entorno de trabajo en Positron utilizado para ejecutar los scripts de R y revisar las salidas del análisis estadístico.

11.3.2. QGIS y capas geográficas

En QGIS se trabaja con la base georreferenciada y las capas de referencia tectónica para delimitar visualmente los polígonos asociados al Cinturón de Fuego, la Dorsal Meso-Atlántica y el Cinturón Alpino-Himalayo. Esta implementación permite revisar la correspondencia espacial entre los eventos del catálogo, las coordenadas utilizadas y las zonas empleadas posteriormente en la variable **zona**.

La capa de zonas se guarda en `SIG/area_regiones.geojson` y luego se utiliza en R mediante `st_read()`. En el script descriptivo, los eventos se transforman a puntos espaciales con `st_as_sf()`, se ajustan al sistema de referencia de la capa y se asignan a una zona mediante `st_join()` con `st_intersects()`. Cuando un evento no intersecta los polígonos definidos, se clasifica como “Resto del mundo”.

Este flujo conecta la revisión cartográfica de QGIS con el análisis estadístico en R: QGIS permite construir y verificar la delimitación espacial, mientras que R aplica esa delimitación a cada evento del catálogo para generar la variable **zona**. La variable **sig**, en cambio, se incorpora al objeto **sismos** desde `BBDD/sig.csv` durante la preparación en `Código.R`; por ello se documenta como una fuente complementaria de USGS unida por **id**, no como una variable producida por la intersección espacial.

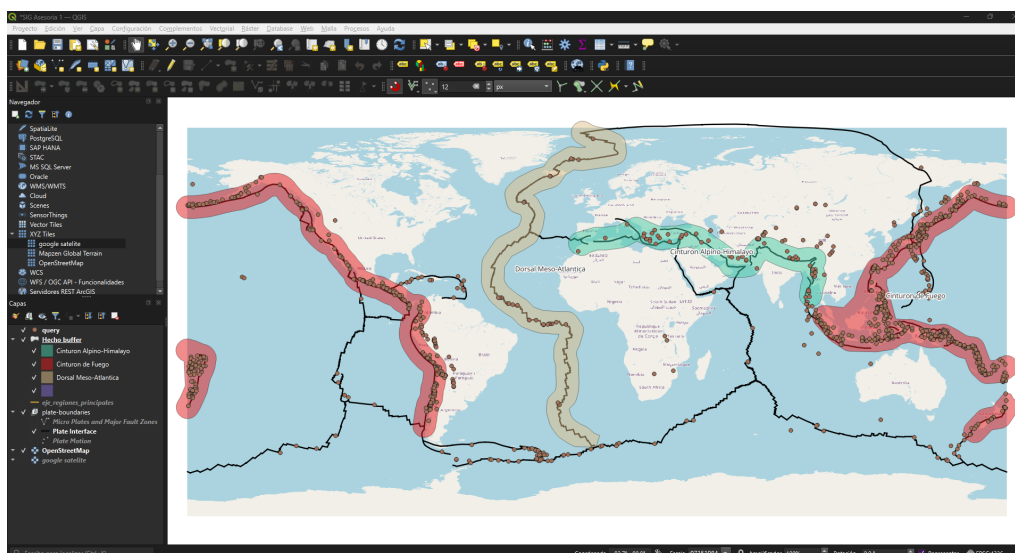


Figura 16. Implementación en QGIS utilizada para delimitar y verificar las zonas sísmicas globales a partir de capas geográficas, límites de placas y eventos del catálogo.

11.3.3. Declaración ampliada de uso de inteligencia artificial

- ☒ El equipo declara que sí utilizó herramientas de Inteligencia Artificial Generativa durante el desarrollo de esta asesoría, según se detalla a continuación:

Herramienta utilizada	Fecha aproximada de uso	Propósito del uso	Sección o producto asociado	Tipo de apoyo recibido	Verificación realizada por el equipo
NotebookLM	junio 2026	Apoyo para la lectura en español de bibliografía en inglés.	Antecedentes y revisión bibliográfica.	Traducción y apoyo de lectura.	Lectura de las fuentes originales y selección manual de la bibliografía.
Extensión de ChatGPT en Positron	junio 2026	Generación inicial de una plantilla QMD con la estructura del informe.	Estructura general del archivo QMD.	Propuesta de secciones y organización documental.	Revisión, modificación y completado manual de toda la estructura.
Claude Code	junio 2026	Implementación Interactiva de Dashboard y Mapas georreferenciados.	Dashboard Interactivo y Mapa Interactivo.	Estructuración de código (Solo en términos de implementación), depuración y resolución de errores.	Ejecución en Positron y QGIS, relleno manual de resultados extraídos del informe final.
Extensión de ChatGPT en Positron	junio 2026	Conversión de fuentes al formato académico y vinculación de hipervínculos.	Archivo referencias.bib , citas y enlaces.	Formato BibTeX, sintaxis y vinculación documental.	Comprobación manual de autores, títulos, fechas, DOI, URL y correspondencia con la fuente original.
Extensión de ChatGPT en Positron	junio 2026	Sugerencia de código para graficar y corregir puntualmente gráficos y tablas.	Figuras, tablas LaTeX y maquetación del informe.	Ajustes de código, dimensiones, etiquetas y disposición visual.	Ejecución del código, comparación con los datos y revisión visual de cada producto.
Extensión de ChatGPT en Positron	junio 2026	Revisión posterior de ortografía, vocabulario, coherencia y redundancia.	Prototipos avanzados y versión final del informe.	Sugerencias editoriales y detección de inconsistencias formales.	Lectura crítica, aceptación o rechazo manual de cada sugerencia.

Tabla 32. Declaración detallada de herramientas de inteligencia artificial utilizadas durante la asesoría.

11.3.3.1. Detalle aclaratorio del uso

NotebookLM se empleó como apoyo para la lectura en español de bibliografía en inglés, mientras que la extensión de ChatGPT en Positron se utilizó en tareas de programación, organización documental y revisión formal. La selección de fuentes, la construcción del análisis, la interpretación de los resultados y las decisiones finales permanecieron bajo responsabilidad del equipo.

La implementación interactiva del dashboard y del mapa georreferenciado se realizó con apoyo de Claude Code. Este uso se justifica porque la construcción de productos interactivos corresponde principalmente a una tarea de implementación computacional, más cercana a competencias de desarrollo informático que al análisis estadístico propiamente tal. En este caso, la IA se utilizó para estructurar código, resolver errores puntuales y ajustar la interacción de los productos. No se empleó para realizar cálculos estadísticos, modificar resultados ni definir interpretaciones. Todo el código fue ejecutado y revisado por el equipo.

La bibliografía fue localizada y seleccionada manualmente; la IA apoyó su conversión al formato académico de `referencias.bib` y la vinculación de citas, frases e hipervínculos. También se utilizó en una etapa inicial para generar una plantilla QMD con la estructura general del informe, posteriormente completada y modificada por el equipo, y para realizar correcciones puntuales de gráficos. Una vez elaborados los prototipos del informe, se solicitaron revisiones ortográficas, de vocabulario, coherencia formal y disposición visual de tablas LaTeX. Estos apoyos funcionaron como control editorial posterior y no sustituyeron la redacción, evaluación crítica ni aprobación de los integrantes.

El uso responsable se basó en trazabilidad, revisión humana, contraste con los datos originales y ejecución reproducible del código. El equipo verificó las referencias, enlaces, tablas, gráficos y productos computacionales antes de incorporarlos al informe.

El equipo declara que todos los análisis, resultados, interpretaciones, conclusiones, códigos y referencias incluidos en este informe fueron revisados críticamente por sus integrantes. Asimismo, declara que asume plena responsabilidad por la exactitud, reproducibilidad y pertinencia profesional del trabajo presentado.

11.4. Zonas sísmicas globales

Este anexo amplía el marco conceptual presentado en la Sección 3.1 y documenta la descripción de los tres grandes cinturones sísmicos que sustentan la comparación espacial del informe, según la página *Where do earthquakes occur?* de USGS (*USGS, s. f.*).

El primer cinturón, y el más importante, es el **cinturón sísmico circumpacífico**, que se extiende a lo largo del borde del océano Pacífico y concentra cerca del 81 % de los terremotos más grandes del planeta, razón por la cual se le conoce como “Cinturón de Fuego”. Su actividad se asocia a los límites de placas tectónicas, donde placas de corteza mayoritariamente oceánica se hunden o subducen bajo otra placa; en estas zonas de subducción los sismos se originan por el deslizamiento entre placas y por la ruptura en su interior. Entre sus eventos se cuentan el terremoto de Valdivia de 1960 ($M 9,5$) y el terremoto de Alaska de 1964 ($M 9,2$) (*USGS, s. f.*).

El segundo es el **cinturón Alpino** o Alpino-Himalayo, que se prolonga desde Java y Sumatra a través del Himalaya y el Mediterráneo hasta el Atlántico, y reúne aproximadamente el 17 % de los grandes terremotos del mundo, incluidos algunos de los más destructivos, como el sismo de Pakistán de 2005 ($M 7,6$), que provocó más de 80.000 víctimas, y el terremoto de Indonesia de 2004 ($M 9,1$), cuyo tsunami causó más de 230.000 muertes (*USGS, s. f.*).

El tercer cinturón sigue el trazado sumergido de la **Dorsal Meso-Atlántica**, donde dos placas tectónicas se separan, configurando un límite divergente. Gran parte de esta dorsal se encuentra a gran profundidad bajo el océano y alejada de los centros poblados; no obstante, Islandia, situada directamente sobre ella, ha registrado sismos de hasta $M 6,9$ (*USGS, s. f.*).

El resto de los eventos se distribuye de manera dispersa en distintas regiones del planeta. Aunque la sismicidad relevante se concentra en los cinturones descritos, también pueden ocurrir terremotos dañinos fuera de ellos, habitualmente separados por largos períodos de tiempo (*USGS, s. f.*). Esta condición justifica la categoría residual “Resto del mundo” empleada en la comparación espacial.

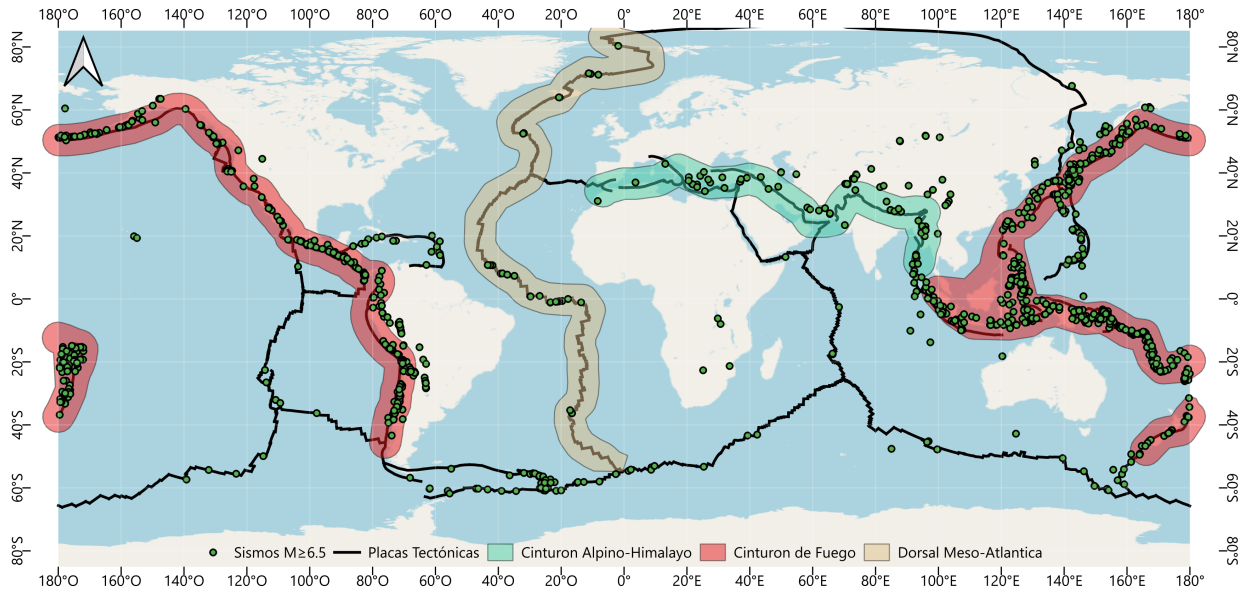


Figura 17. Verificación en QGIS de los eventos y las zonas utilizadas para la comparación espacial.

11.5. Caracterización descriptiva

Este anexo no reproduce los resultados descriptivos presentados en el cuerpo del informe. Su función es precisar los criterios externos y operativos usados para construir las variables categóricas que luego sostienen las comparaciones temporales y espaciales.

La variable `magnitud_cat` se construye a partir de la magnitud `mag` reportada por USGS. Los puntos de corte se apoyan en la literatura revisada sobre grandes terremotos: magnitudes cercanas o superiores a $M \geq 7,0$ se usan como referencia para distinguir terremotos mayores, mientras que valores próximos a $M \geq 7,8$ permiten separar eventos grandes o extremos dentro de catálogos globales de alta magnitud (*Gutenberg y Richter 1944; Kagan y Jackson 2016; Ammon et al. 2010*). En el código, esta decisión se operacionaliza como “Fuerte” para $6,5 \leq M < 7,0$, “Mayor” para $7,0 \leq M < 7,8$ y “Grande o extremo” para $M \geq 7,8$.

La variable `profundidad_cat` se utiliza para ordenar la profundidad focal en tres niveles interpretables: “Superficial”, “Intermedio” y “Profundo”. En el código, los eventos se clasifican como “Superficial” entre 0 y 70 km, “Intermedio” entre más de 70 y 300 km, y “Profundo” sobre 300 km. Esta categorización no reemplaza el valor continuo de `depth`, sino que permite comparar de forma sintética la composición del catálogo entre zonas y períodos.

Finalmente, la revisión de `magType` cumple una función de trazabilidad metodológica. La magnitud reportada por USGS puede provenir de distintos métodos o escalas de estimación (*USGS Earthquake Hazards Program, s. f.-d*), por lo que las comparaciones descriptivas se interpretan sobre los valores reportados, sin homogeneizar retrospectivamente las escalas de magnitud. Esta precaución es especialmente relevante para la lectura temporal, donde se analiza la transición en los tipos de magnitud reportados.

11.5.1. Definición y tratamiento del RMS

El RMS corresponde a la raíz del promedio ponderado de los residuos cuadrados entre los tiempos de llegada observados y los calculados por el modelo de localización (*USGS Earthquake Hazards Program, s. f.-b*):

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i (t_i^{obs} - t_i^{calc})^2}{\sum_{i=1}^n w_i}},$$

donde t_i^{obs} y t_i^{calc} son los tiempos de llegada observado y calculado para la observación i , y w_i es su ponderación. Un valor menor indica mayor concordancia entre ambos tiempos. El indicador se obtuvo directamente del catálogo USGS y no se recalculó porque la base no contiene los tiempos de llegada ni sus ponderaciones individuales.

Los valores faltantes se completaron mediante la mediana del RMS de la década del evento:

$$rms_imp_i = \begin{cases} rms_i, & \text{si } rms_i \text{ está observado,} \\ \text{Mediana}(rms_j \mid decada_j = decada_i), & \text{si } rms_i \text{ está ausente.} \end{cases}$$

La mediana se utilizó por su resistencia a valores extremos y la agrupación decadal para conservar diferencias temporales generales. Para comprobar que el procedimiento no modificara sustantivamente la distribución, `rms` y `rms_imp` se compararon mediante número de observaciones, media, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo y cuantiles 25, 75, 90 y 95.

11.6. Caracterización temporal

La comparación decadal debe leerse mediante tasas anuales promedio, porque el tramo 2020-2025 no corresponde a una década completa. Por ello, sus conteos acumulados no son directamente equivalentes a los de 2000-2009 y 2010-2019.

La recurrencia temporal reportada corresponde al espaciamiento entre eventos consecutivos dentro del catálogo global. No representa la recurrencia física de una falla, zona de subducción o región específica, por lo que no debe interpretarse como predicción ni como estimación de amenaza sísmica local.

La evolución de `magType` se interpreta considerando la documentación de USGS sobre tipos de magnitud (*USGS Earthquake Hazards Program, s. f.-d*). Esta referencia permite contextualizar la transición observada hacia `mw`, sin asumir que todo el período fue medido de forma homogénea.

La evolución temporal del RMS se interpreta como una descripción del ajuste de localización reportado en el catálogo. La disminución observada en años recientes indica menor residuo entre tiempos observados y calculados, pero no demuestra por sí sola una mejora instrumental ni una mayor precisión de las coordenadas. Su lectura debe mantenerse como indicador de comparabilidad del registro.

11.7. Caracterización espacial

Este anexo documenta las decisiones metodológicas que sustentan la comparación espacial.

La primera decisión corresponde a la definición de `zona`. Los eventos se transforman en puntos espaciales con `st_as_sf`, usando `longitude`, `latitude` y EPSG:4326. Luego se ajustan al sistema de referencia de `area_regiones.geojson` con `st_transform`. La asignación se realiza con `st_join` y `st_intersects`: si el punto intersecta un polígono, recibe su región; si no intersecta ninguno, se clasifica como “Resto del mundo”.

La segunda decisión corresponde a mantener “Resto del mundo” como categoría explícita. Esta categoría no representa una zona tectónica homogénea. Se conserva para cerrar el total del catálogo y separar los eventos fuera de los tres polígonos principales.

La tercera decisión corresponde a completar con cero las combinaciones sin eventos. Esto mantiene comparables los resúmenes por zona, especialmente los conteos anuales y los cruces con `profundidad_cat`.

La cuarta decisión corresponde a incorporar indicadores de comparabilidad del registro. Para ello se resumen `nst_imp`, `rms_imp`, `magType_grupo` y `magSource` por zona. `nst_imp` y `rms_imp` provienen del tratamiento de valores faltantes mediante imputación por mediana decadal. Se usan para revisar cobertura instrumental y ajuste del evento sin excluir registros. `magType_grupo` y `magSource` permiten revisar tipo de magnitud y fuente dominante por zona.

Estos indicadores son apoyo interpretativo. No modifican conteos, tasas, magnitudes ni profundidades por zona; solo documentan condiciones que pueden afectar la comparación espacial.

11.8. Acta de reunión y propuestas no incorporadas

El lunes 22 de junio de 2026, a las 16:50 horas, el grupo **Tetrametric** sostuvo una reunión con los profesores responsables del tema. Durante esta instancia se formularon observaciones orientadas a mejorar el informe y se propusieron nuevos tópicos de estudio. La mayoría de estas recomendaciones fue acogida e incorporada al trabajo. Sin embargo, las siguientes propuestas no fueron desarrolladas en esta etapa:

- **Segmentación de eventos no tectónicos:** se propuso distinguir los terremotos de otros eventos, como ensayos nucleares y explosiones. Como referencia complementaria, la USGS presenta una comparación entre la energía liberada por los terremotos y la asociada a otros eventos naturales y de origen humano (*USGS Earthquake Hazards Program 2025*). Este análisis no se realizó porque la variable `type`, encargada de identificar el tipo de evento, presenta exclusivamente la categoría `earthquake` en la base estudiada. Por tanto, no existen otras categorías que puedan segmentarse o compararse.
- **Aplicación de la ley de Omori-Utsu:** se sugirió analizar la relación temporal entre los sismos principales y sus réplicas, considerando el tiempo transcurrido y la cantidad de réplicas relevantes. Este análisis quedó fuera del alcance metodológico, dado que el catálogo estudiado considera únicamente eventos de magnitud igual o superior a 6,5. Este umbral excluye gran parte de las réplicas de menor magnitud necesarias para aplicar apropiadamente este enfoque.
- **Influencia de las tormentas solares:** se planteó explorar una posible relación entre la actividad solar y la ocurrencia de terremotos. La propuesta no se incorporó porque no se encuentra alineada con la pregunta de investigación ni con el alcance definido para este informe. Además, la base de datos no contiene variables relativas a la actividad solar, por lo que su desarrollo habría requerido integrar fuentes externas y adoptar un diseño metodológico diferente.