



**ANÁLISIS ESPACIO - TEMPORAL DE SISMOS TECTÓNICOS
OCURRIDOS EN COLOMBIA EN EL PERIODO 1990 – 2017**

RICARDO VELASCO MALAGÓN

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
SANTIAGO DE CALI
2019**



ANÁLISIS ESPACIO - TEMPORAL DE SISMOS TECTÓNICOS OCURRIDOS EN COLOMBIA EN EL PERIODO 1990 – 2017

RICARDO VELASCO MALAGÓN

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Topográfico**

DIRECTOR:

MSc. David Arango Londoño

CODIRECTOR:

Dr. Daniel Cuartas Arroyave

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

INGENIERÍA TOPOGRÁFICA

SANTIAGO DE CALI

2019

Nota de aceptación

Director

Codirector

Jurado

Jurado

Agradecimientos

En primer lugar, a Dios, por siempre estar a mi lado sin importar todos los errores cometidos, dándome una nueva oportunidad para hacer las cosas de la mejor manera.

A toda mi familia, por la paciencia y por todo el amor que me brindaron en los momentos que más lo necesite.

A mi novia por su compañía, gracias por confiar en mí y por darme fuerzas para afrontar las dificultades.

Por último, a los profesores David y Daniel por guiarme en la elaboración de este documento.

Resumen

Se analiza el fenómeno de los sismos ocurridos durante el periodo 1990 – 2017 en Colombia, utilizando las metodologías de patrones puntuales espaciales. A partir de la ubicación espacial, el mes y el año de ocurrencia de cada sismo se estimó la intensidad y las funciones K y de correlación por pares (g), con sus respectivas bandas de bondad; las cuales ratifican el patrón puntual agregado como el representante de los sismos. La estimación de la intensidad para todos los años de análisis, permitió identificar los departamentos de Santander y Valle del Cauca como zonas de alta actividad sísmica en Colombia. Finalmente, se realizó un análisis de los sismos por su magnitud y profundidad.

Palabras clave: sismo, patrón puntual, intensidad, distancia euclidiana.

Summary

The phenomenon of earthquakes occurred during the period 1990 - 2017 in Colombia is analyzed, using the methodologies of spatial point patterns. From the spatial location, the month and the year of occurrence of each earthquake, the intensity and the K functions and of correlation by pairs (g) were estimated, with their respective bands of goodness; which ratify the aggregate point pattern as the representative of the earthquakes. The estimation of the intensity for all the years of analysis, allowed to identify the departments of Santander and Valle del Cauca as zones of high seismic activity in Colombia. Finally, an analysis of the earthquakes was carried out due to its magnitude and depth.

Keywords: earthquake, point pattern, intensity, Euclidean distance.

TABLA DE CONTENIDO

Agradecimientos	II
Resumen	III
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
3. OBJETIVOS	3
3.1. OBJETIVO GENERAL	3
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
4. JUSTIFICACIÓN	3
5. MARCO DE REFERENCIA.....	4
5.1. ANTECEDENTES	4
5.2. MARCO CONCEPTUAL	11
5.3. MARCO TEÓRICO	16
6. METODOLOGÍA.....	22
6.1. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN	22
6.2. ANÁLISIS ESPACIAL.....	25
6.3. ANÁLISIS TEMPORAL	27
6.4. ANÁLISIS POR MAGNITUD Y PROFUNDIDAD	28
7. RESULTADOS	28
7.1. CATÁLOGO SÍSMICO	28
7.2. MAGNITUD MÍNIMA DE COMPLETITUD	31
7.3. ANÁLISIS ESPACIAL.....	32
7.4. ANÁLISIS TEMPORAL	42
7.5. ANÁLISIS POR MAGNITUD	45
7.6. ANÁLISIS POR PROFUNDIDAD	47
8. CONCLUSIONES.....	49
9. RECOMENDACIONES	50
10. BIBLIOGRAFÍA.....	51
11. ANEXOS	55
11.1. CÓDIGO EN R	55
11.2. CATÁLOGO SÍSMICO HOMEGENIZADO Y DEPURADO.....	56
11.3. FRECUENCIA DE LOS SISMOS.....	67

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de Patrones Puntuales.....	14
Figura 2. Ejemplo de serie estacionaria.....	15
Figura 3. Ejemplo de serie evolutiva.....	16
Figura 4. Ejemplo del cálculo de M_c por el método MAXC.....	19
Figura 5. Zona de estudio: República de Colombia.....	22
Figura 6. Región geográfica seleccionada.....	23

Figura 7. A. Representación espacial de los eventos del catálogo sísmico descargado de NEIC. B. Eventos interceptados por la zona de estudio.	28
Figura 8. Representación espacial de los 808 eventos del catálogo depurado.	30
Figura 9. Número de sismos acumulados en el tiempo entre 1990 y 2017.	30
Figura 10. Gráfico de la distribución frecuencia- magnitud para el catálogo sísmico depurado.	31
Figura 11. A. Valor de a calculado en el área de estudio. B. Valor de b calculado en el área de estudio.	32
Figura 12. Patrón puntual de los sismos en Colombia ocurridos en 1990 - 2017.	32
Figura 13. A. Frecuencia de sismos por año. B. Frecuencia de sismos por mes. C. Frecuencia de sismos por día. D. Frecuencia de sismos por hora.	33
Figura 14. Serie de tiempo sísmica.	34
Figura 15. ACF y PACF de la serie de tiempo.	34
Figura 16. Descomposición aditiva de la serie de tiempo sísmica.	35
Figura 17. Frecuencia de los sismos en función de la magnitud.	36
Figura 18. Frecuencia de los sismos en función de la profundidad.	37
Figura 19. Conteo por cuadrantes.	38
Figura 20. Gráfico de Patterson - Fry de los sismos.	38
Figura 21. Estimación de la intensidad espacial.	39
Figura 22. Conteo por cuadrantes de colores.	39
Figura 23. Superficie de la intensidad.	40
Figura 24. Estimación de la K- función de los eventos sísmicos.	40
Figura 25. Estimación de la función pair correlation (g).	41
Figura 26. Bandas de confianza para la k – función y la función pair correlation (g).	41
Figura 27. Comportamiento espacial de los sismos ocurridos entre 1990 - 2017.	42
A. Patrón puntual. B. Conteo por cuadrantes. C. Intensidad.	42
Figura 28. Intensidad temporal y espacial de los sismos.	42
Figura 29. Intensidad espacial para cada año de ocurrencia sísmica.	44
Figura 30. Comportamiento espacial de los sismos leves ocurridos entre 1990 - 2017.	45
Figura 31. Comportamiento espacial de los sismos moderados ocurridos entre 1990 2017.	45
Figura 32. Comportamiento espacial de los sismos fuertes ocurridos entre 1990 2017.	46
Figura 33. Comportamiento espacial de los sismos destructivos ocurridos entre 1990 2017.	46
Figura 34. Comportamiento espacial de los sismos superficiales ocurridos entre 1990 2017.	47
Figura 35. Comportamiento espacial de los sismos intermedios ocurridos entre 1990 2017.	47
Figura 36. Comportamiento espacial de los sismos profundos ocurridos entre 1990 2017.	48

TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Ventanas de algoritmo para réplicas.	24
Tabla 2. Clasificación de sismos.	28
Tabla 3. Distribución de sismos por tipo de magnitud.	29
Tabla 4. Número de eventos en cada catálogo.	30
Tabla 5. Método ARIMA.	35
Tabla 6. Magnitudes registradas a través del tiempo.	36
Tabla 7. Profundidades registradas a través del tiempo.	37
Tabla 8. Intensidad media por departamento.	43
Tabla 9. Catálogo sísmico de eventos leves.	57
Tabla 10. Catálogo sísmico de eventos moderados.	58
Tabla 11. Catálogo sísmico de eventos fuertes.	64
Tabla 12. Catálogo sísmico de eventos destructivos.	66
Tabla 13. Frecuencia por año.	67
Tabla 14. Frecuencia por mes.	68
Tabla 15. Frecuencia por día.	68
Tabla 16. Frecuencia por hora.	69

1. INTRODUCCIÓN

Los sismos, temblores o terremotos caracterizan la liberación de la energía elástica almacenada durante años en los bordes de una falla, por movimientos relativos entre las placas tectónicas (Carrillo, *et al.*, 2013). Son fenómenos naturales que se presentan de manera agregada en el planeta, dependiendo de las fuentes sismogénicas del lugar; generando así pérdidas humanas y económicas en la sociedad. Es posible localizar zonas con una mayor presencia de sismos, como, por ejemplo, el Cinturón de Fuego del Pacífico, en el cual se han generado los mayores terremotos que se han registrado mundialmente, como el de Japón de 2011 de magnitud 9.0 *ML* y los de Chile en 1960 y 2010 con magnitud 9.6 *Mw* y 8.8 *Mw* respectivamente (Vinuela, 2016).

El Cinturón de Fuego del Pacífico o Circumpacífico, corresponde a un gran sistema tectónico compresivo de aproximadamente 40.000 *km* de longitud. El 80% de los volcanes activos y el 85 % de la energía liberada por medio de sismos, a nivel mundial, se encuentran en este cinturón. Así mismo, dentro de este cinturón se encuentra la Costa Oeste de Sudamérica (COS), región de alta peligrosidad sísmica debido al régimen de subducción asociado y a los sistemas de fallas corticales distribuidos a lo largo de las costas de Colombia, Ecuador, Perú y Chile (Vinuela, 2016).

Geográficamente, Colombia está ubicada en la esquina noroccidental del continente suramericano, donde convergen tres placas litosféricas: Nazca, Sudamérica y Caribe. El desplazamiento de estas placas genera zonas de deformación que se caracterizan por los diferentes tipos de fallas geológicas que contienen, las cuales se reactivan debido a la acumulación de grandes esfuerzos, creando así zonas sismogénicas generadoras de fuertes y destructores terremotos (Gómez & Salcedo, 2002).

Con base a lo anterior se propone caracterizar la dinámica espacial y analizar temporalmente la actividad sísmica ocurrida en Colombia, a partir del catálogo de la red sismológica del Centro Nacional de Información sobre Terremotos (NEIC) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A través de la historia, Colombia se ha visto afectada por terremotos destructivos que han causado pérdidas de vidas humanas y económicas (Gómez, *et al.*, 2014). Debido a que se encuentra ubicado dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, Colombia forma parte de las regiones sísmicas más activas del mundo, en donde se libera más del 80% de la energía sísmica a nivel mundial (Condori & Pérez, 2015).

El esquema tectónico que se presenta en el país se debe a la interacción de tres placas litosféricas: Nazca, Caribe, y Suramérica (Condori & Pérez, 2015). La placa Oceánica de Nazca, por ser más densa, penetra bajo la placa Continental de Sudamérica a una velocidad media de 65 mm/año (Vinueza, 2016). Los movimientos de estas placas generaron el sistema de los Andes del Norte, compuesto por tres cordilleras: Occidental, Central y Oriental; estas condiciones tectónicas han sido culpables de la deformación en la corteza continental y de la actividad volcánica y sísmica en el país (Condori & Pérez, 2015).

Algunos de los sismos destacados en el territorio colombiano por afectar de manera significativa a la población fueron el de Popayán, Cauca en 1983 con magnitud 5.6 *Mw*; el de Páez, Cauca en 1994 con magnitud 6.4 *ML*; Tauramena, Casanare en 1995 de magnitud 6.5 *ML*; Calima, Valle en 1995 con magnitud 6.6 *ML*; San Andrés Islas en 1995 de magnitud 5.3 *ML*; Córdoba, Quindío en 1999 con magnitud 6.2 *ML* y el de Juradó, Chocó en el año 2000 de magnitud 6.3 *ML* (Franco, *et al.*, 2002). Así mismo, el registrado a 27 *km* aproximadamente de la población de Pizarro en el departamento del Chocó, con una magnitud de 6.7 *ML* (Alvarado & Salcedo, 2007).

En su proyecto, Taboada, *et al.*, (1998), distribuyen la sismicidad de Colombia en los sismos de corteza asociados a los principales sistemas de fallas (sismicidad Andina), la sismicidad de subducción del Pacífico, la sismicidad intermedia de Boyacá-Santander y Nido de Bucaramanga, y en la sismicidad de corteza difusa. Según Chávez (2014), la sismicidad de una región está caracterizada por la distribución espacial y temporal de los sismos y sus principales parámetros ocurridos dentro de ella.

El comportamiento espacio-temporal de los sismos se puede cuantificar, analizar y comprender con la sismología estadística, a partir de las propiedades descritas en un catálogo sísmico (Husen & Hardebeck, 2010). Para poder analizar un catálogo sísmico es necesario homogenizar los datos a una sola magnitud, establecer la magnitud de completitud (*MC*) y eliminar las réplicas. (Condori & Pérez, 2015).

Para este estudio, la fuente del catálogo sísmico será la red sismológica del Centro Nacional de Información sobre Terremotos (NEIC), ubicado en Golden, Colorado; el NEIC está encargado de recopilar y proporcionar a los científicos y al público en general, una extensa base de datos sísmicos validos como base sólida para la investigación científica; actualmente, el personal de NEIC localiza y publica aproximadamente 30,000 terremotos al año, mediante la operación de redes nacionales y mundiales con acuerdos de cooperación; todos estos esfuerzos van dirigidos para la mitigación de riesgos sísmico de toda la humanidad (Servicio Geológico de los Estados Unidos).

En este orden de ideas, y bajo la evidencia de la importancia de un análisis de sismicidad, surge la siguiente pregunta de carácter investigativo:

¿Cómo se distribuyen espacial y temporalmente los sismos ocurridos en Colombia durante los años 1990 y 2017?

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

- ❖ Analizar espacial y temporalmente los sismos tectónicos ocurridos durante el periodo 1990 – 2017 en Colombia, mediante el catálogo sísmico recopilado de la red sismológica del Centro Nacional de Información sobre Terremotos (NEIC) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ❖ Determinar la completitud del catálogo sísmico de NEIC correspondiente al periodo 1990 a 2017 sobre el área de estudio, mediante la homogenización de sus magnitudes, la eliminación de las réplicas y el cálculo de la magnitud mínima de completitud.
- ❖ Caracterizar el comportamiento espacial de los sismos tectónicos ocurridos en Colombia desde 1990 hasta el 2017 mediante métodos estadísticos.
- ❖ Analizar temporalmente la recurrencia de los sismos tectónicos de mayor relevancia según su magnitud, sucedidos en el área de estudio.

4. JUSTIFICACIÓN

Debido al crecimiento de las ciudades, la densidad poblacional en zonas de alta ocurrencia sísmica y las catástrofes ocurridas anteriormente en Colombia, se evidencia la necesidad de evaluar la amenaza y el riesgo sísmico con mayor precisión (Gómez & Salcedo, 2002).

Para Chávez (2014), los estudios de sismicidad son una herramienta útil para delimitar y evaluar el riesgo sísmico de alguna zona en particular. Según Gamboa & Arbeláez (2014), un buen estudio de la sismicidad que incluya el análisis de la información sismológica y tectónica de una zona, permitirá caracterizar las regiones y zonas sismogénicas con alta ocurrencia de eventos sísmicos. Con ayuda del análisis de la sismicidad, se argumenta la existencia de al menos tres segmentos activos en la zona de subducción colombiana (Condori & Pérez, 2015). Siendo así, una zona de alta peligrosidad sísmica, debe ser estudiada y analizada, con la finalidad de minimizar el riesgo sísmico para la población (Vinueza, 2016).

Por otro lado, algunos terremotos que causaron impactos en el occidente y centro del territorio colombiano fueron: el sismo del 23 noviembre de 1979 en Risaralda con magnitud 7.2 *Mw*, cuyos efectos fueron en la región del Chocó y Valle del Cauca; igualmente, para los asociados al proceso de subducción, se destacan: el sismo de enero 31 de 1906 con magnitud 8.9 *Mw* entre Colombia y Ecuador con aproximadamente 1500 víctimas, y los de noviembre 19 de 1991 y noviembre 15 de 2004 de 7.2 *Mw* cada uno, localizados en las costas de Bajo Baudó (Pizarro) en el Chocó (Condori & Pérez, 2015). Recientemente, los más significativos fueron: el sismo de septiembre 30 de 2012 con magnitud 7.1 *Mw* con epicentro cerca al municipio La Vega - Cauca, el de febrero 9 de 2013 con magnitud 6.9 *Mw* localizado cerca al municipio de Ospina – Cauca y el del 13 de agosto de 2013 con magnitud 6.5 *Mw* en Nuquí – Chocó. (Condori & Pérez, 2015).

En este contexto se propone analizar espacial y temporalmente los sismos tectónicos ocurridos en Colombia durante los años 1990 hasta el 2017 mediante un estudio de sismicidad como el que implementaron (Chávez, 2014; Orosco & Haarala, 2010; Gamboa & Arbeláez, 2014), con resultados que permitían la identificación de las zonas sísmicas potenciales en el área de estudio. A partir de esto, se propone realizar una caracterización de sismos por magnitudes a nivel espacio – temporal que permita conocer el comportamiento sísmico del territorio colombiano, ya que, según Cárdenas, *et al.*, (2010), este comportamiento es fundamental para la planificación y prevención ante una catástrofe tanto para la sociedad como para su infraestructura.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1. ANTECEDENTES

Para Arroyo, *et al.*, (2017), la determinación de la Magnitud de Completitud (*MC*) de un catálogo sísmico es vital al momento de analizar la sismicidad de alguna región, debido a que *MC* representa la magnitud más baja en la que se detectan todos los sismos dentro de alguna región y periodo de tiempo determinado. En este estudio buscaban determinar la completitud del catálogo de la Red Nacional de Costa Rica a partir de la ocurrencia y la distribución temporal de los sismos medidos en el país durante el periodo entre 1975 y 2014. Para el cálculo de *MC* fue necesario homogenizar los sismos a una sola magnitud y el uso del método de Stepp (1972), el cual toma la tasa de ocurrencia de los sismos en la región de manera constante a través del tiempo, siguiendo una distribución de Poisson. A partir de esto, se pudo calcular la relación Gutenberg-Richter que exhibe la distribución relativa del tamaño de los sismos. La magnitud de completitud que obtuvieron fue de 5.0 para todo el catálogo, pero para algunos periodos de tiempo disminuye hasta 3.0 debido al cambio de sistemas analógicos a digitales para medir los sismos y por el aumento en el número de estaciones sismológicas en la zona de estudio.

Con la finalidad de generar relaciones de conversión entre magnitudes, Cahuari (2008) utiliza una base de datos extraída del NEIC y del IGP (Instituto Geofísico del Perú) compuesta por 112 sismos ocurridos en Perú entre los años 1990 – 2005, de los cuales se conocían los valores de su magnitud en *mb* (magnitud de onda de cuerpo), *ML* (magnitud local), *Ms* (magnitud de onda de superficie) y *Mw* (magnitud del momento) para cada uno. Mediante una regresión lineal se obtuvieron 20 relaciones de magnitudes de gran utilidad para la homogenización de bases de datos sísmicos. Así mismo, Edwards & Douglas (2014) determinan relaciones de magnitudes para convertir sismos con magnitud *ML* y *Md* a la magnitud *Mw*; a partir de catálogos de sismos inducidos por los Sistemas Geotérmicos Mejorados (EGS) con registros en Suiza, Francia, Australia, California, Islandia y Países Bajos. Los resultados muestran una buena correlación entre las relaciones de magnitudes.

También, Scordilis (2006) con el propósito de crear un catálogo sísmico mundial homogeneizado, plantea relaciones globales que permiten convertir sismos tomados en diferentes escalas de magnitud (*Ms*, *mb* y *ML*) a la escala de magnitud más confiable denominada magnitud del momento (*Mw*). A través de las diferentes fuentes sismológicas internacionales logro reunir datos de 20,047 terremotos producidos en todo el mundo entre los años 1976 y 2003. La magnitud de onda de superficie (*Ms*), la magnitud de onda de cuerpo (*mb*) y la magnitud local (*ML*) describen el tamaño de un terremoto relacionándolo directamente con su energía liberada, pero presentan un problema de uniformidad para los diferentes rangos de magnitud. Es por esta razón, que en este estudio consideran la magnitud del momento (*Mw*) como la más precisa para determinar el tamaño de un terremoto, ya que se comporta de igual manera para todos los rangos de magnitudes. Los resultados principales demuestran que las relaciones derivadas son aplicables, excepto las relacionadas con la magnitud local debido a una inconsistencia en su medición por parte de los diferentes centros sismológicos.

Según Gardner & Knopoff (1974), inmediatamente después de un gran sismo, se presentan muchas réplicas en una escala de tiempo corto, las cuales deben de ser identificadas y eliminadas de los catálogos sísmicos. Ellos ejecutaron un método para identificar las réplicas de los catálogos sísmicos del Sur de California y de la Baja California Sur entre los años 1932 – 1971, mediante la elaboración de ventanas espaciales y temporales evaluadas para cada sismo dependiendo de su magnitud. La ventana espacial indica la distancia en kilómetros en la que se pueden encontrar réplicas del sismo evaluado, mientras que la ventana temporal refleja los días en la que una réplica puede presentarse; el sismo de mayor magnitud que se identifique dentro de estas dos ventanas evaluadas, será el evento principal (mainshock) y el resto serán catalogados como réplicas (aftershocks) y por lo tanto eliminados del catálogo sísmico. Como resultado se obtiene que aproximadamente dos tercios (2/3) de los eventos del catálogo sísmico fueron identificados como réplicas, debido a que la totalidad de los eventos de los catálogos era de 14,456 sismos y tan solo 4,645 de ellos permanecieron como eventos principales.

Por otra parte, Vinueza (2016) con la finalidad de estimar y modelar espacialmente la peligrosidad sísmica en la Costa Oeste de Sudamérica (COS), elaboró un catálogo sísmico a partir de cuatro fuentes de Suramérica (Colombia, Ecuador, Perú y Chile) y dos internacionales (USGS – ISC_GEM) desde el año 1471 hasta el 2015 obteniendo 568 registros con magnitud mayor a 7.0 (M_w , M_L , m_b , M_s), de los cuales 251 fueron eliminados por hacer referencia a eventos duplicados. Se homogenizaron las diferentes magnitudes (M_L , m_b , M_s) a la magnitud del momento (M_w) por ser la más robusta y ser una escala sin problemas de saturación, a partir de ecuaciones de correlación entre magnitudes. Para modelar las fuentes sísmicas presentes en la zona de estudio generó cinco zonas sismogénicas, las cuales le permitieron evaluar el potencial sísmico a partir de un modelo de dependencia temporal. Los principales resultados fueron mapas y espectros de peligrosidad sísmica en toda la Costa Oeste de Sudamérica.

Así mismo, Chávez (2014) ejecutó un análisis espacio-temporal de la sismicidad en el estado de Oaxaca, dividiendo el área de estudio en cuatro zonas sismogénicas según su distribución de los sismos. Los datos para este estudio fueron extraídos del Servicio Sismológico Nacional de México a partir de enero de 1995 hasta julio del 2012 con un total de 9,070 registros. Por medio de la distribución frecuencia-magnitud de Gutenberg-Richter, describe la relación entre la frecuencia de ocurrencia y la magnitud de los sismos. Esta relación incluye los parámetros a , b y MC los cuales hacen referencia a la tasa de sismicidad o actividad sísmica, al número relativo de eventos grandes y pequeños y a la magnitud de completitud del catálogo, respectivamente. Para el análisis de los resultados se determinaron nueve ventanas temporales en las cuales se presenta un comportamiento homogéneo en la distribución de los sismos, demostrando que tanto espacial como temporalmente la regionalización sísmica en el estado de Oaxaca es congruente con la actividad tectónica.

De igual modo, Heras (2002) realiza un análisis de la distribución espacial de la sismicidad en Perú, donde la finalidad era identificar las áreas más probables para la ocurrencia de sismos (asprezas) de magnitud mayor o igual a 7.2 M_s . El área de estudio se centra en la interacción entre las placas Nazca y Sudamericana en Perú; la base de datos utilizada consta de 1,200 sismos ocurridos entre los años 1964 – 1999 con una magnitud mínima de 3.5 M_s y obtenidos de los catálogos sísmicos del NEIC, IGP y de Engdahl. El análisis de completitud de los catálogos se estimó mediante la derivada de la distribución frecuencia y magnitud de los sismos; se homogenizó el catálogo a la magnitud M_s mediante una relación lineal y se eliminaron las réplicas a partir del algoritmo de Reasenberg, el cual separa las réplicas de grandes sismos de la sismicidad real de alguna región, mediante la identificación de concentraciones de sismos teniendo en cuenta el periodo de tiempo, rangos de magnitud y su profundidad. Utilizando el software ZMAP 6.0 (Wierner & Malone, 2001) y mediante el método de máxima verosimilitud, se calcula el valor de “ b ” empleado en la relación frecuencia – magnitud; la distribución espacial de este valor a lo largo de una región sísmica, permitió la identificación de áreas con altos esfuerzos (valores

bajos de b = asperezas) y de bajos esfuerzos (valores altos de b) que infieren la presencia futura de áreas de ruptura.

Igualmente, Puruhuaya & Kosaka (2006), mediante la distribución espacio – tiempo de la sismicidad superficial en el Sur del Perú lograron identificar la presencia de asperezas y agrupamientos de sismos en la zona. El catálogo sísmico utilizado fue el de NEIC entre los años 1976 – 2005 compuesto por 696 sismos con una profundidad menor a 70 km y magnitud mínima de 4.5 mb . Los sismos menores a 4.5 mb no fueron tenidos en cuenta debido a que no fueron registrados en un gran número por las estaciones de la red mundial, por ende, sus parámetros hipocentrales no eran de buena calidad; las réplicas fueron eliminadas a partir de una distribución temporal de 20 días. Para un mejor análisis de la distribución de los sismos en función del espacio – tiempo, lo dividieron temporalmente en periodos de cada 5 años; de esta manera se pudo identificar más cómodamente las características de la actividad sísmica de cada intervalo de tiempo.

De otra manera, Caneva, *et al.*, (2004) analizan la sismicidad en los alrededores de Bogotá – Colombia con la finalidad de establecer la influencia de futuros sismos sobre el campus de la Pontificia Universidad Javeriana. La base de datos utilizada contenía 34,920 registros sísmicos entre los años 1962 - 2002, de los cuales tan solo 7,539 eventos quedaron después de la depuración; el cálculo de la magnitud de completitud se determinó mediante el método de Stepp (1972), arrojando una magnitud representativa de 2.5 Ms . A partir de esta magnitud se determinó la magnitud máxima probable para un periodo de retorno de 475, 1,000 y 2,000 años obteniendo así valores de 6.6, 7.1 y 7.5 Ms respectivamente.

Para determinar la amenaza sísmica en el departamento de Santander - Colombia, Guzmán & Vela (2015) utilizaron la teoría de valores extremos que es una rama de la estadística la cual analiza fenómenos asociados a valores muy altos o muy bajos y predice valores extremos en el futuro. El catálogo sísmico utilizado fue el de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) de los años 1993 al 2015 y con un rango de magnitud de 0.5 a 6.3 ML , compuesto por un total de 83,217 eventos de los cuales solo el 2.48 % se identificaron como sismos principales mediante el paquete ZMAP 6.0 con el algoritmo de Gardner & Knopoff (1974). Para determinar la amenaza sísmica se empleó la plataforma CRISIS 2007, la cual genera mapas de peligro sísmico probalístico que permiten identificar las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia sísmica de futuros eventos.

Así mismo, Orosco & Haarala (2010) estiman la amenaza sísmica sobre la ciudad de Salta-Argentina, a partir de un catálogo sísmico del periodo 1964-2008 obtenido del Centro Sismológico Internacional (ISC), homogenizado a magnitud de momento (M_w). Definieron cinco zonas sismogénicas correspondientes a sismos superficiales y de mediana profundidad, se calculó la ley de Gutenberg-Richter y se definió la magnitud mínima a considerar como 4.2 M_w . Para calcular la tasa de ocurrencia de terremotos en Salta, adoptaron un modelo tipo Poisson el cual infiere que cada terremoto es independiente con respecto a cualquier otro

que se pueda presentar en la zona de estudio; para la amenaza sísmica utilizaron la probabilidad de excedencia para la magnitud en cada una de las zonas sismogénicas.

De igual manera, Triviño (2017) estima la amenaza sísmica causada por el proceso de subducción en América Latina y el Caribe, a partir de un modelo sismo-tectónico y de la evaluación de indicadores físicos, socioeconómicos y culturales de los asentamientos humanos ubicados en las zonas de amenaza alta y media. Consolidaron un catálogo sísmico de 43,727 eventos reportados con fecha de ocurrencia entre 1904 – 2012 con magnitudes entre 2.1 – 8.4 *Mw* y con profundidades hasta los 700 *km*, registrados por el NEIC y la ISC. Utilizando el software ZMAP 6.0 y mediante el algoritmo de Gardner & Knopoff (1974) se eliminan los eventos precursores y las réplicas, y cerca del 31% del catálogo inicial se mantiene como eventos independientes o principales; a partir del método de máxima verosimilitud se calcula la relación Gutenberg – Richter estimando un valor de la magnitud de completitud de 4.9 *Mw*. Como resultado se obtiene un mapa expresado en valores de aceleración máxima esperada de movimiento de la tierra y de aceleración espectral para los periodos de vibración estructural.

Para realizar el cálculo de la peligrosidad sísmica en la ciudad de Lorca – España, Quirós (2017) utiliza el método de zonificación y una metodología híbrida de zonas y fallas para la modelización de las fuentes sísmicas. Se utilizó el catálogo sísmico del Instituto Geográfico Nacional (IGN) para los años comprendidos entre 1048 – 2011, el cual se completó con los catálogos del Instituto Andaluz de Geofísica (IAG), del Instituto Cartográfico de Cataluña (CCC), del ISC y del NEIC. Los eventos sísmicos de este catálogo fueron filtrados por profundidad y magnitud, eliminando aquellos que tenían profundidades mayores a 65 *km* y una magnitud mayor o igual a 3.0 por no presentar un peligro potencial. De esta manera el catálogo sísmico queda con un total de 3600 eventos, los cuales fueron homogenizados a la magnitud *Mw* mediante regresiones lineales, sus réplicas fueron eliminadas por el método de Gardner & Knopoff (1974) y su magnitud de completitud determinada por el método de Stepp (1972). El catálogo sísmico final queda compuesto por un total de 1058 eventos y con una magnitud de completitud de 3.5 *Mw*. Como producto final se obtienen mapas de peligrosidad para periodos de retorno de 475 y 975 años en la ciudad de Lorca.

También, Crespo (2011) realiza un análisis de la peligrosidad sísmica en La Península Ibérica con un método basado en estimadores de densidad kernel. Este método no paramétrico deduce la actividad sísmica a partir de la información contenida en el catálogo sísmico referente a su dependencia espacial y la relación con la magnitud, sin tener en cuenta la ley de Gutenberg – Richter. La base de datos utilizada está conformada por los catálogos sísmicos del Instituto Geográfico Nacional (IGN), NEIC y Centro Sismológico Internacional (ISC), los cuales se homogenizaron a la magnitud *Mw* y se les extrajo los identificados como réplicas mediante el método de las ventanas espacio – temporales de Gardner y Knopoff (1974). La tasa de actividad sísmica representa

el número de terremotos por año y por unidad de área, en la cual los valores más altos indican una mayor sismicidad; como resultados de este proyecto se obtienen mapas de peligrosidad sísmica, curvas de peligrosidad y espectros de peligrosidad uniforme de La Península Ibérica.

Por otro lado, para describir la ocurrencia de la sismicidad en el territorio colombiano, Franco, *et al.* (2002) utilizaron el catálogo de sismicidad de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) del periodo comprendido entre los años 1993-2002, con 27,126 eventos locales registrados en magnitud local que varían entre 1.5 y 6.5 *ML*. Para el cálculo de la recurrencia de magnitudes utilizaron la relación Gutenberg-Richter, en la cual los valores de *a* y *b* fueron constantes que describieron el decaimiento de la frecuencia de ocurrencia de los eventos con el incremento de la magnitud. Como resultados del estudio se determinó que la distribución epicentral de los sismos es acorde con el modelo tectónico y de límite de placas para Colombia.

Del mismo modo, Cárdenas, *et al.*, (2010) establecieron un modelo de Poisson para la ocurrencia y magnitud de los sismos en Colombia, a partir del catálogo de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) en el periodo entre el 1 de junio de 1993 al 28 de febrero de 2010. Este catálogo contenía 68,231 eventos entre principales, premonitorios y réplicas, de los cuales se seleccionaron un total de 10,926 eventos principales a partir del algoritmo de Gardner y Knopoff del software ZMAP 6.0. Al superponer la ventana del territorio colombiano se eliminaron 1,500 eventos que sobrepasaban estos límites, quedando así un catálogo final de 9,426 eventos; con el cual se elaboró un subcatálogo con 340 sismos de magnitud mayores o iguales a 4.0, denominados como “riesgosos”. A partir de un análisis espacio – temporal lograron establecer un mapa de amenaza sísmica que clasifica los sismos en leves, moderados, fuertes y destructivos; además lograron comprobar que los sismos en Colombia no siguen un proceso homogéneo de Poisson en el tiempo, sino un proceso agregado de Poisson; y que están directamente relacionados con las fallas geológicas presentes en el territorio.

Para evaluar el comportamiento sísmico de la presa Yuracmayo en Perú, Macedo (2013) implementa una metodología de tres etapas en la que primero se desarrolló un estudio de peligro sísmico probalístico y determinístico, segundo se crea una base de datos sísmica para el proceso de subducción de Perú y Chile y por último se evalúa la respuesta sísmica de la presa, mediante su variabilidad en términos de los espectros de diseño y su comportamiento sísmico. Para este estudio se compiló un catálogo sísmico de los centros sísmicos del NEIC, el proyecto SISRA, el ANSS, catálogo de Engdahl, la NGDC y el catálogo del Instituto Geofísico del Perú. Fue homogenizado mediante relaciones de conversión a la magnitud *M_w*, depurado mediante el método de ventanas espacio – temporales de Gardner y Knopoff (1974) y su magnitud de completitud estimada por el método de Stepp (1972). Como resultado se obtiene un catálogo con 2,836 eventos registrados entre los años 1555 – 2012 con una magnitud de completitud de 4.5 *M_w*.

Con el objetivo de analizar los parámetros sísmicos de dos series sísmicas en España, Gómez (2015) utiliza dos modelos para establecer la recurrencia y el patrón de evolución de la sismicidad de las series, la ley de Gutenberg – Richter y el modelo de Secuencia de Réplicas de Tipo Epidérmico (ETAS). Las series sísmicas fueron divididas con el fin de obtener una mayor resolución en la evolución temporal de los parámetros sísmicos. El catálogo sísmico empleado fue obtenido del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y de la Red Sísmica de Andalucía (IAG), ambos homogenizados a la magnitud del momento (M_w) mediante relaciones de conversión de magnitudes; por medio del software ZMAP 6.0 se lleva a cabo el análisis temporal del valor de b y la magnitud de completitud MC , mediante el método de máxima curvatura (MAXC). Los resultados obtenidos evidencian que los análisis de los parámetros sísmicos permiten caracterizar los emplazamientos donde se han generado las series sísmicas, la cual permite calcular una predicción de una tasa hipotética de sismos.

Por otra parte, Salcedo & Pérez (2016), caracterizan sismotectónicamente el Valle del Cauca y sus zonas aledañas a partir de 49 terremotos con magnitud $M_w \geq 4,8$ ocurridos en el periodo entre 1978 y 2010, obtenidos del catálogo del ISC y del GCMT (Global Centroid Moment Tensor), distribuidos según la profundidad de su hipocentro entre superficiales e intermedios. Dividieron el área de estudio en cuatro zonas sismotectónicas (antes de la fosa - colombo-ecuatoriana - interacción de placas - continental superficial y de Benioff intermedia) y a partir del análisis de la interacción entre las placas Nazca y Suramericana y de la generación de sismos mayores a 6.5 M_w en una pequeña escala de tiempo, determinaron que el Valle del Cauca y sus zonas aledañas son muy importantes para el estudio de la amenaza sísmica en Colombia.

Por otro lado, Gamboa & Arbeláez (2014) elaboran un análisis probalístico de la sismicidad del Valle del Cauca y zonas aledañas con base en el catálogo sísmico colombiano RSNC para el periodo entre 1993 y 2013 con escalas de magnitud local. A partir del método de Stepp (1972), determinaron la magnitud de completitud (MC) equivalente a 2.3 ML ; el comportamiento espacial de los sismos lo analizaron mediante patrones puntuales y los sismos los clasificaron según su magnitud en leves, moderados, fuertes y destructivos, presentándolo en un mapa de intensidades y determinando las áreas más propensas a presentar sismos. Como conclusión se presenta que los sismos exhiben un patrón puntual agregado y que la función que expresa de mejor manera los tiempos de recurrencia de ellos es la exponencial.

Por último, Moncada (2018) realiza un análisis espacio – temporal de los accidentes de tránsito sucedidos en Bogotá durante del año 2015, con la metodología de patrones puntuales en el plano y en las redes lineales (malla vial); a partir de la ubicación espacial y el mes de ocurrencia de cada accidente, estimó la intensidad (número de accidentes por metro cuadrado) mediante el método no paramétrico basado en kernel y las funciones K de Ripley y de correlación por pares (g) mediante el software R con su paquete *Spatstat*. Como resultado principal se afirma que, para el análisis de accidentes de tránsito los cuales suceden sobre las vías, la estimación de la intensidad en las redes

lineales mediante el camino más corto es la metodología ideal, puesto que la estimación mediante la distancia euclidiana en el plano genera valores inconsistentes en sectores donde no hay flujo vehicular, es decir, donde el valor de la intensidad debería de ser cero.

5.2. MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se profundizará en los conceptos que serán objeto de investigación en este estudio y que permitirán aproximar y familiarizar al lector con esta temática:

FUENTES SISMOGÉNICAS: Se determinan a partir de zonas de sismicidad homogénea que reúnen varias fallas activas de naturaleza y potencial sísmico similar, denominadas zonas sismogénicas (Vinuela, 2016).

- ❖ **Sismicidad:** Distribución espacial y temporal de los sismos y sus principales parámetros ocurridos en una zona específica (Chávez, 2014).
- ❖ **Placas Tectónicas:** La litosfera está dividida en seis placas continentales (americana, africana, antártica, india-australiana, euroasiática y pacífica) y alrededor de 14 placas subcontinentales (Nazca, Cocos, etc.). La deformación relativa entre las placas ocurre únicamente en zonas cercanas a los bordes y puede ser lenta y continua (deformación asísmica) o esporádica en forma de sismos (deformación sísmica). Existen tres tipos de límites de placa: divergente (las placas se separan), convergente (las placas coalicionan y una subduce debajo de la otra) y de transformación (las placas se deslizan horizontalmente en direcciones opuestas lateralmente entre sí) (Bolaños & Monroy, 2004).
- ❖ **Fallas Geológicas:** Fracturas o dislocaciones que ocurren en las rocas de la corteza terrestre y producen desplazamiento de los bloques resultantes de la fracturación. Se producen cuando el esfuerzo ejercido debido al constante movimiento de las placas tectónicas supera la resistencia del material, liberando energía de deformación acumulada en forma de calor y de ondas sísmicas. Los principales tipos de fallas geológicas son las normales, las inversas y las de transformación (Bolaños & Monroy, 2004).

CATÁLOGO SÍSMICO: Herramienta que describe los parámetros (ubicación, magnitud, profundidad, etc.) de los sismos ocurridos en una región y tiempo determinado. A través de la historia se han creado distintos catálogos sísmicos según su medición (Gamboa & Arbeláez, 2014):

- ❖ **Catálogo pre-histórico:** Basado en la ruptura de la tierra o hundimiento de la corteza terrestre.
- ❖ **Catálogo histórico:** Basado en la intensidad del sismo.

- ❖ **Catálogo de sismicidad instrumental:** Basado en la transferencia de datos de ubicación y magnitud de los sismos de manera automatizada.

SISMOLOGÍA: Rama de la geofísica encargada del estudio de los terremotos y la propagación de las ondas mecánicas (sísmicas) que se generan tanto en el interior como en la superficie de la tierra (Gamboa & Arbeláez, 2014).

- ❖ **Ondas sísmicas:** La energía liberada en forma de ondas sísmicas durante el fallamiento se propaga a través del medio sólido de la tierra causando vibración y en la mayoría de casos, destrucción en la superficie. La densidad y la elasticidad del medio son las propiedades físicas que determinan las características del movimiento de las ondas. Existen dos tipos de ondas que se producen en un sismo: las ondas de cuerpo (primarias y secundarias) y las ondas superficiales (Rayleigh y Love) (Bolaños & Monroy, 2004).

- ❖ **Sismo o Terremoto:** Liberación súbita de energía acumulada a partir de la ruptura y desplazamiento de materiales o masas de rocas. Producen efectos físicos (movimientos) sobre el suelo y las estructuras presentes en este, mediante la constante transmisión de la energía liberada hasta la superficie (Vinuela, 2016). Los sismos de origen natural pueden estar asociados a diversos tipos de fuentes como volcanes, hundimientos, placas tectónicas e inclusive deslizamientos; para este estudio se tendrán en cuenta los sismos tectónicos, que tienen su origen en el choque de las placas tectónicas o por el movimiento de una falla geológica. El foco o lugar en la tierra donde se genera el rompimiento que produce el terremoto se denomina **hipocentro**, definido por los parámetros de latitud, longitud y profundidad; la proyección de este foco hasta la superficie terrestre se denomina **epicentro**, punto donde se presenta la energía liberada con mayor intensidad (Gamboa & Arbeláez, 2014).

- ❖ **Parámetros de los terremotos:**

- **Profundidad:** Distancia desde el hipocentro hasta el epicentro en kilómetros, permite clasificar los sismos en superficiales (hasta 50 *km*), intermedios (entre 50 y 300 *km*) y profundos (mayores a 300 *km*) (Gamboa & Arbeláez, 2014).
- **Intensidad:** Medida cualitativa de los efectos o daños producidos por un sismo en las construcciones, terreno, etc., y el impacto provocado en las personas (Bolaños & Monroy, 2004).
- **Localización:** Ubicación de un sismo por medio de coordenadas geográficas (Gamboa & Arbeláez, 2014).
- **Magnitud:** Medición cuantitativa de la energía liberada en un sismo. Las escalas para medir la magnitud de los sismos son:
 - Magnitud local (*ML*).
 - Magnitud de ondas superficiales (*Ms*).
 - Magnitud de ondas de cuerpo (*mb*).

- Magnitud de duración (M_d).
- Magnitud del momento (M_w).

SISMOLOGÍA ESTADÍSTICA: Aplicación de métodos estadísticos para cuantificar, analizar y comprender el comportamiento espacio-temporal de los sismos (Husen & Hardebeck, 2010). El análisis de los datos de sismicidad permite mejorar la evaluación de la peligrosidad sísmica, la prevención y la comprensión científica de los terremotos (Gamboa & Arbeláez, 2014).

- ❖ **Régimen sísmico:** Se refiere al análisis espacio-temporal de un conjunto de sismos con parámetros geométricos (coordenadas y tiempo de origen) y uno dinámico (magnitud), en una región determinada. Para el análisis de la distribución de estos sismos se utilizan mapas (de epicentro, de densidad de epicentro, etc.) y gráficos (espacio-temporal, de ocurrencia temporal, magnitud-frecuencia, etc.) (Gamboa & Arbeláez, 2014).
- ❖ **Recurrencia sísmica:** Al tiempo transcurrido entre eventos (acumulación de esfuerzos), se denomina Periodo de Recurrencia, este define la magnitud de los terremotos teniendo en cuenta el área en el que se acumulan los esfuerzos y las fuerzas que los generan (Vinuela, 2016).
- ❖ **Ley de frecuencia de ocurrencia sísmica:** Describe la frecuencia con la que se repiten los sismos de una magnitud en una región específica. La ley de frecuencia de ocurrencia de los sismos respecto a la magnitud se representa a través de la relación de Gutenberg & Richter (1944).
- ❖ **Complejidad del catálogo sísmico:** Se determina por la magnitud de complejidad (M_C), la cual es la magnitud más baja en la cual el 100% de los sismos son detectados exitosamente dentro de una región y periodo de tiempo determinado (Arroyo, *et al.*, 2017).

ESTADÍSTICA ESPACIAL: Reunión de un conjunto de metodologías apropiadas para el análisis de datos que corresponden a la medición de variables aleatorias en diversos sitios (puntos del espacio o agregaciones espaciales) de una región. La estadística espacial se subdivide en tres grandes áreas (Geoestadística, lattice y patrones puntuales) (Giraldo, 2011).

- ❖ **GEOESTADÍSTICA:** Rama de la estadística espacial que se especializa en analizar y modelar la variabilidad espacial en ciencias de la tierra. Su objetivo de estudio es el análisis y la predicción de fenómenos en espacio y/o tiempo (Díaz, 2002).
- ❖ **LATTICE:** También llamados datos de áreas o regionales; en esta rama el conjunto de ubicaciones de interés es discreto y la selección de los sitios de medición depende del investigador (Díaz, 2002).
- ❖ **PATRONES PUNTUALES:** Para el análisis de los patrones puntuales la decisión de donde se hace la medición no depende del investigador. Dicho conjunto puede ser discreto o continuo, pero la ubicación de los sitios donde ocurre el fenómeno a estudiar es dada por la naturaleza. En

general el propósito de análisis en estos casos es el de determinar si la distribución de los individuos dentro de la región es aleatoria, agregada o regular (Díaz, 2002).

Los tipos de patrones puntuales se clasifican como aleatorios, regulares y agregados según la distribución de los datos en el área de interés.

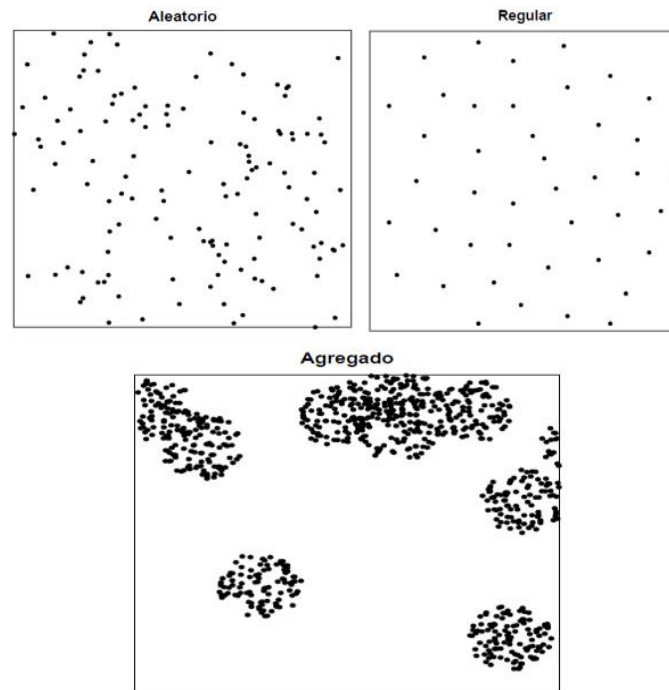


Figura 1. Tipos de Patrones Puntuales.
Fuente: Díaz, 2002.

PRUEBA DE ALEATORIEDAD ESPACIAL COMPLETA (Complete spatial randomness CSR): Test inicial para el análisis espacial de los datos, el rechazo de este permite modelar un patrón observado y distinguir su clasificación entre regular o agregado. Las pruebas de CSR pueden ser evaluadas por medio del conteo de cuadrantes y mediante distancias (Cárdenas, *et al.*, 2010).

- ❖ **Test Chi Cuadrado:** Prueba CSR basada en el conteo de cuadrantes, consiste en dividir el área de estudio en cuadrantes de igual área para el conteo del número de eventos por cada uno de estos. Utiliza el criterio de Pearson para probar la distribución aleatoria de los eventos (Cárdenas, *et al.*, 2010).
- ❖ **Gráfico De Patterson Fry:** Este gráfico brinda información adicional acerca de los espacios en un patrón puntual, mediante una gráfica de dispersión de las distancias entre todos los pares de puntos del patrón (Rodríguez, 2018).
- ❖ **Función K:** Prueba CSR evaluada mediante distancias, se utiliza para analizar el patrón espacial de los datos y resumir la dependencia espacial en un rango de distancias (Gamboa & Arbeláez, 2014).

MODELOS PARA PATRONES PUNTUALES ESPACIALES: Representan los patrones puntuales presentes en los datos, y se determinan según el tipo de estos (aleatorios, regulares o agregados).

- ❖ **Proceso homogéneo de Poisson:** Son la base de la construcción de la teoría de los procesos puntuales espaciales. Se utiliza como modelo idealizado de aleatoriedad espacial (Cárdenas, *et al.*, 2010).
- ❖ **Proceso agregado de Poisson:** Modela agrupaciones individuales de eventos. Está compuesto por eventos principales que se ubican aleatoriamente, y sus respectivos descendientes (Cárdenas, *et al.*, 2010).
- ❖ **Proceso no homogéneo de Poisson:** Permite que la intensidad del proceso varíe en función de la localización geográfica; permitiendo así, la incorporación de covariables asociadas a las ubicaciones (Cárdenas, *et al.*, 2010).
- ❖ **Proceso de Cox:** Proceso doblemente estocástico, en el cual tanto la ubicación como la función de intensidad son aleatorias (Cárdenas, *et al.*, 2010).
- ❖ **Proceso de inhibición simple:** Modela patrones regulares, los cuales surgen por la imposición de una distancia mínima consentida, entre dos eventos (Cárdenas, *et al.*, 2010).

SERIES DE TIEMPO: Conjunto de datos que surgen del registro de las observaciones de una variable cuantitativa en función del tiempo (Cryer & Chan, 2008).

Las series pueden ser de dos tipos:

- ❖ **Estacionarias:** En este tipo de serie el valor medio permanece constante, aunque se pueden presentar variaciones en torno a ese valor (Cryer & Chan, 2008).

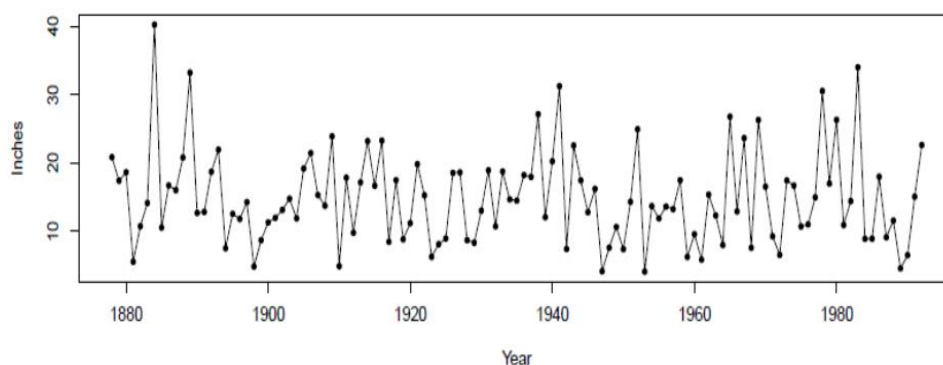


Figura 2. Ejemplo de serie estacionaria.
Fuente: Cryer & Chan (2008).

- ❖ **Evolutivas (No estacionarias):** En estas series el valor medio cambia a través del tiempo (Cryer & Chan, 2008).

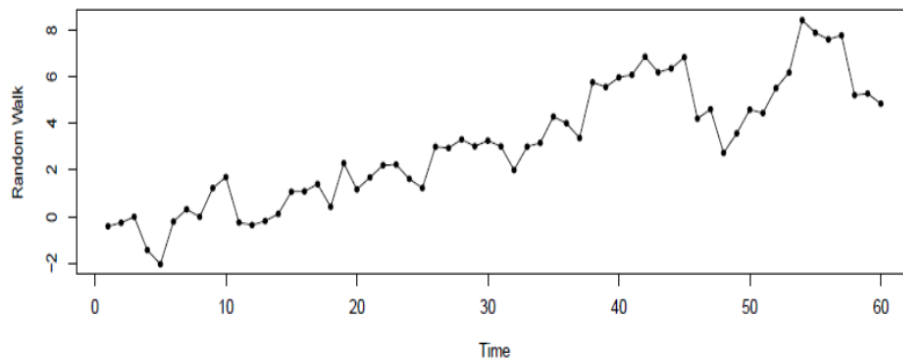


Figura 3. Ejemplo de serie evolutiva.
Fuente: Cryer & Chan (2008).

Según Cryer & Chan (2008) las series de tiempo están conformadas por los siguientes componentes:

- **Tendencia:** comportamiento de una serie a largo plazo donde el valor medio cambia a través del tiempo.
- **Estacionalidad:** representa las fluctuaciones que se repiten periódicamente en intervalos de tiempo de igual amplitud.
- **Ciclo:** representa el patrón de comportamiento que se repite en periodos de diferente duración. Suele ser más irregular que las variaciones estacionales.
- **Ruido:** producto de variaciones naturales aleatorias. Se producen en la serie de forma aislada y no permanente de modo que es prácticamente imposible preverlas.

5.3. MARCO TEÓRICO

Teniendo en cuenta los antecedentes presentados anteriormente para el análisis espacio-temporal de los sismos en Colombia, a continuación, se exhiben las ecuaciones relacionadas con el proyecto que servirán de soporte en esta investigación:

- ❖ **Magnitud local (M_L):** Definida por Richter en 1935 para medir los sismos del Sur de California, poco profundos y con distancias epicentrales menores a 600 km, medidos mediante un sismógrafo Wood-Anderson estándar.

$$M_L = \log(A_{max}) - \log A_0 * D \quad (1)$$

Fuente: (Bolaños & Monroy, 2004).

Donde:

A_{max} = Máxima amplitud medida en centímetros.

A_0 = Amplitud que debe tener un sismo de magnitud cero a la distancia D .

D = Distancia entre el epicentro y el lugar de registro.

- ❖ **Magnitud de ondas superficiales (M_s):** Escala basada en la amplitud de las ondas Rayleigh, definida por Gutenberg y Richter en 1936.

$$M_s = \log(A) + 1.66 \log(D) + 2.0 \quad (2)$$

Fuente: (Bolaños & Monroy, 2004).

Donde:

A = Amplitud del desplazamiento del suelo en micrómetros.

D = Distancia epicentral del sismómetro medida en grados.

- ❖ **Magnitud de ondas de cuerpo (mb):** Definida por Gutenberg en 1945 basándose en la amplitud de los primeros ciclos de las ondas primarias (P).

$$mb = \log(A) - \log(T) + 0.01D + 5.9 \quad (3)$$

Fuente: (Bolaños & Monroy, 2004).

Donde:

A = Amplitud de las ondas P en micrómetros.

T = Periodo de la onda P (usualmente un segundo).

D = Distancia epicentral medida en grados.

- ❖ **Magnitud momento (M_w):** Esta escala propuesta por Hanks y Kanamori en 1979 es la única que no se satura; está basada en el momento sísmico, que es una medida directa de los factores que producen la ruptura a lo largo de una falla.

$$M_w = \left(\frac{2}{3}\right) \log M_0 - 10.7 \quad (4)$$

Fuente: (Bolaños & Monroy, 2004).

Donde:

M_0 = Momento sísmico en dinas-cm dado por:

$$M_0 = \mu A \bar{D} \quad (5)$$

Fuente: (Bolaños & Monroy, 2004).

Donde:

μ = Resistencia a la ruptura del material a lo largo de la falla.

A = Área de ruptura.

$\tilde{D}$ = Cantidad de desplazamiento producido.

- ❖ **Relación Gutenberg-Richter:** Definida por Gutenberg y Richter (1944), muestra la distribución relativa del tamaño de los sismos mediante la relación frecuencia – magnitud de los mismos.

$$\log(N) = a - b * M \quad (6)$$

Fuente: (Arroyo, et al., 2017).

Donde:

N = Número acumulado de sismos en una región.

a = Ordenada en el origen.

b = Pendiente de la recta.

MC = Magnitud.

- **Cálculo del valor de a :** Describe la actividad o el nivel de sismicidad en una región.

$$a = \log(N) \quad (7)$$

Fuente: (Chávez, 2014).

Donde:

N = Número acumulado de sismos en una región.

- **Cálculo del valor de b :** Se relaciona con los niveles de esfuerzos acumulados y liberados en una zona, se calcula a partir del método propuesto por Aki en 1965 de máxima verosimilitud.

$$b = \frac{\log(e)}{\left[Mm - \left(MC - \frac{\Delta M}{2} \right) \right]} \quad (8)$$

Fuente: (Arroyo, et al., 2017).

Donde:

Mm = Magnitud media del grupo de sismos a partir de la MC .

MC = Magnitud de completitud.

ΔM = Ancho del intervalo de magnitud analizado.

e = Número de Euler.

- **Cálculo del valor de MC** : A partir de la magnitud mínima de completitud todos los eventos en un volumen espacio-tiempo son detectados. Por debajo de MC parte de los eventos son perdidos debido a su tamaño, ya que no alcanzan a ser registrados por todas las estaciones de la red sismológica. Se calcula mediante el método de Máxima Curvatura (MAXC) el cual consiste en definir la magnitud de mínima completitud como el punto de la curvatura máxima mediante el cálculo del valor máximo de la primera derivada de la curva de frecuencia – magnitud (Chávez, 2014).

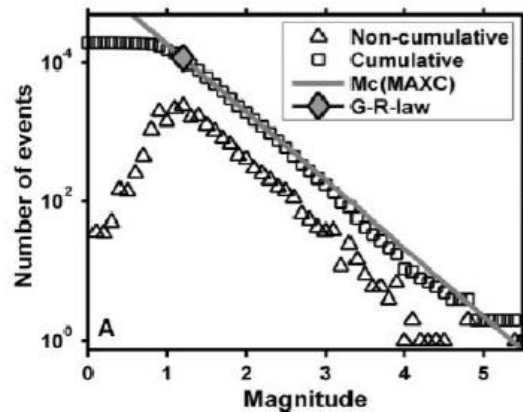


Figura 4. Ejemplo del cálculo de Mc por el método MAXC.
Fuente: (Gómez, 2015).

Se indica con un diamante en la distribución acumulada (cuadrados), que corresponde con el pico de la distribución no acumulativa (triángulos). La línea gris representa la relación Gutenberg - Richter correspondiente a la distribución.

- ❖ **Intensidad (Patrones puntuales):** Factor importante en el desarrollo del análisis espacial de un área determinada, definido como el número de eventos que ocurren por unidad de área. Para patrones aleatorios se representa con la siguiente expresión:

$$\lambda(s) = \lambda = \frac{n}{|A|} \quad (9)$$

Fuente: (Giraldo, 2011).

Donde:

λ = Intensidad.
 s = Localización de la intensidad.
 n = Número de eventos.
 A = Área específica de eventos.

- ❖ **Test Chi Cuadrado:** A partir del criterio de Pearson se comprueba la distribución aleatoria de los eventos (Cárdenas, *et al.*, 2010). Valores de χ^2 suficientemente grandes o pequeños, indican distribuciones agregadas o regulares (Gamboa & Arbeláez, 2014).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - \tilde{n})^2}{\tilde{n}} \quad (10)$$

Fuente: (Cárdenas, *et al.*, 2010).

Donde:

m = Numero de regiones.

$\tilde{n} = \frac{n_i}{\tilde{n}}$ Numero esperado de eventos por cada región con intensidad homogénea.

- ❖ **Función K de Ripley:** Función utilizada para procesos estacionarios e isotrópicos (Giraldo, 2011).

$$k(d) = \frac{E(\text{Numero de eventos adicionales a una distancia } d \text{ de un evento elegido aleatoriamente})}{\lambda} \quad (11)$$

Fuente: (Giraldo, 2011).

Donde:

λ = Intensidad.

$$\hat{k}(d) = \frac{\sum \sum_{i \neq j} I_d(d_{ij})}{\hat{\lambda}_n} \quad (12)$$

Fuente: (Giraldo, 2011).

Donde:

$\hat{\lambda} = n/A$

A = Área de la región R.

d_{ij} = Distancia entre el i-ésimo y el j-ésimo evento.

$$\begin{cases} I_d(d_{ij}) = 1 & \text{si } d_{ij} < d \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Bajo Aleatoriedad

$$k(d) = \frac{\lambda \pi d^2}{\lambda} = \pi d^2 \quad (13)$$

Fuente: (Giraldo, 2011).

Donde:

Si $\hat{k}(d) < \pi d^2$ hay regularidad.

Si $\hat{k}(d) > \pi d^2$ hay agregación.

- ❖ **Descomposición aditiva de series de tiempo:** Una forma de abordar el estudio de una serie temporal es mediante la descomposición aditiva de la serie (Cryer & Chan, 2008)

$$Y_t = T_t + S_t + I_t \quad (14)$$

Fuente: (Cryer & Chan, 2008).

Donde:

Y_t = Valor observado.

T_t = Tendencia.

S_t = Estacionalidad.

I_t = Irregular.

- ❖ **Relación de magnitudes:** Se presentan las diferentes relaciones entre magnitudes, necesarias para la homogenización del catálogo sísmico a la magnitud M_w :

$$M_w = 0.9879 * M_L + 0.3316 \pm 0.2 \quad (15)$$

Fuente: (Cahuari, 2008).

$$M_w = 0.9588 * M_b + 0.458 \pm 0.2 \quad (16)$$

Fuente: (Cahuari, 2008).

$$M_w = 0.7044 * M_s + 1.702 \pm 0.2 \quad (17)$$

Fuente: (Cahuari, 2008).

$$M_w = 0.90 * M_d + 0.47 \pm 0.08 \quad (18)$$

Fuente: (Edwards & Douglas, 2014).

6. METODOLOGÍA

6.1. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN

Caracterización de la zona de estudio

El territorio continental de la República de Colombia se encuentra ubicado en la esquina noroccidental de América del Sur, con coordenadas geográficas 12°26'46" latitud norte en Punta Gallinas (Guajira), 4°12'30" latitud sur en la desembocadura de la quebrada San Antonio en el río Amazonas, 60°50'54" longitud este sobre la Isla San José en el río Negro y 79°02'33" longitud oeste en la desembocadura del río Mira en el Océano Pacífico (Cabo Manglares) (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2018).



Figura 5. Zona de estudio: República de Colombia.
Fuente: Google Earth.

Colombia posee una superficie total de 2,070,408 km^2 , repartidos en un área continental de 1,141,748 km^2 y un área marítima de 928,660 km^2 . Limita con cinco países en sus fronteras territoriales (Venezuela, Brasil, Perú, Ecuador y Panamá) y con 11 países en sus fronteras marítimas (Jamaica, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Haití, República Dominicana, Venezuela en el mar Caribe, y con Ecuador, Panamá y Costa Rica en el océano Pacífico). El territorio colombiano se encuentra dividido administrativamente en 32 departamentos, 1.096 municipios, 5 distritos y 20 corregimientos departamentales; su capital es Bogotá D.C. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2018).

Según la proyección del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) para 2018, la población colombiana es de 49,652,839 habitantes; siendo así el tercer país más poblado en América Latina, después de Brasil y México.

Catálogo Sísmico

El Centro Nacional de Información sobre Terremotos (NEIC) hace parte del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y es el encargado de determinar de manera rápida y precisa, la ubicación y el tamaño de todos los terremotos significativos que ocurren en el mundo; los datos son recopilados mediante la operación de redes en EE.UU. y mundiales, a partir de acuerdos de cooperación.

La fuente de información primaria para la ejecución de este proyecto es el catálogo sísmico instrumental para Colombia entre los años 1990 y 2017, el cual fue descargado desde la página oficial de la USGS. Los principales parámetros que describe el catálogo sísmico son: la fecha, hora, lugar, latitud, longitud, profundidad y tipo de magnitud para cada sismo registrado.

El catálogo sísmico de NEIC fue descargado en la fecha 24/06/2018 con los siguientes parámetros:

- ✓ Región geográfica: Se elabora un rectángulo personalizado que cubre el área colombiana con coordenadas (-4.434 S, 12.522 N) en latitud y [-79.08 W, -66.731 E] en longitud.

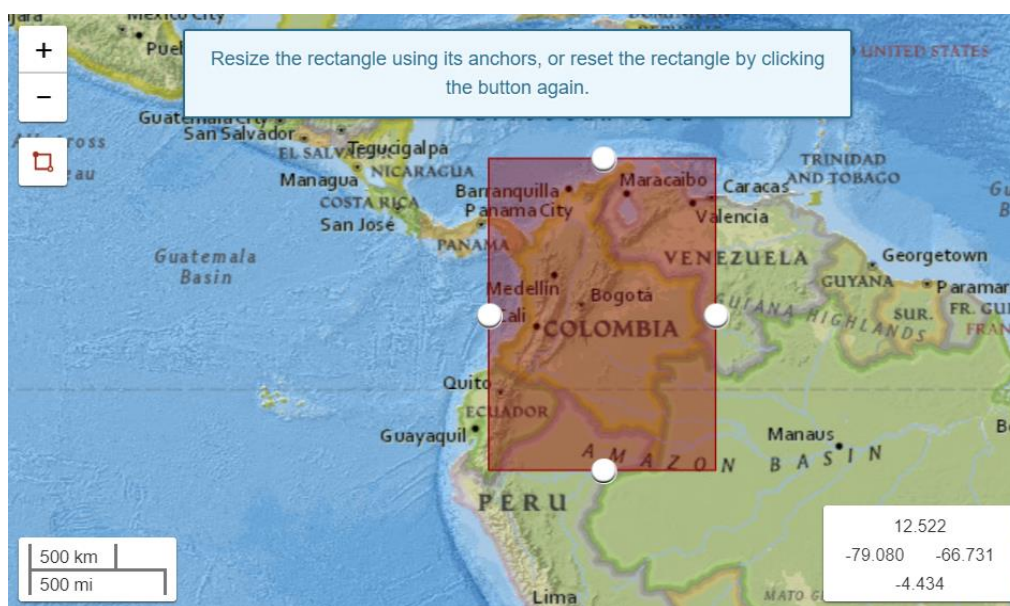


Figura 6. Región geográfica seleccionada.
Fuente: USGS.

- ✓ Fecha y hora: Se seleccionan los sismos desde el 01-01-1990 a las 00:00:00 hasta los ocurridos el 31-12-2017 a las 23:59:59.
- ✓ Magnitud: Se tuvieron en cuenta los sismos superiores a la magnitud 2.5, debido a que los sismos de menor magnitud no provocan daños, son imperceptibles para las personas y se producen de manera continua día tras día, generando un gran número de registros al año.

Este catálogo descargado debe de ser interceptado con el límite del territorio colombiano, de esta manera se podrá delimitar perfectamente el área de estudio.

Según Gómez (2015), para el tratamiento de un catálogo sísmico son necesarios tres procesos, la homogenización del parámetro de tamaño, la depuración, y la identificación de la magnitud mínima de completitud (*MC*).

▪ Homogenización del catálogo

Debido a que el catálogo presenta diferentes tipos de magnitud de los eventos, fue necesario homogenizar los sismos a una sola magnitud, que en este caso fue la magnitud momento (*M_w*), debido a que no se satura con valores altos y tiene una buena resolución al registrar los eventos. Usualmente, la ingeniería sísmica utiliza la magnitud *M_w* como escala preferente para el análisis y los reportes sísmicos, debido a que la medida del tamaño del sismo puede ser relacionada con parámetros físicos, como la cantidad del desplazamiento de la falla y la energía liberada por las ondas sísmicas (Macedo, 2013). La homogenización para las magnitudes *M_L*, *m_b* y *M_s* se realizó a partir de las ecuaciones de correlación entre magnitudes descritas por Cahuari (2008), y para la magnitud *M_d* la propuesta por Edwards & Douglas (2014); definidas anteriormente en las **ecuaciones 15, 16, 17 y 18**.

▪ Depuración

Este proceso consiste en eliminar los eventos que se identifiquen como réplicas o premonitores de un evento principal (Gómez, 2015). El método utilizado en este proceso fue el de Gardner & Knopoff (1974), el cual consiste en ir colocando una ventana espacial y temporal alrededor de cada evento, con unas dimensiones dependientes de la magnitud de dicho evento (**Tabla 1**); entre los eventos identificados, se toma el de mayor magnitud como evento principal (Crespo, 2011).

Tabla 1. Ventanas de algoritmo para réplicas.
Fuente: Gardner y Knopoff (1974).

<i>M</i>	<i>L (km)</i>	<i>T (Días)</i>
2.5	19.5	6
3.0	22.5	11.5
3.5	26	22
4.0	30	42
4.5	35	83
5.0	40	155
5.5	47	290
6.0	54	510
6.5	61	790
7.0	70	915
7.5	81	960
8.0	94	985

- **Recurrencia de magnitudes**

Se determina la recurrencia de magnitudes para los eventos registrados por el NEIC durante el periodo de análisis del proyecto, mediante la gráfica de la distribución de la frecuencia acumulada de sismos y la magnitud, denominada Relación Gutenberg-Richter (**ecuación 6**). El decaimiento en la frecuencia de ocurrencia de eventos a partir del incremento de la magnitud, se describe a partir de las constantes a y b (parámetros de la relación Gutenberg-Richter) (Franco, et al., 2002).

El valor de a se calcula por medio de sustitución directa en la relación Gutenberg-Richter, estableciendo como cero el valor de la magnitud de completitud en la **ecuación 6**. Por otro lado, el valor de b que según Condori & Leandro (2015), representa los niveles de esfuerzo acumulados y liberados en una zona específica, se calculará a partir del método de máxima verosimilitud (MAXV).

- **Magnitud mínima de completitud (MC)**

Según Gómez (2015), MC establece la magnitud mínima a partir de la cual se considera completo el catálogo sísmico. La magnitud de completitud es importante para el cálculo del valor de " b " ya que el método de máxima verosimilitud (MAXV) depende crucialmente de este parámetro (Chávez, 2014). El método utilizado para definir la magnitud de mínima completitud es el de la máxima curvatura (MAXC),

- **valor de " a " y de " b "**

A partir del software ZMAP 6.0 se calculan los valores de a y de b ; para este proceso son necesarios los siguientes parámetros: una grilla (x , y) en el área de estudio, la magnitud mínima de completitud del catálogo sísmico, la dimensión del radio en km para el trazado de círculos y el número mínimo de eventos del periodo de estudio (Condori & Pérez, 2015).

6.2. ANÁLISIS ESPACIAL

➤ Análisis Exploratorio de Datos Espaciales

La finalidad del Análisis Exploratorio de Datos (AED) es examinar los datos previamente a la aplicación de cualquier técnica estadística (Rodríguez, 2018). Para reflejar la estructura espacial de un fenómeno se representan sus coordenadas espaciales (x ; y) dentro de una región geográfica, generando un conjunto de datos llamado patrón espacial de puntos.

Para el análisis de patrones puntuales se realiza una gráfica del patrón sobre el espacio, caracterizándolo cualitativamente; dependiendo de la distribución de los puntos en el espacio el patrón se puede clasificar en regular, completamente aleatorio o agregado (Moncada, 2018).

También, se analizan las frecuencias de los sismos en función de los años, meses, días y hora de la ocurrencia de estos; se genera la serie de tiempo sísmica, la cual está compuesta por la frecuencia de los sismos en función del mes y año de ocurrencia. Para probar estacionariedad en la serie de tiempo se emplean las funciones de autocorrelación ACF y PACF, además se descompone la serie en sus componentes de tendencia, estacionalidad y ruido.

A partir de la serie de tiempo sísmica es posible estimar el modelo autorregresivo integrado de promedio móvil (ARIMA), el cual permite identificar los coeficientes y el número de regresiones que se pueden utilizar para las estimaciones futuras mediante datos del pasado.

Por último, se elabora un análisis de la frecuencia por magnitud y por profundidades y de sus registros a través del tiempo.

➤ **Patrones Puntuales**

Un patrón puntual espacial es un conjunto de lugares, irregularmente distribuidos dentro de una región en el espacio, en el cual, los lugares se representan como eventos (Cárdenas, *et al.*, 2010). Con la finalidad de identificar si los eventos sísmicos presentan un comportamiento aleatorio, agregado o regular, no solo se analiza de manera gráfica, sino también mediante la siguiente prueba de hipótesis:

Aleatoriedad Espacial Completa (Complete Spatial Randomness CSR)

Para Rodríguez (2018), la aleatoriedad espacial completa (CSR) es el “ruido blanco” de un proceso puntual espacial que caracteriza la ausencia de estructura en los datos. El rechazo del CSR es un prerequisite mínimo para modelar un patrón observado, dividiendo la hipótesis entre patrones regulares y agregados.

- ❖ **Conteo por Cuadrantes:** Según Rodríguez (2018), para ejecutar este método la región de estudio se divide en rectángulos “cuadrantes” de igual tamaño y se cuenta el número de puntos en cada rectángulo. Esta técnica y su representación visual permiten tener una idea global sobre la naturaleza del patrón espacial.
- ❖ **Gráfico de Patterson – Fry:** Para interpretar este gráfico Rodríguez (2018), indica que se debe situar en el centro de este y observar su distribución alrededor de él; si hay ausencia de puntos indica un patrón regular, si los puntos se distribuyen aleatoriamente alrededor de él, sugiere aleatoriedad completa y si hay acumulación de puntos en el centro, se considera que el patrón tiene agregación.

➤ Estadísticos de primer orden

La primera etapa de un análisis estadístico después de rechazar la aleatoriedad espacial completa, es la estimación y modelación de la función de intensidad. La intensidad del patrón espacial se describe en términos del número promedio de puntos por unidad de área (Rodríguez, 2018). Mediante el software R, con su paquete *Spatstat* es posible graficar la estimación de la intensidad espacial con sus respectivas curvas de nivel para el patrón de puntos de los eventos sísmicos.

La función de intensidad es conocida como mapa de calor o mapa de zonas calientes, los cuales se pueden interpretar a partir de la escala de colores, de tal manera que las zonas más intensas representan el área donde se agrupan y conglomeran un alto número de eventos; además son adecuados para visualizar grandes cantidades de datos espaciales e identificar clústeres (agrupamientos) (Rodríguez, 2018).

➤ Estadísticos de segundo orden

De acuerdo con Rodríguez (2018), las propiedades de segundo orden se utilizan para analizar y describir la estructura de correlación espacio-temporal que existe entre los eventos de un proceso puntual.

- ❖ **La K-Función:** A partir del paquete *Spatstat* de R y con la función *Kest*, se calcula la estimación de la *K-función* con diferentes correctores de borde (*iso*, *trans*, *bord*) y su valor teórico πr^2 , el cual representa aleatoriedad. Según Rodríguez (2018), la *K-función* tiene un valor teórico de πr^2 para procesos completamente aleatorios, mayor a πr^2 si el proceso es de agregación y menor si el proceso es regular.

- ❖ **Función Pair-Correlation (*g*):** Para estimar la función *pair-correlation* (*g*) mediante el paquete *Spatstat*, se utiliza la función *pcf* junto a los correctores de borde (*Ripley*, *Trans*) de la *K-función*. Para cualquier patrón puntual, los valores de $g(r) = 1$ identifica un patrón aleatorio, los valores de $g(r) > 1$ indican agrupamiento y los de $g(r) < 1$ regularidad (Moncada, 2018).

➤ Bandas de confianza (*Pointwise envelopes*)

Mediante la función *envelope* del paquete *Spatstat* y 39 simulaciones de un proceso aleatorio se generan las bandas de confianza, las cuales determinan el rango en el cual las funciones *k* y *g* representan un patrón aleatorio.

6.3. ANÁLISIS TEMPORAL

Para analizar temporalmente la ocurrencia de los sismos en el área de estudio, se estima la intensidad para cada año de ocurrencia sísmica. De esta manera se ejecuta un análisis histórico de las zonas potencialmente sísmicas identificadas previamente.

6.4. ANÁLISIS POR MAGNITUD Y PROFUNDIDAD

Por último, se clasifican los sismos según su magnitud (leves, moderados, fuertes y destructivos) y su profundidad (superficiales, intermedios y profundos) para el respectivo análisis.

Tabla 2. Clasificación de sismos.
Fuente: Elaboración propia.

SISMOS	MAGNITUD	SISMOS	PROFUNDIDAD
Leves	$<4M_w$	Superficiales	$<50\text{ km}$
Moderados	$4 \leq M_w < 5$	Intermedios	$50\text{ km} \leq \text{Intermedios} < 300\text{ km}$
Fuertes	$5 \leq M_w < 6$	Profundos	$\geq 300\text{ km}$
Destructivos	$\geq 6M_w$		

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. CATÁLOGO SÍSMICO

El catálogo sísmico descargado de la USGS, estaba compuesto primeramente por 3689 eventos, distribuidos como lo muestra la **Figura 7**. Al interceptar los sismos con el límite de Colombia se eliminaron un total de 1399 puntos los cuales estaban ubicados por fuera del territorio colombiano. Por esta razón, el catálogo sísmico queda compuesto por 2290 eventos transitoriamente.

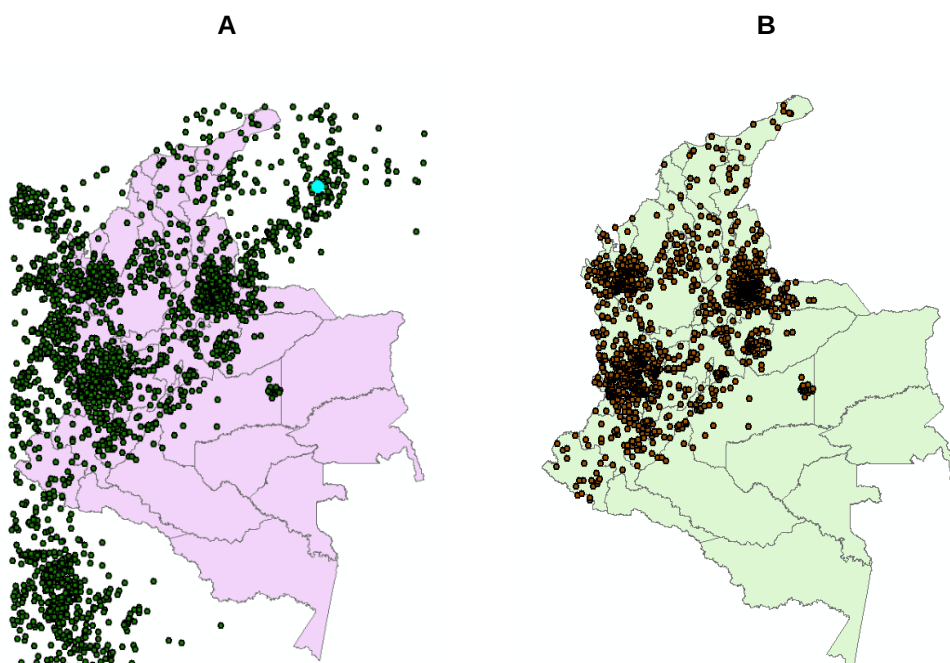


Figura 7. A. Representación espacial de los eventos del catálogo sísmico descargado de NEIC. B. Eventos interceptados por la zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

Los eventos resultantes después de la intercepción con la zona de estudio se homogenizaron a la magnitud M_w , mediante las **ecuaciones 15, 16, 17 y 18**. En la siguiente tabla se aprecia el número de eventos por tipo de magnitud, evidenciándose la magnitud mb como la más dominante en el catálogo, con un total de 1844 sismos.

Tabla 3. Distribución de sismos por tipo de magnitud.
Fuente: Elaboración propia.

MAGNITUD	No. EVENTOS
mb	1844
Md	227
ML	93
Ms	2
M_w	124
TOTAL	2290

Para el proceso de depuración del catálogo sísmico, el cual permitió eliminar los eventos identificados como réplicas y premonitorios, mediante el método de Gardner & Knopoff (1974); se organizó el catálogo sísmico de mayor a menor magnitud y no por orden cronológico, ya que, de esta manera, el evento con el que se inicia el análisis de las ventanas será el evento principal, y todos los demás que se identifiquen dentro de estas, serán eliminados como premonitores (antes del evento principal) o réplicas (después del evento principal). Mediante la ventana espacial $L(M)$ se determina el radio (km) en el que se producen las réplicas y los eventos premonitorios en función de la magnitud del evento principal; así mismo, la ventana temporal $T(M)$ define los días en los que se presentan las réplicas o los eventos premonitorios en función de la magnitud del evento principal (Quirós, 2017). Al terminar este proceso se han detectado un total de 1482 eventos catalogados como réplicas y premonitorios; es decir, tan solo el 35 % de los eventos corresponden a eventos principales con un total de 808 sismos.

El porcentaje de eventos principales detectados mediante el método de Gardner & Knopoff (1974), es similar al identificado por estos mismos autores con un 32% y con el determinado por Triviño (2017) con un 31% de los eventos en total.

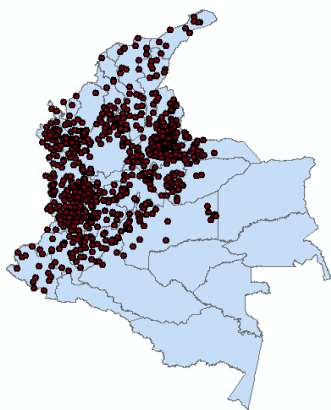


Figura 8. Representación espacial de los 808 eventos del catálogo depurado.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Número de eventos en cada catálogo.
Fuente: Elaboración propia.

CATÁLOGO	No. EVENTOS
Descargado USGS	3689
Delimitado al área de estudio	2290
Final con depuración	808

Finalmente, el catálogo resultante queda compuesto por 808 eventos sísmicos con magnitudes entre 2.8 y 7.3 M_w y profundidades entre 2 y 436 km, el número de eventos acumulados en la zona de estudio se muestra en la **Figura 9**. La pendiente es relativamente constante y la frecuencia es relativamente homogénea en el tiempo; según Condori & Pérez (2015), esto indica una buena calidad de los datos contenidos en el catálogo sísmico. Para Heras (2002), si la curva acumulativa de los sismos es de forma lineal, como en este caso, indica homogeneidad de la base de datos utilizada.

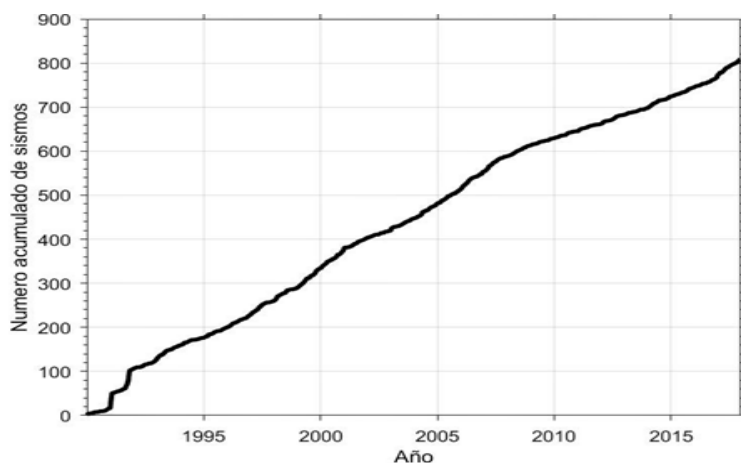


Figura 9. Número de sismos acumulados en el tiempo entre 1990 y 2017.
Fuente: ZMAP.

7.2. MAGNITUD MÍNIMA DE COMPLETITUD

A partir del método de Máxima Curvatura (MAXC) se determinó una MC de 4.8 M_w para el catálogo sísmico del periodo 1990 – 2017; y mediante el método de MAXV se estimó un valor medio de b de 1.18, caracterizando un predominio de sismos de pequeña magnitud.

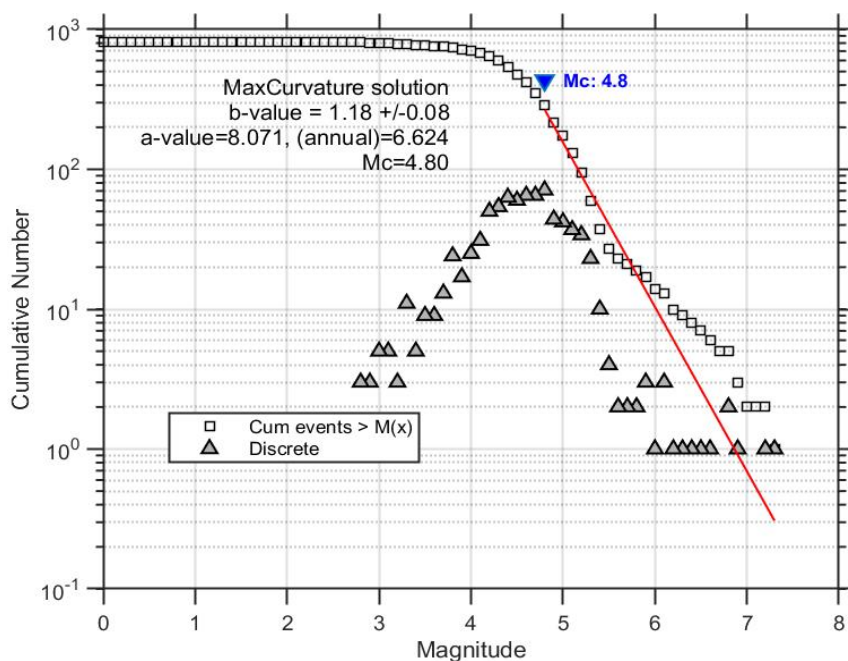


Figura 10. Gráfico de la distribución frecuencia- magnitud para el catálogo sísmico depurado.

Fuente: ZMAP.

En la **Figura 10** se indica en azul la magnitud mínima de completitud, dentro de la distribución acumulada de los eventos (representada por los cuadrados), que a su vez corresponde con el punto más alto de la distribución no acumulativa (representada por triángulos). La línea roja representa la relación de Gutenberg - Richter correspondiente a esta distribución.

El valor de la magnitud mínima de completitud obtenido (4.8 M_w) se encuentra en el rango esperado según los antecedentes consultados, algunos de estos son: Orosco & Haarala (2010) con una MC calculada de 4.2 M_w , Triviño (2017) con una MC de 4.9 M_w y la estimada por Arroyo (2017) de 5.0 M_w .

También, es posible apreciar los valores medios de a (8.071) y de b (1.18), los cuales hacen referencia al nivel de sismicidad y a los niveles de esfuerzos acumulados y liberados en la zona de estudio respectivamente. Según Chávez (2014) para un análisis regional, un valor alto de b (varía entre 0.6 y 1.5) determina que el área de estudio es poco resistente y tiende a fracturarse antes que los esfuerzos alcancen un valor elevado, así mismo, indica que un valor de $b > 1$ caracteriza un predominio de sismos de pequeña magnitud; por otro lado, un valor bajo de b (menor de 0.6) indica mucha resistencia del medio a los esfuerzos, produciendo terremotos de gran magnitud al romperse.

En la **Figura 11** se puede apreciar como los valores de b en la zona sur occidente del país se encuentran alrededor de 1.0, los cuales encajan en los valores obtenidos por Condori & Pérez (2015) con un rango entre 0.6 – 1.3 para la región del Valle del Cauca y sus alrededores.

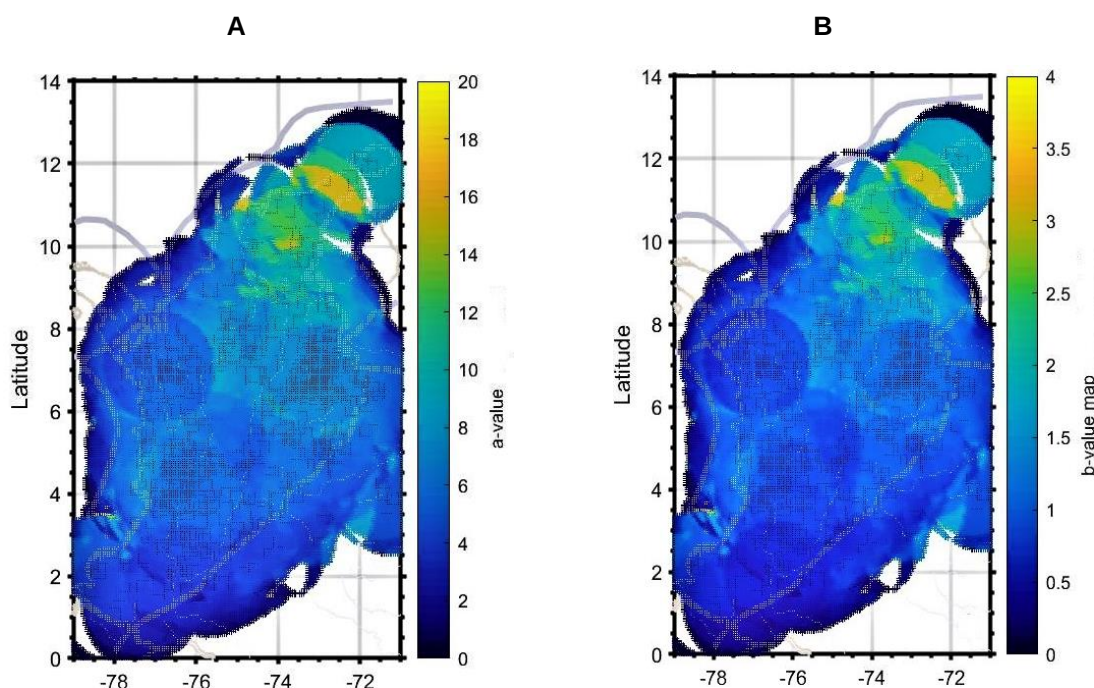


Figura 11. A. Valor de a calculado en el área de estudio. B. Valor de b calculado en el área de estudio
Fuente: ZMAP.

7.3. ANÁLISIS ESPACIAL

➤ Análisis Exploratorio de Datos Espaciales

A partir de la distribución de los eventos observada a continuación, se puede apreciar que el tipo de patrón que representa los sismos es agregado.

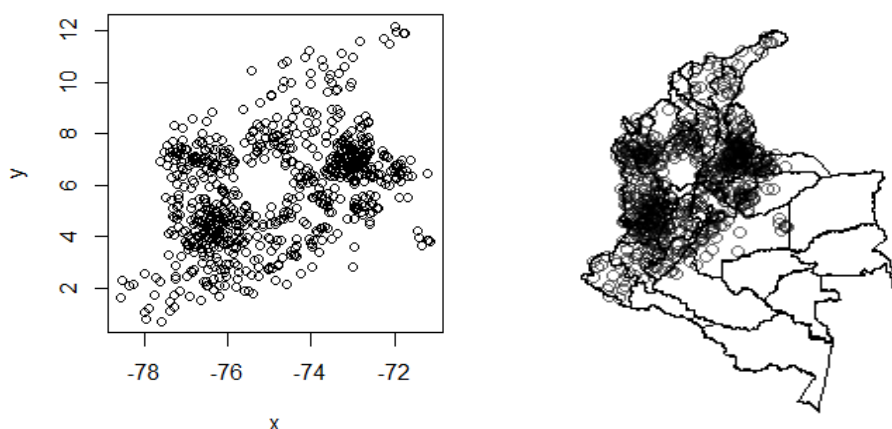


Figura 12. Patrón puntual de los sismos en Colombia ocurridos en 1990 - 2017.
Fuente: R.

A continuación, se presentan los gráficos de frecuencia de los sismos en función de los años, meses, días y hora de la ocurrencia de estos. El año que más sismos registró es el de 1991 con un total de 87 eventos, seguido por los años 1999 y 2000 con 45 y 44 eventos respectivamente. De igual manera, se puede apreciar que el mes de enero es el que más eventos registra con 112 sismos, seguido por los meses de octubre con 78 y mayo con 75 eventos.

La frecuencia de los sismos respecto a los días y hora de ocurrencia, presenta valores muy variantes, es decir, no es posible definir ciertos periodos en los que se expone un mayor número de eventos.

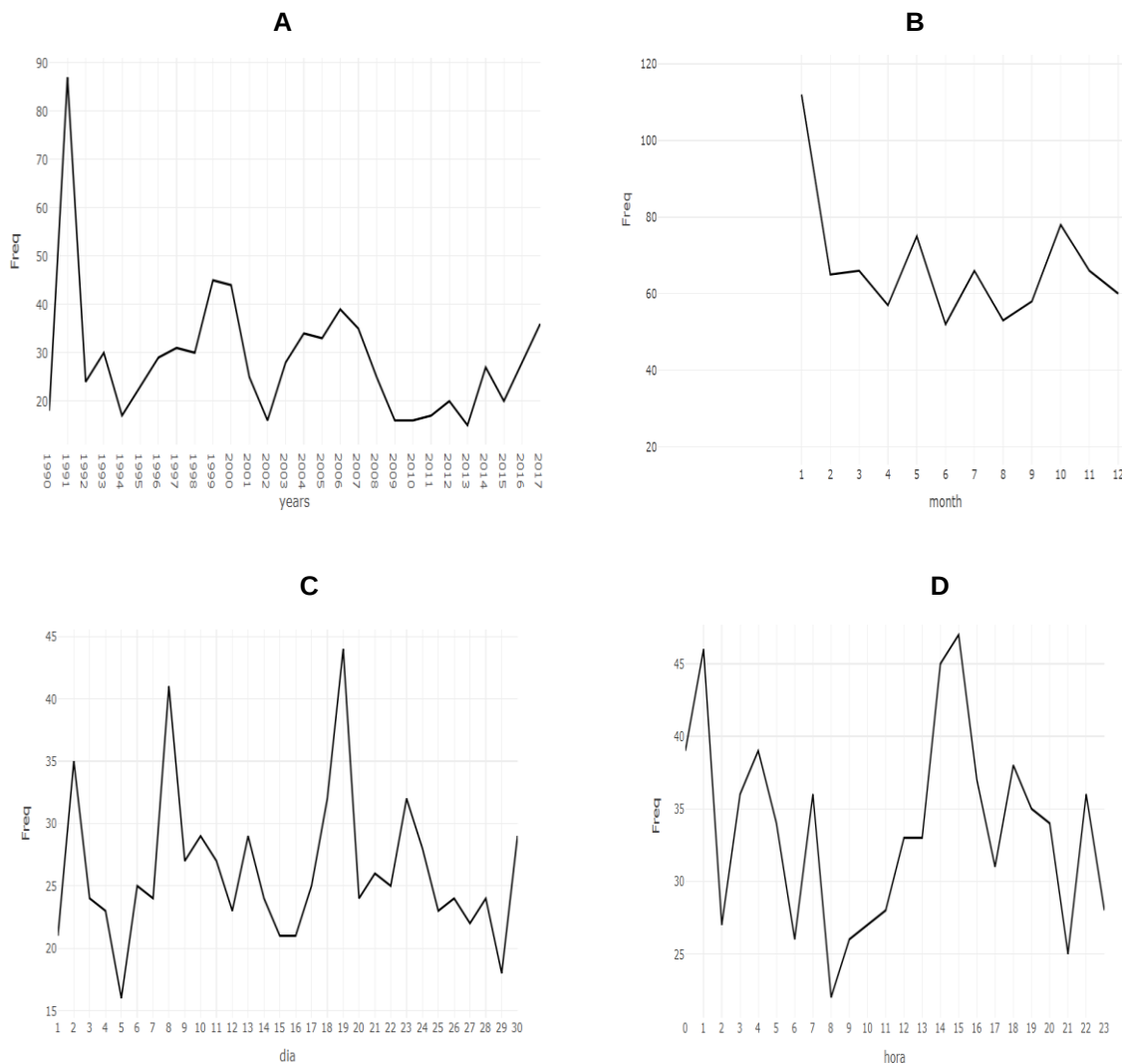


Figura 13. A. Frecuencia de sismos por año. B. Frecuencia de sismos por mes. C. Frecuencia de sismos por día. D. Frecuencia de sismos por hora. Fuente: R.

En los anexos se presentan las tablas de las respectivas distribuciones de las frecuencias de los sismos, por año, mes, día y hora.

Por otro lado, la **Figura 14** presenta la serie de tiempo sísmica compuesta por la frecuencia de los sismos en función del mes y año de ocurrencia. Según Rodríguez (2018), un supuesto fundamental en el análisis espacial de los datos, es que el fenómeno sea estacionario.

En el mes de enero del año 1991 se presentan un total de 32 eventos identificados como una anomalía en la serie de tiempo sísmica, es posible que algunos de estos eventos sean réplicas o premonitorios, pero según la metodología utilizada no fueron posible de identificar.

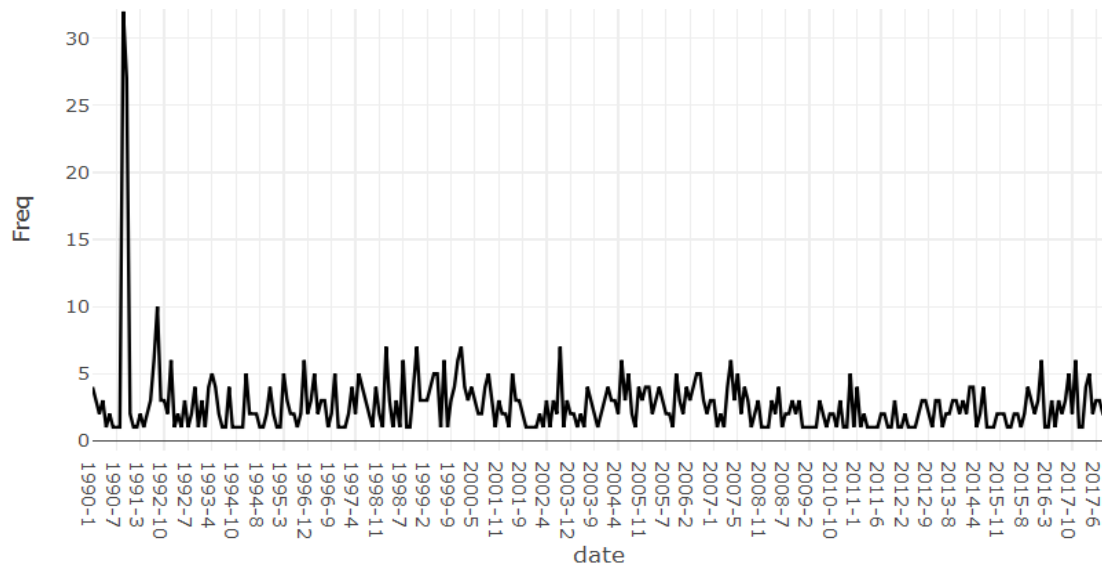


Figura 14. Serie de tiempo sísmica.
Fuente: R.

Para probar estacionariedad se emplearon las funciones de autocorrelación **ACF** y **PACF**, las cuales miden el grado de dependencia lineal entre las observaciones próximas. La **Figura 15** exhibe, que la dependencia temporal se acerca a cero rápidamente, indicando estacionariedad.

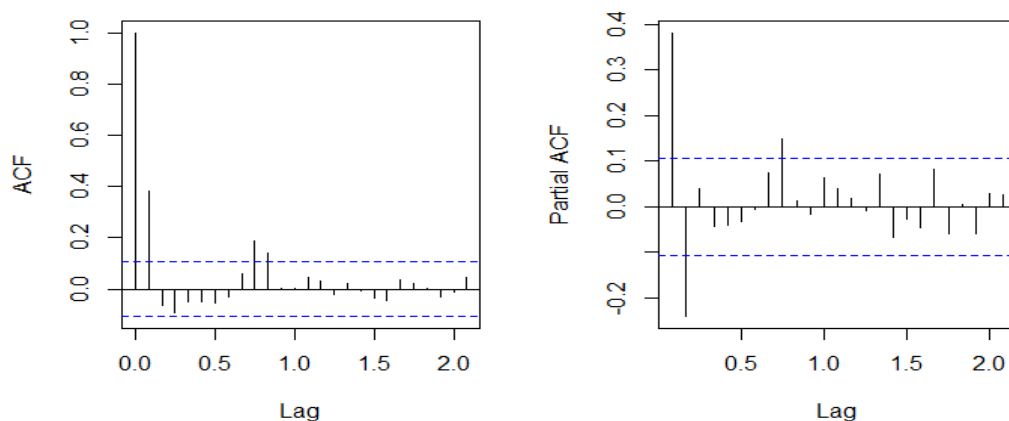


Figura 15. ACF y PACF de la serie de tiempo.
Fuente: R.

También se presenta la descomposición aditiva de la serie. Por medio de la descomposición de señales se puede modelar de forma específica la componente irregular. En la **Figura 16** se observan las componentes de tendencia, estacionalidad y ruido de la serie de tiempo aditiva.

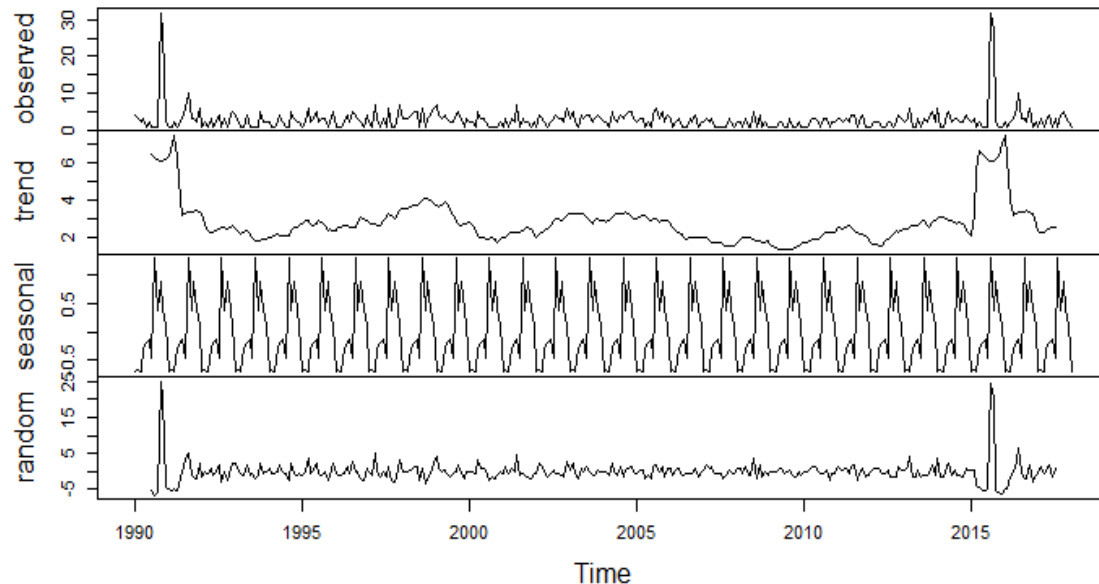


Figura 16. Descomposición aditiva de la serie de tiempo sísmica.
Fuente: R.

En la **Figura 16** se puede observar en primer lugar, que la serie presenta un comportamiento estacional muy marcado, indicando que hay ciertas épocas del año se presenta una mayor actividad, en este caso el primer trimestre. Adicionalmente se observa que la tendencia de la serie es bastante estable, exceptuando dos picos con una alta actividad sísmica, a finales del año 1990 y del 2015.

A partir de la serie de tiempo aditiva es posible estimar el modelo autorregresivo integrado de promedio móvil (ARIMA), el cual es un modelo paramétrico que permite modelar una serie estacionaria mediante variaciones y regresiones de los datos estadísticos, con el fin de encontrar patrones para una predicción hacia el futuro (Cryer & Chan, 2008).

Tabla 5. Método ARIMA.
Fuente: R.

ARIMA (0,0,1) (2,0,0) [12] with non-zero mean				
COEFFICIENTS				
	ma1	sar1	sar2	mean
	0.4835	0.0103	-0.0208	2.8518
s.e.	0.0461	0.0663	0.0673	0.239
sigma^ estimated as 9.006: log likelihood=-846.65				
AIC=1703.29 AICC=1703.48 BIC=1722.39				

El modelo *ARIMA* permite identificar los coeficientes y número de regresiones que se pueden utilizar para las estimaciones futuras mediante datos del pasado.

Según Cryer & Chan (2008), este modelo se expresa como *ARIMA* (p, d, q), donde los parámetros p , d y q son números enteros no negativos que indican el orden de las componentes del modelo respectivamente (autorregresiva, integrada y de media móvil).

Por último, mediante el análisis de la **Figura 17** y la **tabla 6** se determina que las magnitudes de los eventos están entre 2.8 y 7.3 *Mw*, notándose la mayor frecuencia de estos entre las magnitudes 4 y 5 *Mw* a través del tiempo.

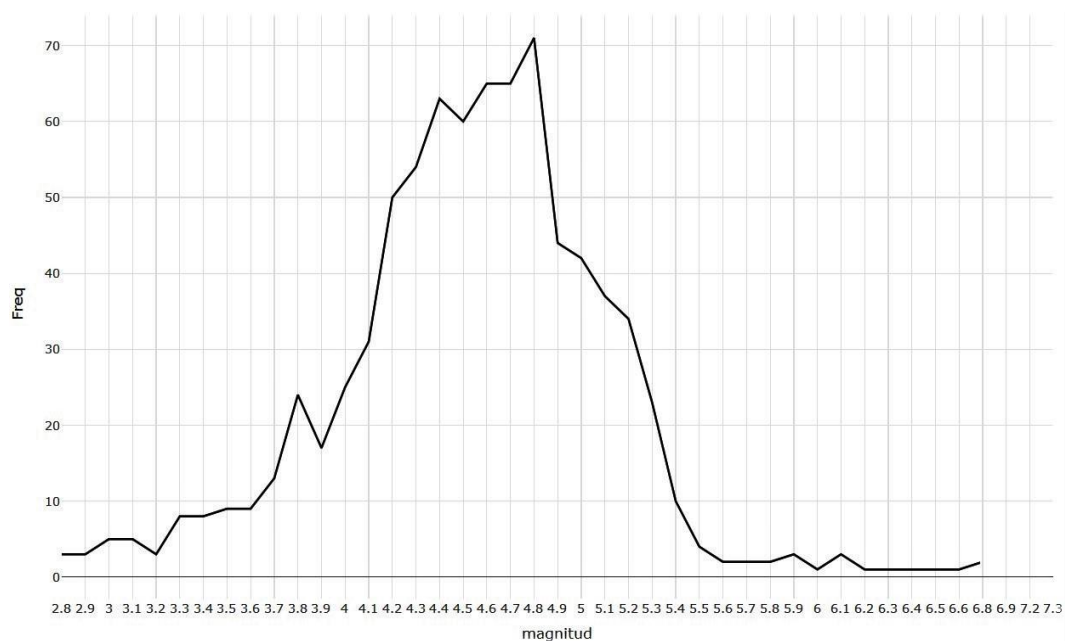


Figura 17. Frecuencia de los sismos en función de la magnitud.
Fuente: R.

Tabla 6. Magnitudes registradas a través del tiempo.
Fuente: Elaboración propia.

MAG\AÑO	1990-1993	1994-1997	1998-2001	2002-2005	2006-2009	2010-2013	2014-2017	TOTAL
≤3 Mw	8	0	3	0	0	0	0	11
3.1-4 Mw	56	7	21	17	16	2	1	120
4.1-5 Mw	76	70	104	83	74	52	87	546
5.1-6 Mw	16	16	16	11	25	12	22	118
6.1-7 Mw	2	6	1	0	0	1	1	11
>7 Mw	1	0	0	0	0	1	0	2
								808

Así mismo, podemos identificar que las profundidades en las que se presentaron los eventos están entre 2 y 238 km; existe un único evento atípico con 436 km de profundidad. Las profundidades que más eventos registraron a través del tiempo se encuentran entre los 30 y 40 km de profundidad, notándose un gran pico en la profundidad de 33 km; según Heras (2002), este valor no suele ser estimado correctamente por parte del NEIC debido a la cobertura de la red sísmica mundial y es asumido como el correspondiente a un foco de profundidad normal (superficial).

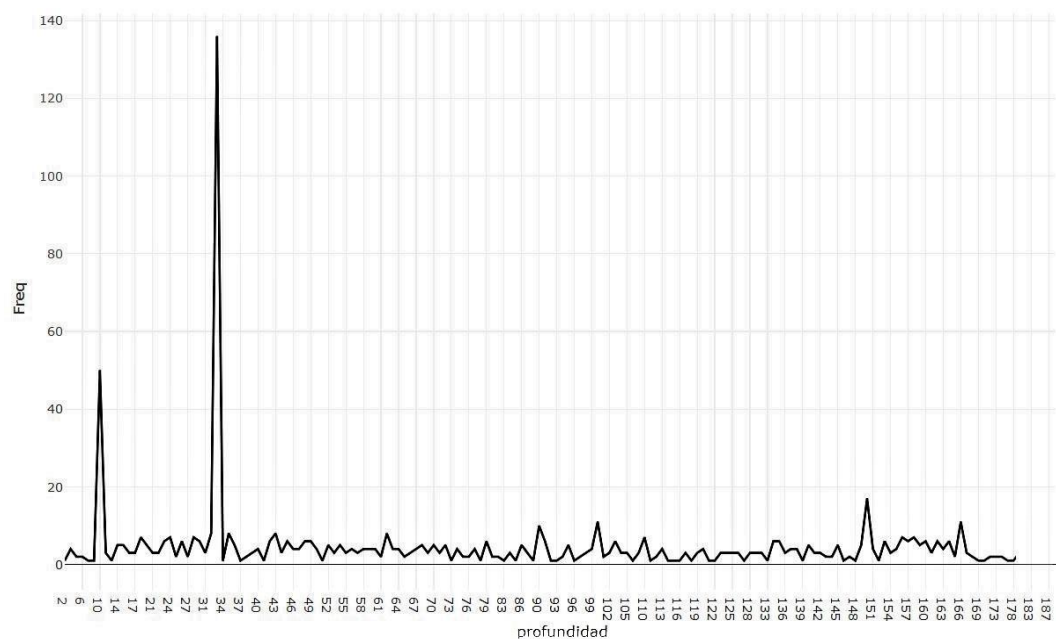


Figura 18. Frecuencia de los sismos en función de la profundidad.
Fuente: R.

Tabla 7. Profundidades registradas a través del tiempo.
Fuente: Elaboración propia.

PROF/AÑO	1990-1993	1994-1997	1998-2001	2002-2005	2006-2009	2010-2013	2014-2017	TOTAL
≤50 km	75	41	82	42	36	30	49	355
51 - 100 km	34	17	22	26	29	16	23	167
101-150 km	24	23	19	18	30	10	20	144
151- 200 km	21	16	20	23	19	12	19	130
201 - 250 km	4	2	2	2	0	0	0	10
>250 km	1	0	0	0	1	0	0	2
								808

➤ Patrones puntuales

Mediante la prueba de hipótesis de aleatoriedad espacial completa con sus métodos por cuadrantes y el gráfico de Patterson-Fry se puede confirmar que el tipo de patrón puntual que identifica a los sismos es el agregado.

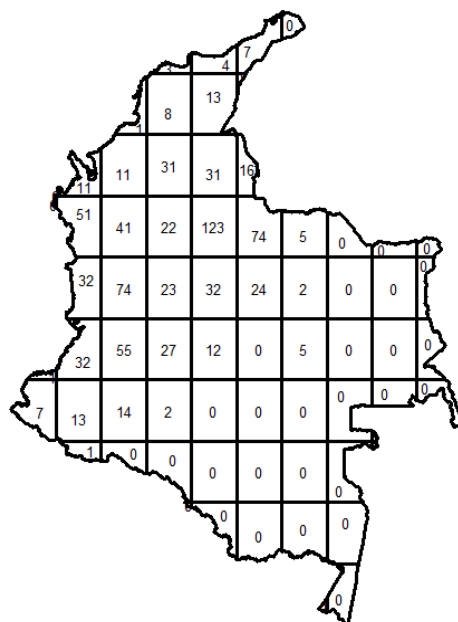


Figura 19. Conteo por cuadrantes.
Fuente: R.

Observando la **Figura 19**, se puede apreciar la agrupación de los eventos sísmicos hacia la parte norte y noroeste del país. De esta manera es posible rechazar la hipótesis de aleatoriedad del patrón puntual espacial, pues en varios recuadros sobre la zona sur y sur occidente del área de estudio predomina el valor de cero.

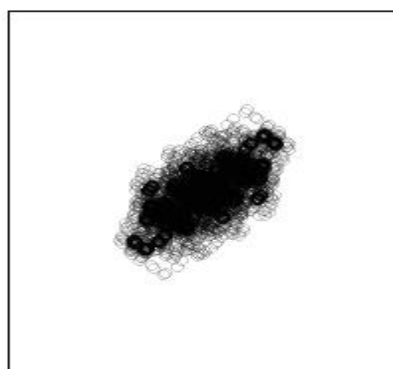


Figura 20. Gráfico de Patterson - Fry de los sismos.
Fuente: R.

Según Rodríguez (2018), si hay acumulación de puntos en el centro del gráfico, se considera que el patrón tiene agregación.

➤ Estadísticos de primer orden

La función de intensidad espacial estimada para los sismos en Colombia proporciona una idea de lo que se puede esperar que suceda en esta misma región en un futuro, debido a que el mapa de calor obtenido identifica cuales son las zonas con más probabilidad de registrar sismos en los próximos años.

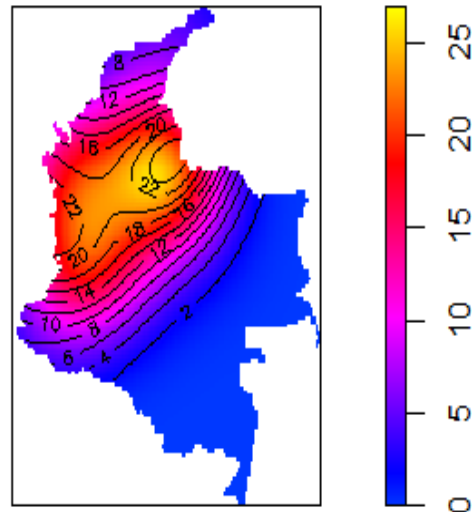


Figura 21. Estimación de la intensidad espacial.
Fuente: R.

A partir de la **Figura 21** se identifican las regiones andina y pacífica con las de mayor actividad sísmica en Colombia, y la región amazonas como la de menor actividad, con un registro casi nulo de eventos sísmicos.

Según Rodríguez (2018), una forma para comprender un mapa de calor es mediante el conteo por cuadrantes que contiene colores en lugar de números.

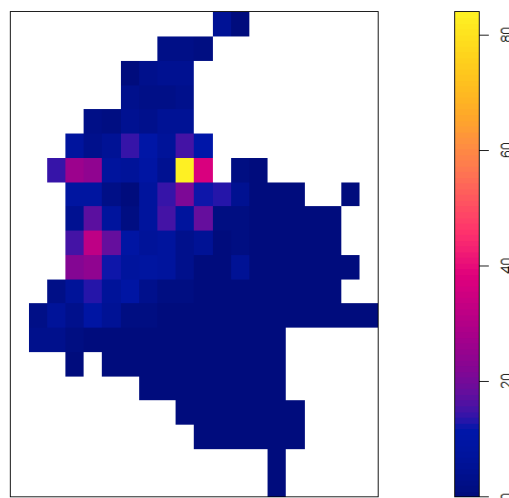


Figura 22. Conteo por cuadrantes de colores.
Fuente: R.

Los estadísticos descriptivos de primer orden pueden ser una función de las localizaciones espaciales, es decir, una función de x e y , y se puede representar como una superficie de tres dimensiones (3D) (Rodríguez, 2018).

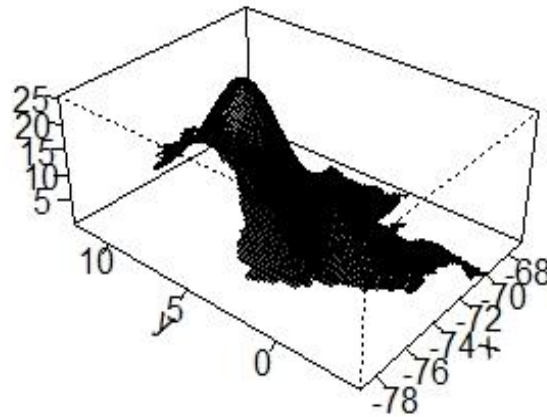


Figura 23. Superficie de la intensidad.
Fuente: R.

➤ Estadísticos de segundo orden

En la **Figura 24** se presenta la estimación de la función K , en esta función la curva azul representa un proceso completamente aleatorio, y se puede apreciar que los valores de la K -función son mayores a esta, es decir están por encima, lo cual indica agregación del patrón puntual.

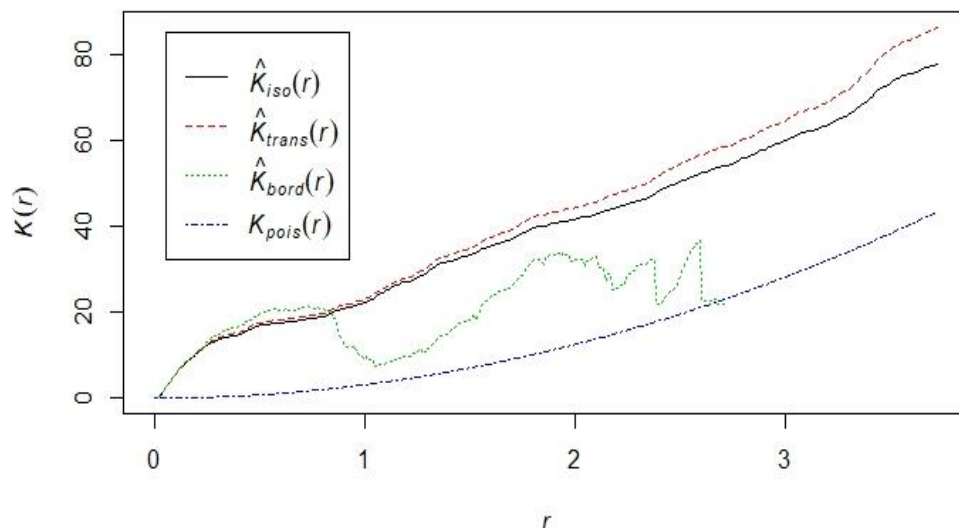


Figura 24. Estimación de la K -función de los eventos sísmicos.
Fuente: R.

De igual manera en la **Figura 25** se presenta el gráfico de la estimación de la función g , en esta función la línea verde representa un proceso completamente aleatorio con valor de $g(r) = 1$. Aquí se puede apreciar que en algunas secciones el valor de la función g es mayor a 1 indicando agrupamiento del patrón puntual espacial, mientras que en otras secciones toma el valor de 1 indicando aleatoriedad. Esto evidencia que el patrón espacial de los sismos no es totalmente agregado, sino que en ciertas zonas se comporta de manera aleatoria.

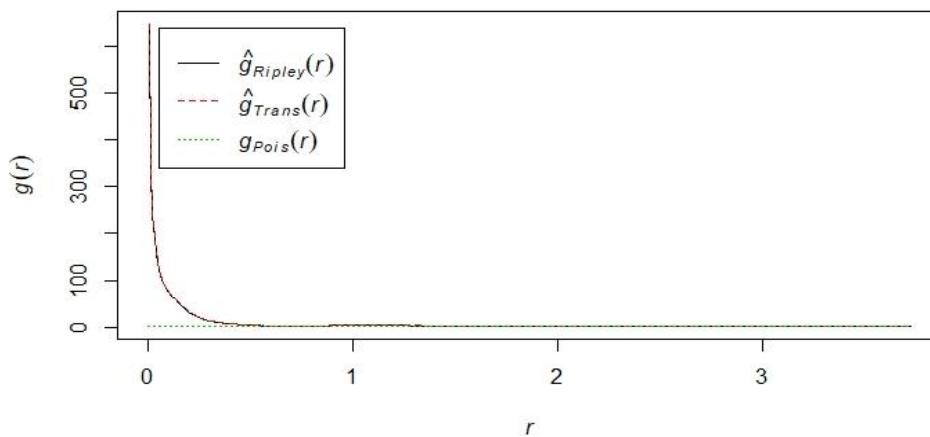


Figura 25. Estimación de la función pair correlation (g).
Fuente: R.

➤ **Bandas de confianza (Pointwise envelopes).**

En la **Figura 26** se observa que en general la k -función estimada está por fuera de la banda de confianza y por encima, lo que confirma el comportamiento agrupado de los eventos sísmicos. Así mismo, se aprecia que la función pair correlation se encuentra por dentro de la banda de confianza indicando aleatoriedad y al inicio de la gráfica está por encima de ella, representando agregación en el patrón puntual espacial.

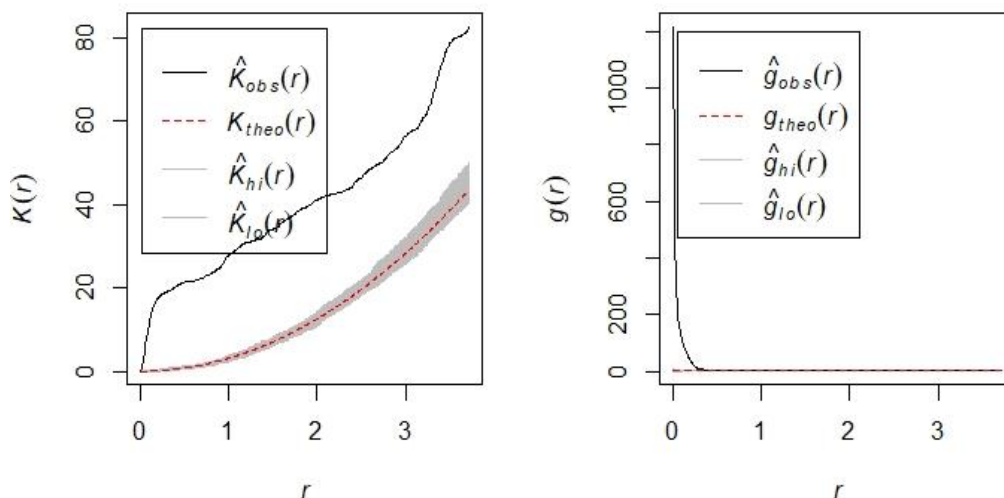


Figura 26. Bandas de confianza para la k – función y la función pair correlation (g).
Fuente: R.

Finalmente, a modo de resumen del análisis espacial realizado anteriormente, la **Figura 27** ilustra las diferentes características de su comportamiento para los sismos tectónicos ocurridos en Colombia desde 1990 hasta el 2017; primeramente (A), con la distribución del patrón puntual de los eventos sísmicos en el área de estudio, seguido (B) por el conteo de los eventos por cuadrantes y finalmente (C) con el gráfico del número promedio de puntos por unidad de área (Intensidad).

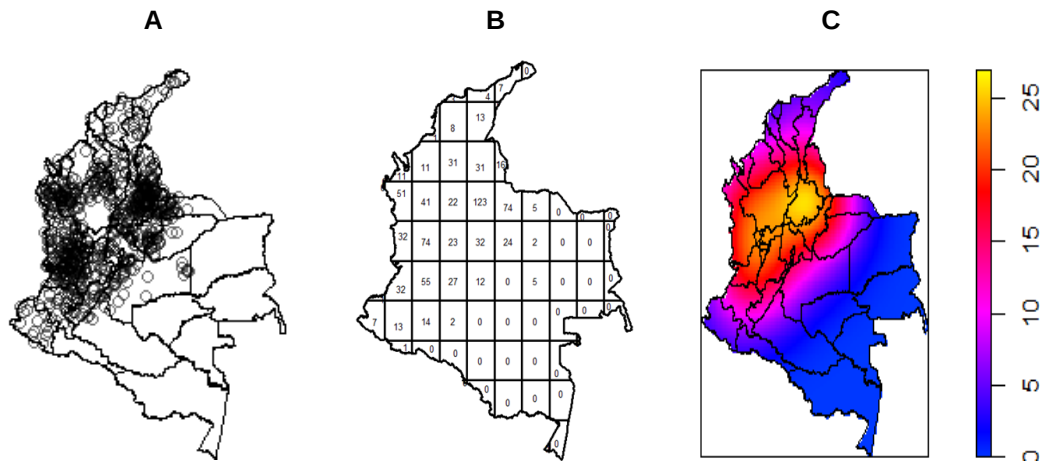


Figura 27. Comportamiento espacial de los sismos ocurridos entre 1990 - 2017.

A. Patrón puntual. B. Conteo por cuadrantes. C. Intensidad.

Fuente: R.

7.4. ANÁLISIS TEMPORAL

A partir de la **Figura 28** se puede evidenciar una intensidad temporal constante a través del tiempo, con valores entre 0.2 y 0.4 durante los años de estudio sísmico (1990 – 2017). También, es posible identificar los departamentos de Santander, Caldas, Risaralda y Quindío como los de mayor actividad sísmica en Colombia. Según Cárdenas, *et al.*, (2010), la alta intensidad en el departamento de Santander se debe al nido de Bucaramanga, catalogado como la segunda fuente sísmica activa más importante en el mundo.

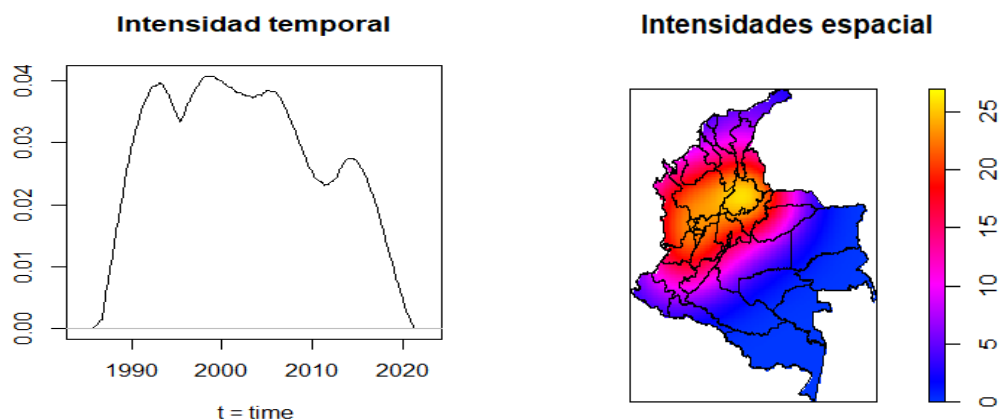


Figura 28. Intensidad temporal y espacial de los sismos.

Fuente: R.

De igual manera Cárdenas, *et al.*, (2010), determinaron los departamentos de Santander, Caldas, Risaralda, Valle del Cauca, Tolima, Antioquia, Cauca, Chocó, Córdoba, Sucre y Nariño con intensidad alta. Según el análisis generado por ellos, estos valores altos de intensidad se deben al complejo de fallas geológicas presentes en estos departamentos y por la zona de subducción de la placa Nazca con la placa Suramérica.

Tabla 8. Intensidad media por departamento.
Fuente: Elaboración propia.

DEPARTAMENTO	INTENSIDAD MEDIA
SANTANDER	24.728
CALDAS	23.214
RISARALDA	23.056
QUINDÍO	21.992
ANTIOQUIA	21.209
BOYACÁ	21.057
VALLE DEL CAUCA	19.390
TOLIMA	19.276
CUNDINAMARCA	19.113
NORTE DE SANTANDER	19.055
CHOCÓ	18.799
BOLÍVAR	15.706
CÓRDOBA	14.753
HUILA	12.767
SUCRE	12.479
CESAR	12.147
CAUCA	12.105
CASANARE	11.341
ARAUCA	10.738
MAGDALENA	8.352
META	7.736
NARIÑO	6.323
ATLANTICO	5.442
LA GUAJIRA	4.979
PUTUMAYO	3.570
CAQUETÁ	3.072
GUAVIARE	1.782
VICHADA	1.555
GUAINÍA	0.247
VAUPES	0.159
AMAZONAS	0.039

Mediante la gráfica de la intensidad espacial de la **Figura 28**, se puede determinar que la zona centro-norte del país presenta zonas con colores entre magenta, rojo y amarillo; estas regiones corresponden generalmente a valores de intensidad con un rango entre 9 y 25 eventos por cada 12 km^2 . Así mismo, se

establece que la media de eventos ocurridos por cada 12 km^2 en el país es de 8.7 para el periodo de estudio entre los años 1990 – 2017.

También es evidente que, en una mayor parte, la zona sur y suroriental del país presentan valores de intensidad nulos, debido a su baja ocurrencia de sismos. Para Cárdenas, *et al.*, (2010), los departamentos de Amazonas, Putumayo, Caquetá, Vaupés, Guaviare, Guainía, Vichada y Meta tienen una intensidad nula por la ausencia de fallas geológicas en su ubicación geográfica, indicando una baja amenaza sísmica.

A continuación, la **Figura 29** muestra la estimación de la intensidad año tras año en el territorio colombiano; al analizar su comportamiento se puede concluir que:

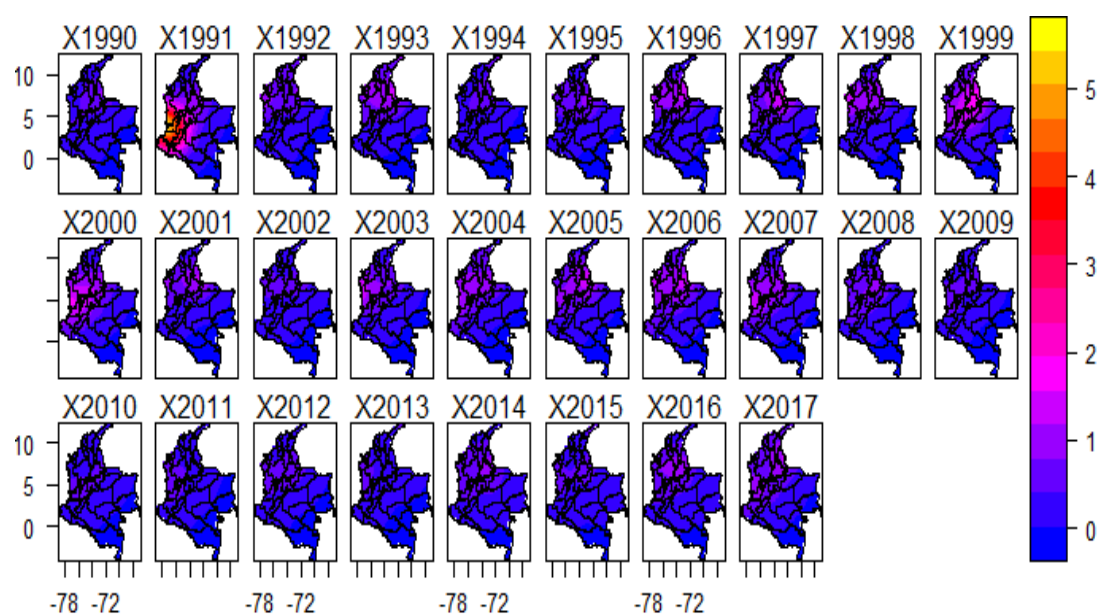


Figura 29. Intensidad espacial para cada año de ocurrencia sísmica.
Fuente: R.

- ✓ El año 1991 presenta los valores más altos de intensidad en el periodo de estudio, ilustrando valores de intensidad cercanos a 5 eventos por cada 12 km^2 en el departamento del Valle del Cauca y sus alrededores (Chocó, Quindío y Cauca).
- ✓ De la misma manera se observa que en casi todos los años, en la zona nororiental (Norte de Santander, Boyacá, Santander) y noroccidente del país (Antioquia, Chocó, Caldas) es donde se presentan las intensidades de mayor valor.
- ✓ La zona sur (Amazonas, Vaupés) y oriental del país (Vichada, Guainía), presentan valores de intensidad cero (azul) en todos los años, lo cual corresponde con lo presentado en la **Figura 12** del patrón puntual de los sismos, donde se aprecia que en estas regiones de la zona de estudio no se presentaron eventos sísmicos en ningún periodo de tiempo.

- ✓ De igual manera se pudo observar que el año 1991 es el que presenta una mayor tasa de actividad sísmica con un total de 87 eventos sísmicos ocurridos principalmente en el occidente del país; seguido por el año 1999 en el cual se identifican valores altos de intensidad en el departamento de Santander.

7.5. ANÁLISIS POR MAGNITUD

- **Sismos leves:** Representan los sismos con magnitudes menores a 4 M_w ; este grupo está compuesto por 107 sismos equivalentes al 13.2% del total de los eventos. Se identifican distribuidos mayormente en los departamentos del Valle del Cauca, Cauca, y Tolima.

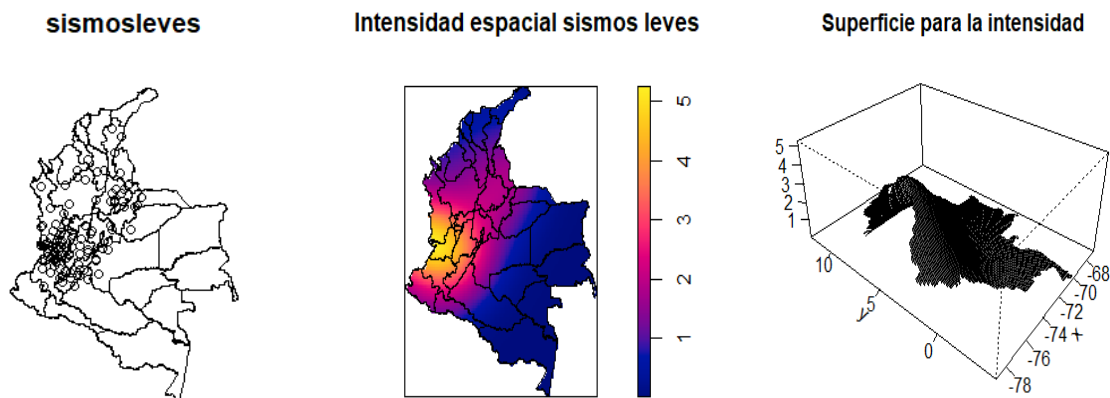


Figura 30. Comportamiento espacial de los sismos leves ocurridos entre 1990 - 2017.
Fuente: R.

- **Sismos moderados:** En este grupo se encuentran la mayoría de los eventos sísmicos, con un total de 528 eventos, representan el 65.3% del catálogo. La magnitud de estos sismos está entre $4 \leq M_w < 5$ y están distribuidos mayormente en los departamentos de Santander, Norte de Santander, Antioquia, Bolívar y Chocó.

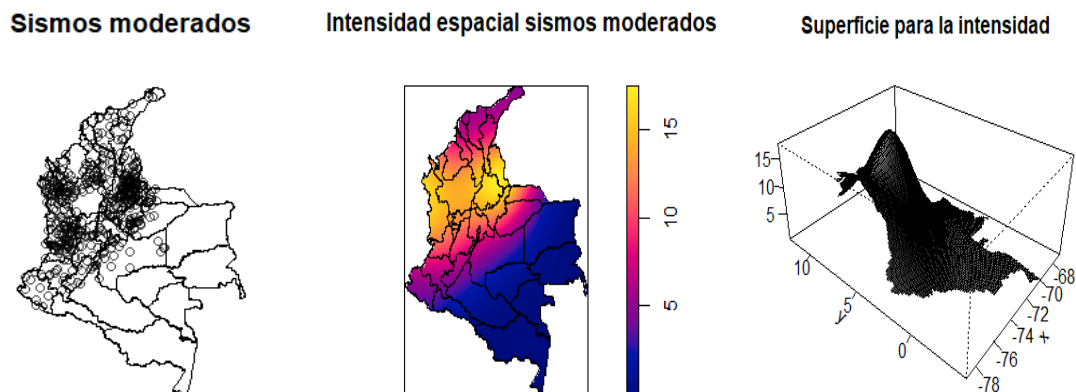


Figura 31. Comportamiento espacial de los sismos moderados ocurridos entre 1990 2017.
Fuente: R.

- **Sismos fuertes:** Representan los sismos con magnitudes en el rango $5 \leq Mw < 6$; este grupo está compuesto por 159 sismos equivalentes al 19.7% del total de los eventos. Se identifican distribuidos especialmente en los departamentos de Santander y Norte de Santander.

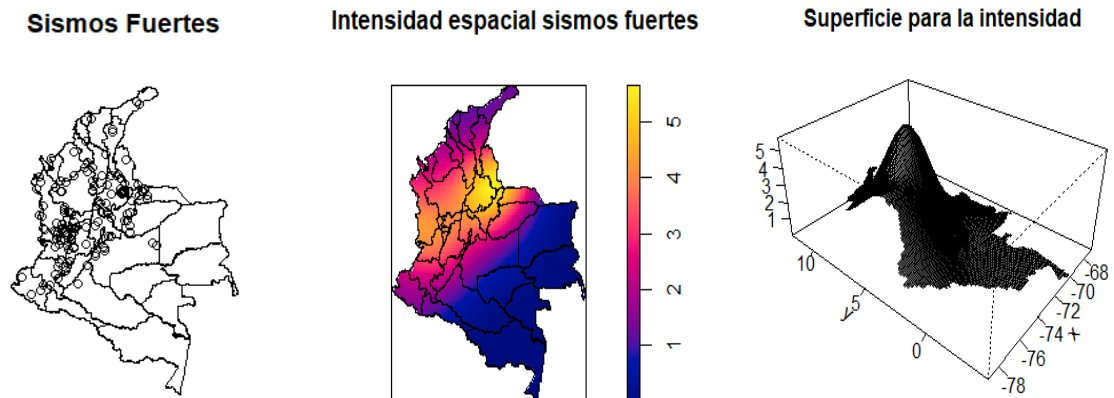


Figura 32. Comportamiento espacial de los sismos fuertes ocurridos entre 1990 2017.
Fuente: R.

- **Sismos destructivos:** Ultimo grupo de esta clasificación compuesto por los sismos de mayor magnitud, con valores mayores e iguales a 6 Mw ; lo conforman 14 sismos equivalentes al 1.7% del total de los eventos con mayor presencia en los departamentos del Valle del Cauca y Chocó.

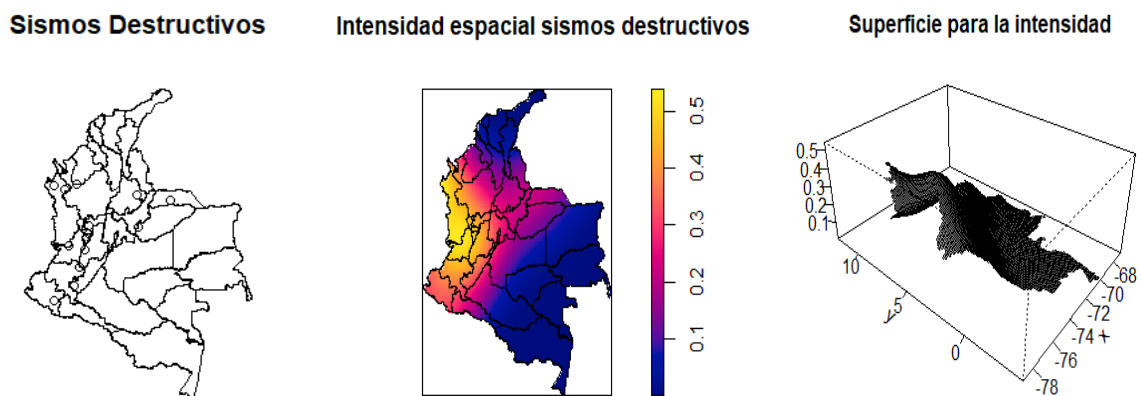
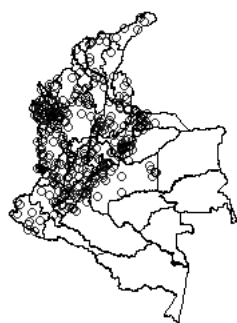


Figura 33. Comportamiento espacial de los sismos destructivos ocurridos entre 1990 2017.
Fuente: R.

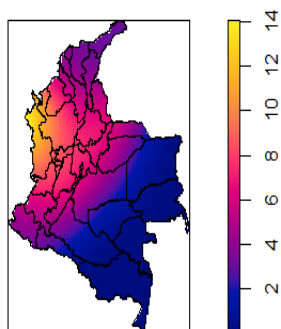
7.6. ANÁLISIS POR PROFUNDIDAD

- **Sismos superficiales:** Representan los sismos con profundidades menores a 50 km; este grupo está compuesto por 350 sismos equivalentes al 43.3% del total de los eventos. Se identifican distribuidos por toda el área de actividad sísmica en el país, especialmente en el departamento del Chocó.

Sismos Superficiales



Intensidad espacial sismos superficiales



Superficie para la intensidad

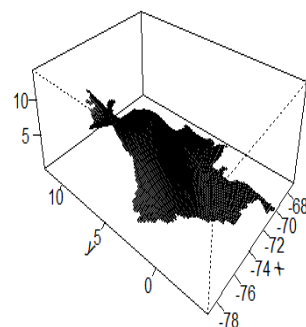
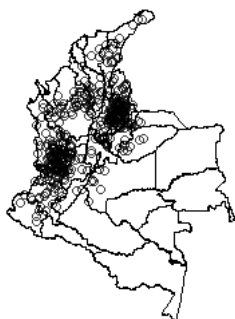


Figura 34. Comportamiento espacial de los sismos superficiales ocurridos entre 1990 2017.

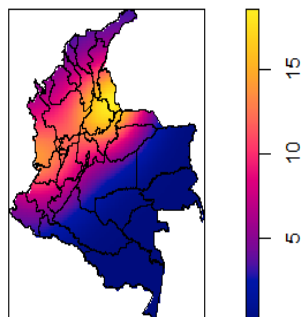
Fuente: R.

- **Sismos Intermedios:** Este grupo representan los sismos con profundidades entre 50 y 300 km; está compuesto por 457 sismos equivalentes al 56.6% del total de los eventos. Se identifican distribuidos fuertemente en los departamentos de Santander, Norte de Santander y Valle del Cauca.

Sismos Intermedios



Intensidad espacial sismos intermedios



Superficie para la intensidad

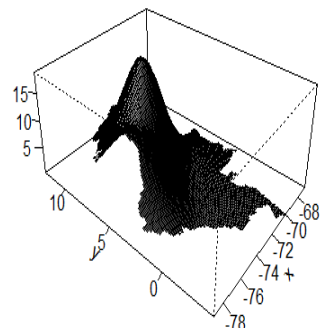


Figura 35. Comportamiento espacial de los sismos intermedios ocurridos entre 1990 2017.

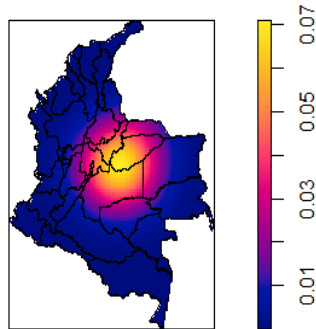
Fuente: R.

- **Sismos profundos:** Representan los sismos con profundidades mayores a 300 km; solo se identifica un evento con 436 km ubicado en el departamento de Casanare ocurrido el 29 de enero del 2007 con una magnitud 5.3 Mw.

sismosprofundos



Intensidad espacial sismos profundos



Superficie para la intensidad

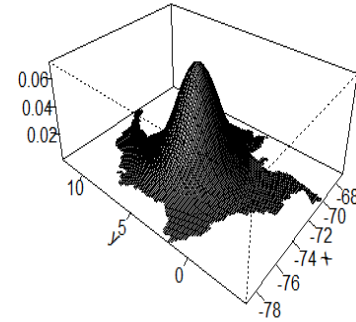


Figura 36. Comportamiento espacial de los sismos profundos ocurridos entre 1990 2017.
Fuente: R.

8. CONCLUSIONES

- ✓ El catálogo sísmico obtenido por parte de NEIC del USGS, permitió un buen análisis espacio – temporal de los sismos ocurridos en Colombia para los años 1990 – 2017; la magnitud de los sismos fue homogenizada a M_w y la depuración se realizó considerando varios factores como la zona de estudio y mediante la identificación de las réplicas y los eventos premonitorios; de esta manera, el catálogo sísmico final presentó una buena homogeneidad y calidad en sus datos, quedando compuesto por 808 eventos sísmicos con magnitudes entre 2.8 y 7.3 M_w y profundidades entre 2 y 436 km.
- ✓ Se determinó que el tipo de patrón puntual espacial que mejor se ajusta al comportamiento de los eventos sísmicos registrados en el catálogo del proyecto es el agregado, de manera gráfica mediante las ubicaciones de los sismos en el espacio (*longitud, latitud*) y mediante el rechazo de la hipótesis CSR con sus métodos de conteo por cuadrantes y el gráfico de Patterson – Fry. De la misma manera, al analizar y describir la estructura de correlación espacio-temporal existente entre los eventos mediante la *K – función* y la función *pair correlation* con sus respectivas bandas de confianza se pudo reafirmar que el comportamiento agrupado es el que describe el patrón puntual de los eventos sísmicos.
- ✓ Los mapas de intensidad generados permitieron determinar las zonas sísmicas potenciales y la evolución de su distribución durante los años 1990 y 2017 en Colombia. Los departamentos Amazonas, Vaupés, Guainía, Vichada, Guaviare, Caquetá y Putumayo tienen una intensidad casi nula, mientras que Arauca, Casanare, Huila, Bolívar, Cundinamarca, Boyacá, y Norte de Santander presentan una intensidad media y por último, los departamentos que mayor intensidad exhiben son Santander, Caldas, Valle del Cauca, Risaralda, Tolima, Chocó, Cauca y Antioquia.
- ✓ A través del análisis temporal se logró identificar la proporción de los sismos a través del tiempo, estableciendo las zonas con mayor ocurrencia de sismos año tras año durante el periodo de análisis temporal del proyecto, atribuidas a los departamentos de Norte de Santander, Boyacá, Santander, Antioquia, Chocó, Caldas, Valle del Cauca, Quindío y Cauca.
- ✓ La clasificación de los eventos sísmicos por su magnitud y profundidad representan un valioso argumento para estudios de análisis de riesgo y amenaza sísmica. En Colombia durante los años 1990 - 2017 predominaron los sismos moderados con magnitudes entre 4 y 5 M_w , con más del 65% de los eventos; de igual manera, los sismos intermedios con un rango entre 50 y 300 km de profundidad son los de mayor registro con un 56.6% del total de los eventos sísmicos.

9. RECOMENDACIONES

- ❖ Teniendo en cuenta que el catálogo de NEIC del USGS utilizado permitió un buen análisis espacio – temporal de los sismos ocurridos en Colombia para los años 1990 – 2017, es válido aclarar que por falta de recurso humano y el ajustado cronograma planteado para el desarrollo de este proyecto, no fue posible utilizar el catálogo sísmico del Centro Sismológico Internacional (ISC), el cual posee una mayor cantidad de registros sísmicos para el período de investigación, con diferentes fuentes de localización. Esto permitiría deducir relaciones propias para la conversión de magnitudes, mediante un análisis de correlación lineal entre magnitudes.
- ❖ Para un análisis espacio temporal más profundo se recomienda acotar las escalas en el área de estudio a nivel departamental, y las ventanas temporales a nivel mensual; de esta manera se podrá caracterizar ampliamente el comportamiento del patrón puntual espacial de los sismos.
- ❖ A partir del método de Gardner & Knopoff (1974) fue posible identificar aproximadamente el 65% de los eventos como réplicas y premonitorios, pero según lo analizado en el mes de enero del año 1991 es posible que algunos eventos no pudieran ser identificados mediante esta metodología; debido a que en ocasiones los eventos quedaban muy cerca de los límites de los rangos espacial y temporal establecidos.
- ❖ Es conveniente resaltar que para próximos estudios sería ideal incluir un análisis espacio temporal de los sismos acompañado por las fallas geológicas presentes en el territorio colombiano, de esta manera se podría correlacionar estas como fuentes generadoras de sismos.

10. BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, C., Salcedo, E., (2007). INTENSIDADES DEL SISMO DE PIZARRO – CHOCÓ DEL 15 DE NOVIEMBRE DE 2004 EN CALI – COLOMBIA. Revista Épsilon, No. 9, Pág.: 57-72.

Arroyo, M., Godínez, K., Linkimer, L., (2017). COMPLETITUD DEL CATÁLOGO DE LA RED SISMOLOGÍCA NACIONAL DE COSTA RICA DURANTE 1975–2014. Boletín de Geología, Vol. 39, No. 3, Pág: 87–98.

Bolaños, A., Monroy O., (2004). ESPECTROS DE PELIGRO SÍSMICO UNIFORME. Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú.

Cahuari, A., (2008). CÁLCULO DE LA MAGNITUD LOCAL (ML) A PARTIR DE REGISTROS DE ACELERACIÓN USANDO LA TÉCNICA DE DECONVOLUCIÓN Y RELACIÓN DE MAGNITUDES. Tesis para optar el grado de Ingeniero Geofísico, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Caneva, A., Salcedo, E., Van Hissenhoven, R., Alfaro, A., (2004). ESTUDIO DE SISMICIDAD REGIONAL PARA EL ANÁLISIS DE LA AMENAZA SÍSMICA DE BOGOTÁ. Ingeniería y Universidad, Vol. 8, No. 1, Pág: 9-28.

Cárdenas, C., Garzón, Y., Santa, L., Castillo, L., (2010). MODELO DE POISSON PARA LA OCURRENCIA Y MAGNITUD ESPACIO – TEMPORAL DE LOS SISMOS EN COLOMBIA. Revista UD y la GEOMATICA, Vol. 4, Pág: 28-43.

Carrillo, W., Bernal, N., Porras, P., (2013). EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE UNA PEQUEÑA MESA VIBRATORIA PARA ENSAYOS EN INGENIERÍA SISMO - RESISTENTE. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 23, No. 1, Pág: 89 - 106.

Chávez, O., (2014). ANÁLISIS ESPACIO – TEMPORAL DE LA SISMICIDAD EN EL ESTADO DE OAXACA (1995-2012), Tesis para optar el grado de Ingeniero Geofísico, Instituto Politécnico Nacional.

Condori, C., Pérez, J., (2015). ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN ESPACIO – TEMPORAL DEL VALOR DE b EN EL VALLE DEL CAUCA, SUROCCIDENTE DE COLOMBIA. GEOS, Vol. 35, No. 2, Pág: 325-340.

Crespo, M., (2011). ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN LA PENÍNSULA IBÉRICA CON UN MÉTODO BASADO EN ESTIMADORES DE DENSIDAD KERNEL. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

Cryer, J., Chan, K., (2008). TIME SERIES ANALYSIS WITH APPLICATIONS IN R, Second Edition. Springer the language of science.

Díaz, A., (2002). GEOESTADÍSTICA APLICADA. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis para optar el grado en Ingeniería Geofísica, Instituto Politécnico Nacional.

Edwards, B., Douglas, J., (2014). MAGNITUDE SCALING OF INDUCED EARTHQUAKES. Geothermics, Vol. 52, Pág: 132 – 139.

Franco, E., Rengifo, F., Llanos, D., Pérez, J., Bedoya, N., Bermúdez, M., Martínez, S., Duarte, J., Rengifo, R., Ojeda, A., (2002). SISMICIDAD REGISTRADA POR LA RED SISMOLOGICA NACIONAL DE COLOMBIA DURANTE EL TIEMPO DE OPERACIÓN: JUNIO DE 1993 HASTA AGOSTO DE 2002. INGEOMINAS, Subdirección de Amenazas Geoambientales.

Gamboa, D., Arbeláez, J., (2014). ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE LA SISMICIDAD DEL VALLE DEL CAUCA Y ZONAS ALEDAÑAS. Tesis para optar el grado de Estadístico, Universidad del Valle.

Gardner, J., Knopoff, L., (1974). IS THE SEQUENCE OF EARTHQUAKES IN SOUTHERN CALIFORNIA WITH AFTERSHOCKS REMOVED, POISSONIAN? Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 64, No. 5, Pág: 1363- 1367.

Giraldo, R., (2011). INTRODUCCIÓN A LA GEOESTADÍSTICA. Teoría y Aplicación, Universidad Nacional de Colombia.

Gómez, A., Salcedo, E., (2002). LEYES DE ATENUACIÓN DE LA INTENSIDAD MACROSÍSMICA EN COLOMBIA. Geofísica Colombiana, Vol. 6, Pág: 53-61.

Gómez, A., Salcedo, E., Bindí, D., Choy, J., García, J., (2014). LOCALIZACIÓN Y MAGNITUD DEL TERREMOTO DE 1785 EN COLOMBIA CALCULADAS A PARTIR DE INTENSIDADES MACROSÍSMICAS. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Vol. 38, Pág: 206-217.

Gómez, Y., (2015). ANÁLISIS DE PARÁMETROS SÍSMICOS DE DOS SERIES OCURRIDAS EN EL SUR Y ESTE DE ESPAÑA. Tesis para optar el grado en Ingeniería Geomática y Topografía, Universidad Politécnica de Madrid.

Gutenberg, B., Richter, C., (1944). FREQUENCY OF EARTHQUAKES IN CALIFORNIA. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 34, No. 4, Pág: 185-188.

Guzmán, J., Vela, Y., (2015). DETERMINACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA EN SANTANDER MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS. Tesis para optar el grado de Ingeniero Catastral y Geodesta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Heras, H., (2002). ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL VALOR DE “b” EN LA ZONA DE SUBDUCCIÓN DE PERÚ. Tesis para optar el grado de Ingeniero Geofísico, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Husen, S., Hardebeck, J., (2010). EARTHQUAKE LOCATION ACCURACY. Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), www.igac.gov.co/. Consultado el 20/06/2018.

Macedo, J., (2013). EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE PRESAS DE TIERRA EN TERMINOS DE LA VARIABILIDAD DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO. Tesis para optar el grado de Maestro en Ciencias con mención en Ingeniería Geotécnica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima – Perú.

Mignan, A., Woessner, J., (2012). ESTIMATING THE MAGNITUDE OF COMPLETENESS FOR EARTHQUAKE CATALOGS. Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis.

Moncada, I., (2018). ANÁLISIS ESPACIO – TEMPORAL DE LOS ACCIDENTES DE TRÁNSITO EN BOGOTÁ UTILIZANDO PATRONES PUNTUALES. Tesis para optar el grado de Magister en Estadística, Universidad Nacional de Colombia.

Orosco, L., Haarala, M., (2010). ESTIMACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA QUE AFECTA A LA CIUDAD DE SALTA. Cuadernos de la Facultad, Universidad Católica de Salta, No. 5, Pág: 72 - 106

Puruhuaya, V., Kosaka, R., (2006). CARACTERÍSTICAS ESPACIO – TIEMPO DE LA SISMICIDAD SUPERFICIAL EN LA REGIÓN SUR DEL PERÚ DURANTE EL PERIODO DE 1976 A 2005. Ciencia y Desarrollo, Vol. 7, No. 5, Pág: 37 – 41.

Quirós, L., (2017). MODELIZACIONES Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO SÍSMICO A ESCALA URBANA, APLICACIÓN A LA CIUDAD DE LORCA. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

Rodríguez, F., (2018). SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ESTADÍSTICA. Universidad Nacional de Colombia.

Salcedo, E., Pérez, J. (2016). CARACTERIZACIÓN SISMOTECTÓNICA DE LA REGIÓN DEL VALLE DEL CAUCA Y ZONAS ALEDAÑAS A PARTIR DE MECANISMOS FOCALES DE TERREMOTOS. Boletín de Geología, Vol. 38, No. 3, Pág: 89-107.

Scordilis, E., (2006). EMPIRICAL GLOBAL RELATIONS CONVERTING Ms AND mb TO MOMENT MAGNITUDE. Journal of Seismology, Vol. 10, Pág: 225-236.

Servicio Geológico Colombiano (SGC), <https://www2.sgc.gov.co/>. Consultado el 22/06/2018.

Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), <https://www.usgs.gov/>. Consultado el 22/06/2018.

Stepp, J., (1972). ANALYSIS OF COMPLETENESS OF THE EARTHQUAKE SAMPLE IN THE PUGET SOUND AREA AND ITS EFFECT ON STATISTICAL ESTIMATES OF EARTHQUAKE HAZARD. Proceedings of the International Conference on Microzonation, Vol. 2, Pág: 897-910.

Taboada, A., Dimaté, C., Fuenzalida, A., (1998). SISMOTECTONICA DE COLOMBIA: DEFORMACIÓN CONTINENTAL ACTIVA Y SUBDUCCIÓN. Física de la Tierra, Vol. 10, Pág: 111-147.

Triviño, M., (2017). ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA CAUSADA POR EL PROCESO DE SUBDUCCIÓN Y SU IMPACTO SOBRE LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS PARA LA REGIÓN DE AMÉRICA LATINA Y EL

CARIBE. Tesis para optar el grado de Magister en Geografía, Universidad Nacional de Colombia.

Vinueza, G., (2016). ESTIMACIÓN Y MODELACIÓN ESPACIAL DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA ASOCIADA A GRANDES TERREMOTOS DE SUBDUCCIÓN INTERFASE MEDIANTE MODELOS CON DEPENDENCIA TEMPORAL EN LA COSTA OESTE DE SUDAMÉRICA. Tesis para optar el grado de Ingeniería en Geografía y Medio Ambiente, Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador.

Wiemer, S., Malone, S., (2001). A SOFTWARE PACKAGE TO ANALYZE SEISMICITY: ZMAP, Seismological Research Letters, Vol. 72, No. 2, Pág: 374-383.

11. ANEXOS

11.1. CÓDIGO EN R

```
## LIBRERIAS ##
```

```
require (spatstat)
require (rgdal)
require (maptools)
require (sp)
require (raster)
require (stpp)
require (plot3D)
require (KernSmooth)
require (plotly)
require (forecast)
require (rasterVis)
```

```
## CARGANDO LOS DATOS ##
```

```
Colombia <- readOGR("colombia.shp")
Colombia <- as.owin(Colombia)
sismos=read.csv("Catalogo_1990_2017.csv",sep=";")
```

```
## CREANDO PATRON PUNTUAL ##
```

```
terremotos <-as.3dpoints(cbind(sismos$longitude,sismos$latitude,sismos$year))
terremotospp <- ppp(x=terremotos[,1],y=terremotos[,2],window=Colombia)
```

```
## DESCOMPOSICION DE LA SERIE DE TIEMPO – ACF, PACF y ARIMA##
```

```
years=sismos$year
res_year=table(years)
res_year=as.data.frame(res_year)
plot_ly(res_year, x = ~years, color = I("black")) %>% add_lines(y = ~Freq)

month=sismos$month
month=as.numeric(month)
res_month=table(month)
res_month=as.data.frame(res_month)
plot_ly(res_month, x = ~month, color = I("black")) %>% add_lines(y = ~Freq)

date=paste(years,month,sep="-")
serie_mensual=table(date)
serie_mensual=as.data.frame(serie_mensual)
plot_ly(serie_mensual, x = ~date, color = I("black")) %>% add_lines(y = ~Freq)

ts_sismos=ts(data = serie_mensual$Freq,start = 1990,end = 2018,frequency = 12)
acf(ts_sismos)
pacf(ts_sismos)
auto.arima(ts_sismos)
mod3<-arima(ts_sismos, order=c(0,0,1),seasonal=list(order=c(2,0,0)))

## CSR ##

fryplot (terremotospp, main = "Grafico de Fry de los terremotos")
cuadrantes<- quadratcount(terremotospp,10,10,cex=0.8,lwd=3, col= "black")
```

```

## PROPIEDADES DE PRIMER ORDEN ##
## INTENSIDAD ESPACIAL ##

intensidad_espacial <- density(terremotospp,diggle=TRUE)
intensidad_espacial1 <- density(terremotospp,diggle=TRUE,at="points")

## INTENSIDAD TEMPORAL ##

intensidad_temporal <- density(terremotos[,3], kernel="epanechnikov", n=400)
intensidad_temporal1<-intensidad_temporal$y[findInterval(terremotos[,3],intensidad_temporal
$x)]*dim(terremotos)[1]

## PROPIEDADES DE SEGUNDO ORDEN ##
##FUNCIONES k y g ##

Kest(terremotospp)
pcf(terremotospp)

## BANDAS DE BONDAD ##

ksismos <- envelope(terremotospp, Kest, nsim = 39, fix.n = TRUE)
gsismos <- envelope(terremotospp, pcf, nsim = 39, fix.n = TRUE)

## INTENSIDAD PARA CADA AÑO DESDE 1990 HASTA 2017 ##

intensidad_raster=rasterFromXYZ(data.frame(intensidad_espacial)[,1:3])
intensidades_raster=list()

for (i in 1990:2017){
  terremotos2=terremotos[terremotos[,3]==i,]
  terremotospp <- ppp(x=terremotos2[,1],y=terremotos2[,2],window=Colombia)
  intensidad_espacial <- density(terremotospp)
  intensidad_raster=rasterFromXYZ(data.frame(intensidad_espacial)[,1:3])
  intensidades_raster[[i-1989]]=intensidad_raster
  print(i-1989)
}

par(mfrow=c(1,1))
plot(intensidad_raster,col.regions=colorRampPalette(c("blue","magenta","yellow"))(1e3))+layer(
sp.polygons(Colombia2, lwd=0.5, col='black'))
plot(Colombia,add=T)

intensidades_raster=stack(intensidades_raster)
names(intensidades_raster)=1990:2017
Colombia2 <- shapefile("departamentos.shp")
levelplot(intensidades_raster,col.regions=colorRampPalette(c("blue","magenta","red","yellow"))(
1e3))+layer(sp.polygons(Colombia2, lwd=0.5, col='black'))
summary(intensidad_raster)

```

11.2. CATÁLOGO SÍSMICO HOMEGENIZADO Y DEPURADO

A continuación, se presenta el catálogo sísmico final dividido según la clasificación de los sismos por su magnitud (leves, moderados, fuertes y destructivos).

Los parámetros de los sismos que se describen en el catálogo son: el tiempo de ocurrencia (año, mes día, hora, minuto), la localización (Latitud y Longitud), su magnitud (en escala *M_w*) y su profundidad en kilómetros.

Tabla 9. Catálogo sísmico de eventos leves.
Fuente: Elaboración propia.

Longitud	Latitud	Fecha	Hora	Mag (Mw)	Prof (km)
-76.396	3.937	6/6/2005	00:52	3.9	135
-73.576	4.96	20/1/1991	16:24	3.9	33
-77.33	5.094	30/1/1991	05:51	3.9	33
-72.931	6.178	3/6/2003	07:10	3.9	203
-72.203	6.237	7/8/2005	12:01	3.9	60
-74.37	6.529	4/5/2004	16:12	3.9	27
-72.92	7.075	17/6/1996	08:51	3.9	100
-77.342	7.203	19/9/2006	00:04	3.9	35
-75.429	7.733	21/9/2007	07:27	3.9	79
-74.363	8.023	15/3/2006	03:11	3.9	108
-75.425	2.494	21/10/1991	16:48	3.9	33
-75.233	3.674	4/1/1991	22:47	3.9	33
-77.203	4.409	27/11/1991	19:43	3.9	33
-77.228	5.136	2/10/1991	01:23	3.9	10
-74.641	4.867	7/9/2000	12:34	3.9	10
-73.433	6.344	24/5/1999	21:01	3.9	33
-73.55	6.89	12/5/2011	03:27	3.9	14
-76.487	3.562	11/8/2004	13:59	3.8	44
-74.062	3.914	27/12/1993	07:43	3.8	68
-76.102	5.774	16/1/2000	21:13	3.8	33
-76.835	6.101	7/4/1993	03:50	3.8	33
-72.314	6.166	5/6/2005	03:15	3.8	169
-73.386	6.451	8/5/2006	16:29	3.8	134
-73.429	6.49	24/9/2006	04:01	3.8	135
-73.046	6.861	30/7/2005	01:33	3.8	157
-73.348	7.063	1/5/2004	11:50	3.8	166
-72.679	7.288	17/4/1997	09:28	3.8	150
-72.594	7.324	4/2/1991	06:15	3.8	211
-74.979	7.538	8/5/2004	22:30	3.8	52
-73.964	8.059	25/2/2005	01:39	3.8	113
-75.399	8.104	13/5/1997	03:06	3.8	150
-74.822	8.621	20/5/2008	01:58	3.8	73
-73.38	8.967	2/7/2003	14:36	3.8	33
-77.156	1.901	19/10/1991	23:38	3.8	110
-75.268	2.469	9/1/1991	16:59	3.8	33
-74.246	2.551	18/1/1991	08:47	3.8	33
-76.857	2.61	5/1/1991	20:59	3.8	10
-75.255	2.814	27/10/1991	13:55	3.8	60
-77.105	4.16	31/8/1991	07:22	3.8	33
-76.515	5.187	19/1/1991	12:19	3.8	90

Longitud	Latitud	Fecha	Hora	Mag (Mw)	Prof (km)
-72.006	6.656	16/5/2001	18:29	3.7	10
-74.371	3.322	19/7/2006	03:53	3.6	66
-76.31	4.63	7/8/2007	22:08	3.6	120
-75.76	2.342	11/1/1991	22:36	3.6	33
-75.757	2.608	14/10/1991	00:37	3.6	33
-74.847	3.685	4/10/1991	04:02	3.6	10
-76.26	3.976	9/1/1991	18:23	3.6	95
-76.827	4.504	23/9/1991	06:54	3.6	88
-75.86	6.3	30/11/2016	17:42	3.6	28
-76.505	4.368	29/12/2000	14:58	3.6	33
-76.221	2.13	9/1/1991	00:07	3.5	10
-76.36	2.387	15/1/1991	15:38	3.5	10
-75.044	2.804	8/1/1991	15:41	3.5	33
-76.659	3.556	7/10/1991	08:39	3.5	33
-76.969	3.685	8/1/1991	23:43	3.5	33
-75.67	3.968	14/8/1991	07:41	3.5	32
-76.235	4.813	30/9/1991	13:16	3.5	110
-76.079	7.315	5/4/2006	22:06	3.5	71
-76.606	3.384	15/5/1999	02:01	3.5	10
-75.823	3.616	31/8/1991	22:39	3.4	33
-76.58	4.2	17/1/1991	01:17	3.4	110
-73.399	6.504	30/11/2006	00:45	3.4	136
-74.819	3.882	24/1/2000	18:20	3.4	33
-73.76	4.32	19/10/1999	15:17	3.4	10
-74.857	2.299	14/10/1991	09:18	3.4	33
-76.065	2.742	29/10/1991	13:39	3.4	20
-77.118	3.257	11/10/1991	11:11	3.4	80
-76.239	4.185	3/12/2006	17:32	3.3	76
-73.54	10.294	31/1/2012	08:23	3.3	10
-76.607	2.969	26/1/1991	17:34	3.3	110
-76.459	3.424	10/10/1991	11:05	3.3	33
-75.802	3.546	14/1/1991	15:53	3.3	33
-76.619	3.75	12/1/1991	14:14	3.3	33
-77.01	4.228	2/1/1991	14:38	3.3	33
-76.205	4.278	2/1/1991	01:27	3.3	33
-75.513	1.914	24/10/1991	11:18	3.2	33
-76.57	3.23	24/1/1991	07:54	3.2	48
-76.001	3.792	21/10/1991	05:50	3.2	100
-76.564	3.966	31/8/2000	01:13	3.1	32
-77.261	2.88	18/1/1991	14:45	3.1	33

-74.417	3.292	20/1/2000	07:56	3.8	33
-76.943	3.522	19/11/2008	22:56	3.7	72
-73.729	3.882	25/3/1991	18:36	3.7	103
-75.291	4.039	22/6/2005	08:07	3.7	10
-72.523	4.949	19/11/2005	06:19	3.7	50
-73.603	5.169	24/12/2008	21:31	3.7	160
-73.617	6.414	17/1/2006	18:13	3.7	128
-72.984	6.42	9/4/1991	20:43	3.7	166
-73.15	7.94	2/1/2001	23:51	3.7	46
-73.058	9.825	26/3/1997	16:33	3.7	100
-75.365	3.077	27/1/1991	14:25	3.7	33
-74.949	5.137	8/3/1999	15:18	3.7	33
-76.055	5.384	10/8/2000	16:58	3.7	33

-76.83	3.395	26/10/1991	13:37	3.1	90
-77.314	4.053	24/1/1991	09:45	3.1	33
-76.693	4.873	23/10/1991	04:21	3.1	90
-75.634	4.617	29/3/1999	15:46	3	4
-74.715	4.7	16/7/1999	00:30	3	4
-76.201	2.434	2/8/1991	11:06	3	10
-76.753	4.031	13/1/1991	00:13	3	81
-76.021	4.033	25/1/1991	17:39	3	56
-75.158	4.395	26/4/1999	23:10	2.9	2
-75.978	3.432	30/10/1991	04:57	2.9	140
-76.201	3.593	22/9/1991	00:11	2.9	110
-76.311	2.853	15/1/1991	01:19	2.8	10
-76.354	3.588	1/1/1991	23:21	2.8	10
-76.735	3.996	23/10/1991	01:13	2.8	70

Tabla 10. Catálogo sísmico de eventos moderados.
Fuente: Elaboración propia.

Longitud	Latitud	Fecha	Hora	Mag (Mw)	Prof (km)
-72.94	6.754	3/10/2004	08:30	4.9	156
-77.96	0.8	24/1/2015	20:39	4.9	4
-77.993	1.082	18/7/1998	23:51	4.9	33
-76.221	1.67	18/5/2005	21:37	4.9	23
-76.517	3.711	22/10/2009	15:56	4.9	134
-76.105	3.754	7/10/2011	16:42	4.9	180
-76.298	3.858	13/4/1990	15:25	4.9	164
-74.726	3.889	12/3/2007	09:17	4.9	54
-74.357	3.93	23/4/1994	21:32	4.9	33
-75.7	3.935	29/3/2004	06:27	4.9	68
-76.358	3.9474	5/9/2015	23:14	4.9	135
-76.293	3.994	31/10/2008	20:07	4.9	54
-76.274	4.101	2/1/2013	16:50	4.9	145
-76.2035	4.1427	21/12/2017	19:26	4.9	156
-76.762	4.605	21/2/2011	11:31	4.9	91
-75.867	5.083	26/12/2005	23:37	4.9	124
-77.191	5.469	5/4/2000	11:03	4.9	10
-72.702	5.518	11/5/1997	13:20	4.9	71
-77.211	5.608	8/5/2013	20:55	4.9	10
-75.845	5.804	7/2/1994	12:50	4.9	56
-71.852	6.125	9/12/2004	19:28	4.9	39
-71.862	6.434	9/8/2012	12:00	4.9	36
-73.241	6.547	24/8/1994	05:56	4.9	211
-72.914	6.737	10/8/2008	18:40	4.9	166
-72.943	6.759	3/7/2010	12:11	4.9	159

Longitud	Latitud	Fecha	Hora	Mag (Mw)	Prof (km)
-74.011	6.47	20/6/2012	17:38	4.5	58
-76.516	6.634	12/4/2008	20:13	4.5	40
-73.46	6.657	22/2/1993	11:46	4.5	192
-77.136	6.713	14/10/2004	05:04	4.5	56
-72.91	6.736	18/3/2004	17:41	4.5	160
-77.452	6.756	20/7/1998	14:02	4.5	10
-73.456	6.797	2/9/1993	10:57	4.5	189
-76.3581	6.8138	16/1/2014	13:46	4.5	6
-72.862	6.826	19/11/2000	23:24	4.5	150
-75.4474	6.8535	14/5/2014	19:05	4.5	71
-77.135	6.934	19/7/2001	10:55	4.5	33
-77.268	6.993	6/7/2000	10:09	4.5	33
-75.913	7.041	29/4/1992	05:52	4.5	35
-76.7594	7.053	30/11/2013	07:08	4.5	43
-73.315	7.065	7/5/1993	09:17	4.5	146
-73.304	7.082	25/8/1991	10:49	4.5	149
-72.156	7.09	28/5/1991	19:26	4.5	33
-77.229	7.137	19/4/2012	17:47	4.5	48
-74.816	7.212	15/9/2004	05:14	4.5	88
-76.127	7.23	13/11/1999	19:25	4.5	84
-72.294	7.323	17/2/1998	16:06	4.5	67
-76.553	7.358	7/1/2003	15:23	4.5	33
-73.0789	7.3933	6/5/2016	13:56	4.5	140
-77.037	7.395	8/4/2000	18:31	4.5	55
-73.2	7.45	7/2/2014	08:03	4.5	135

-73.011	6.774	29/6/1991	21:25	4.9	158
-76.325	6.828	14/8/2005	17:47	4.9	38
-76.667	6.855	11/3/2006	15:40	4.9	45
-73.227	6.856	1/5/1998	03:53	4.9	160
-76.777	6.888	30/5/1995	12:11	4.9	50
-72.857	6.971	5/1/2003	15:20	4.9	200
-76.554	7.052	19/9/2002	17:59	4.9	33
-76.744	7.097	8/2/2013	00:01	4.9	32
-77.061	7.204	23/7/2010	14:03	4.9	54
-77.232	7.418	30/11/2004	18:50	4.9	31
-77.144	7.486	10/2/2006	01:58	4.9	31
-74.578	7.919	4/3/1990	09:18	4.9	79
-75.308	8.358	24/2/1994	15:00	4.9	48
-72.719	8.3585	14/4/2017	22:16	4.9	179
-73.893	8.445	25/12/2011	16:41	4.9	35
-73.402	9.652	10/8/2004	15:16	4.9	68
-73.207	10.618	23/3/2014	14:58	4.9	58
-74.594	10.797	9/11/2007	06:08	4.9	47
-73.264	11.098	13/4/1994	16:32	4.9	33
-75.9283	3.816	29/4/2017	10:06	4.8	59
-76.624	4.655	8/9/2009	08:26	4.8	91
-72.377	5.091	5/6/2010	01:20	4.8	23
-72.992	6.654	18/6/2004	14:59	4.8	151
-74.9026	7.6874	25/8/2013	23:35	4.8	26
-73.745	10.852	20/2/2004	11:15	4.8	46
-74.953	3.456	31/12/2000	02:10	4.8	33
-78.582	1.633	7/5/2004	19:00	4.8	47
-76.519	2.082	2/2/2000	23:40	4.8	62
-76.81	2.722	22/6/1998	07:03	4.8	142
-75.7731	2.8738	6/1/2016	01:28	4.8	40
-76.2763	3.2111	4/6/2014	18:53	4.8	164
-76.467	3.23	19/11/1997	10:34	4.8	86
-77.443	3.272	29/12/1990	01:55	4.8	90
-75.574	3.382	1/10/2010	00:20	4.8	32
-74.369	3.642	22/1/2003	15:55	4.8	33
-76.343	3.755	27/6/2012	03:47	4.8	143
-76.451	3.971	21/4/2001	23:28	4.8	68
-76.604	4.091	14/7/2003	00:59	4.8	67
-76.385	4.197	19/7/1999	16:13	4.8	140
-76.244	4.446	12/2/2004	15:23	4.8	142
-76.429	4.452	22/4/1993	06:21	4.8	126
-76.552	4.489	2/11/2003	16:04	4.8	99
-74.87	4.493	13/7/2008	13:45	4.8	48

-74.452	7.466	9/4/2005	06:11	4.5	91
-72.579	7.639	21/11/1993	10:45	4.5	212
-74.5105	7.646	18/10/2016	12:27	4.5	74
-76.458	7.727	11/12/1992	06:54	4.5	33
-73.2421	7.7414	7/4/2017	00:54	4.5	119
-75.0879	7.8486	3/4/2016	20:34	4.5	32
-77.083	8.221	8/12/2002	03:03	4.5	33
-72.822	8.285	30/12/1992	20:19	4.5	183
-74.592	8.392	28/5/2005	10:12	4.5	77
-74.113	8.9	15/1/1996	21:06	4.5	33
-74.362	8.922	12/6/1993	22:57	4.5	33
-74.382	9.214	2/11/2000	04:19	4.5	33
-73.3414	10.331	7/6/2015	13:03	4.5	94
-72.844	11.597	30/1/1992	04:23	4.5	30
-74.65	4.96	25/8/1999	17:03	4.5	30
-75.137	7.027	17/9/2000	10:53	4.5	33
-72.9153	5.4487	16/5/2015	09:00	4.4	10
-76.791	3.591	7/8/1997	13:12	4.4	104
-75.549	3.957	28/9/2002	17:40	4.4	104
-75.724	4.666	30/3/2003	01:47	4.4	33
-74.755	4.668	15/5/1999	10:20	4.4	18
-76.415	4.775	2/5/1999	17:48	4.4	123
-75.931	4.796	17/5/2007	00:56	4.4	153
-72.757	4.848	26/9/1991	21:29	4.4	22
-73.761	5.324	12/3/2007	05:31	4.4	156
-72.133	6.008	2/5/1997	06:18	4.4	33
-76.267	6.053	27/4/2004	05:38	4.4	58
-74.43	6.12	20/11/2000	00:20	4.4	33
-76.857	6.185	8/1/2003	15:42	4.4	33
-73.98	6.273	15/12/2004	15:18	4.4	113
-74.099	6.365	18/6/1995	04:43	4.4	33
-72.394	6.412	15/2/2004	04:12	4.4	161
-72.69	6.539	21/1/1995	00:36	4.4	193
-73.402	6.547	1/2/2007	15:19	4.4	128
-75.982	6.566	8/9/1996	05:42	4.4	33
-73.556	6.592	20/1/2011	09:50	4.4	128
-72.565	6.614	26/2/2003	07:52	4.4	33
-73.249	6.615	12/12/1996	07:13	4.4	190
-72.552	6.732	28/12/1992	09:59	4.4	121
-76.393	6.74	26/12/1996	18:44	4.4	57
-73.146	6.755	20/8/2012	13:00	4.4	156
-73.05	6.793	18/10/2006	13:57	4.4	157
-71.862	6.832	27/5/2007	06:49	4.4	49

-75.806	4.4999	17/11/2013	15:18	4.8	178
-75.918	4.555	31/7/2012	01:26	4.8	63
-76.445	4.627	13/4/2010	16:51	4.8	103
-76.895	4.638	30/11/2001	14:34	4.8	33
-72.961	4.683	18/6/2006	04:59	4.8	42
-76.1183	4.7377	16/11/2017	00:56	4.8	105
-72.912	5.046	6/9/2006	19:30	4.8	10
-76.184	5.229	23/1/2011	07:50	4.8	110
-72.5096	5.2702	8/1/2016	14:55	4.8	35
-76.554	5.312	2/11/1994	04:55	4.8	84
-76.5652	5.4632	7/4/2015	14:00	4.8	90
-73.483	5.596	16/9/2000	13:54	4.8	161
-74.248	6.316	14/1/1990	00:25	4.8	238
-73.097	6.402	8/11/2001	15:46	4.8	150
-76.4215	6.4994	17/4/2014	18:12	4.8	45
-71.999	6.5	3/1/2001	17:21	4.8	102
-74.1	6.541	9/7/2016	12:55	4.8	15
-73.5204	6.6177	14/11/2014	13:30	4.8	137
-72.982	6.745	16/12/2001	09:06	4.8	168
-72.402	6.787	21/5/1994	22:44	4.8	33
-72.992	6.808	15/1/1991	01:45	4.8	159
-75.876	6.82	5/7/2001	09:46	4.8	79
-73.035	6.824	14/10/2010	06:26	4.8	145
-74.496	6.914	14/5/1991	06:45	4.8	72
-72.651	7.221	18/2/2002	22:11	4.8	33
-72.853	7.26	28/10/1990	01:34	4.8	184
-75.294	7.268	22/6/2007	20:23	4.8	70
-73.014	7.3145	28/8/2016	12:23	4.8	20
-75.287	7.348	3/7/1996	03:08	4.8	53
-73.055	7.359	18/11/1992	03:20	4.8	137
-77.123	7.375	25/4/2004	13:19	4.8	30
-73.3608	7.495	19/12/2016	21:02	4.8	123
-76.61	7.656	19/3/1995	17:19	4.8	33
-72.71	7.82	17/7/1996	21:15	4.8	33
-76.637	8.024	31/10/1992	13:18	4.8	10
-73.929	8.104	19/12/1990	17:27	4.8	91
-73.477	8.136	10/2/1993	04:20	4.8	97
-72.798	8.209	6/2/1992	22:21	4.8	172
-75.239	8.258	16/4/1993	09:12	4.8	27
-74.452	8.2733	24/3/2014	20:28	4.8	77
-76.516	8.474	30/6/2002	21:17	4.8	42
-73.986	8.857	28/5/2001	23:32	4.8	70
-73.505	8.943	10/11/1993	05:37	4.8	122

-72.77	6.976	26/10/1997	18:09	4.4	150
-73.53	7.025	2/5/1998	15:21	4.4	150
-73.329	7.046	25/2/2007	01:56	4.4	140
-76.7643	7.0544	6/6/2015	22:13	4.4	20
-77.433	7.073	8/5/1995	14:50	4.4	33
-73.238	7.083	24/11/1996	02:53	4.4	150
-73.135	7.086	8/12/2007	23:04	4.4	138
-72.885	7.11	13/3/2007	19:18	4.4	179
-72.271	7.126	15/3/2002	07:04	4.4	33
-77.163	7.179	2/6/2011	14:37	4.4	43
-75.385	7.19	25/2/2000	05:13	4.4	72
-72.761	7.19	30/4/1999	01:37	4.4	125
-73.056	7.255	7/1/2001	03:40	4.4	135
-73.229	7.269	8/7/1998	11:03	4.4	120
-77.255	7.273	22/7/2002	11:06	4.4	33
-72.585	7.284	28/12/1998	11:01	4.4	104
-72.777	7.297	18/8/2003	13:29	4.4	100
-73.256	7.402	19/10/1999	09:11	4.4	148
-74.515	7.441	10/5/1996	15:11	4.4	72
-72.738	7.467	13/3/1995	09:03	4.4	197
-72.674	7.579	19/3/1997	06:55	4.4	150
-73.358	7.664	3/2/1996	04:15	4.4	125
-72.691	7.791	10/5/2000	03:17	4.4	33
-72.629	7.839	21/2/1999	22:06	4.4	78
-73.19	7.863	31/7/1999	14:47	4.4	188
-74.8188	7.9345	19/9/2016	20:17	4.4	88
-75.399	8.077	9/5/2006	14:41	4.4	40
-75.106	8.431	24/8/2004	01:52	4.4	67
-74.455	8.616	23/8/1998	12:36	4.4	33
-74.9681	9.4395	13/3/2017	07:52	4.4	74
-73.6008	9.6063	25/11/2016	19:21	4.4	135
-72.993	2.808	11/12/1999	22:03	4.4	33
-74.403	3.579	2/11/2000	19:35	4.4	33
-75.368	4.483	26/7/2010	03:48	4.4	10
-71.928	6.722	10/6/2008	05:25	4.4	10
-75.233	7.623	29/12/2000	15:43	4.4	33
-76.277	5.256	26/11/1998	07:36	4.3	95
-73.5013	6.587	26/4/2016	01:50	4.3	127
-73.046	6.808	27/6/2006	15:56	4.3	163
-74.369	3.256	22/4/1998	00:57	4.3	69
-77.0039	3.6983	20/9/2014	03:59	4.3	98
-76.951	3.707	11/1/1993	14:01	4.3	57
-71.1255	3.833	24/8/2016	01:57	4.3	13

-74.7068	9.791	23/9/2017	05:17	4.8	46
-73.011	10.945	19/9/1993	22:32	4.8	112
-71.74	11.908	14/10/1995	20:44	4.8	59
-71.969	12.145	16/5/1993	01:31	4.8	33
-76.347	6.665	3/1/1991	05:27	4.7	33
-75.013	3.989	19/11/2000	13:30	4.7	10
-73.49	4.94	19/9/1999	02:28	4.7	30
-72.97	5.169	30/10/1999	18:42	4.7	10
-77.307	1.282	4/3/1995	23:23	4.7	5
-78.5497	2.3138	1/1/2017	07:38	4.7	18
-77.275	2.363	18/8/2010	07:38	4.7	85
-75.5794	2.6595	23/12/2016	03:43	4.7	10
-75.011	2.855	12/8/2003	05:37	4.7	60
-72.9565	3.6211	17/2/2016	14:49	4.7	15
-76.009	3.726	4/12/2000	02:11	4.7	194
-76.1191	3.7278	15/11/2017	02:12	4.7	162
-76.7291	3.7583	6/5/2017	02:52	4.7	75
-73.945	3.853	10/9/1990	05:25	4.7	31
-71.2033	3.8666	24/8/2015	02:15	4.7	10
-76.21	4.206	23/5/2013	16:32	4.7	77
-75.3232	4.461	21/6/2014	12:31	4.7	192
-76.576	4.481	10/9/1996	02:26	4.7	110
-76.551	4.508	28/5/2006	15:47	4.7	119
-77.317	4.82	18/1/2009	03:13	4.7	54
-75.8767	4.9021	19/10/2014	02:20	4.7	131
-72.979	5.092	31/1/2012	14:52	4.7	57
-72.871	5.111	16/1/2010	05:11	4.7	10
-72.947	5.147	10/2/1998	06:24	4.7	33
-72.707	5.199	8/7/2007	04:29	4.7	62
-72.893	5.263	21/5/2000	01:00	4.7	33
-72.5448	5.2914	10/8/2015	16:59	4.7	10
-73.891	5.588	30/3/1997	10:38	4.7	136
-76.4526	5.9528	10/1/2016	10:33	4.7	45
-77.068	5.963	15/11/2005	15:51	4.7	35
-73.732	6.116	18/3/2008	13:20	4.7	129
-73.039	6.276	29/9/1991	15:35	4.7	199
-73.292	6.295	6/7/1995	21:10	4.7	150
-72.891	6.342	23/7/2007	05:55	4.7	190
-72.553	6.423	5/3/2005	17:12	4.7	172
-76.165	6.462	18/9/1999	11:19	4.7	62
-73.4908	6.5415	23/9/2015	18:47	4.7	137
-77.084	6.619	19/9/1998	06:15	4.7	33
-76.9979	6.6236	28/1/2017	15:49	4.7	10

-73.5145	3.9163	24/8/2017	22:22	4.3	34
-75.592	4.427	6/4/2002	22:03	4.3	173
-74.1107	4.509	21/1/2017	06:34	4.3	32
-74.181	4.57	24/7/2002	19:38	4.3	33
-76.155	4.609	8/5/2007	22:03	4.3	134
-73.15	4.693	20/9/1999	02:28	4.3	33
-74.487	4.767	7/6/1993	10:47	4.3	61
-72.965	5.091	12/3/1999	01:47	4.3	33
-73.667	5.286	26/12/2005	14:17	4.3	157
-74.4619	5.4641	17/3/2016	08:46	4.3	44
-73.302	5.465	20/8/2012	20:17	4.3	43
-74.27	5.871	19/12/2004	20:50	4.3	116
-73.43	5.873	8/1/2003	01:08	4.3	33
-72.982	6.03	13/7/1997	05:59	4.3	33
-72.563	6.336	21/6/2004	06:45	4.3	187
-72.481	6.361	17/8/2008	11:56	4.3	196
-72.316	6.388	24/1/1997	12:51	4.3	50
-77.223	6.392	16/8/2001	02:12	4.3	33
-73.682	6.585	4/10/1999	06:43	4.3	204
-72.666	6.663	14/12/1997	21:02	4.3	173
-72.912	6.7446	26/12/2016	08:47	4.3	157
-76.926	6.765	13/5/2007	02:30	4.3	49
-73.0132	6.8214	28/11/2017	19:55	4.3	176
-76.76	6.856	12/1/1998	10:06	4.3	45
-76.436	6.871	6/11/2003	09:32	4.3	33
-72.809	6.999	20/8/1997	12:26	4.3	150
-72.702	7.026	27/5/2001	11:31	4.3	150
-72.712	7.065	14/10/1993	05:34	4.3	203
-72.242	7.204	3/2/1997	06:46	4.3	33
-72.596	7.304	13/12/1995	10:22	4.3	33
-72.95	7.357	10/2/2006	04:36	4.3	158
-72.981	7.366	3/3/1996	19:51	4.3	162
-76.444	7.424	20/1/1998	10:30	4.3	100
-73.045	7.425	16/5/1997	05:34	4.3	100
-75.301	7.5127	29/11/2017	20:08	4.3	77
-74.681	7.533	19/6/1997	07:06	4.3	33
-73.63	7.883	5/7/1999	01:41	4.3	134
-75.427	10.432	6/6/2006	14:23	4.3	20
-74.052	11.241	23/8/1992	20:23	4.3	33
-74.066	6.091	19/11/2000	00:20	4.3	10
-73.922	6.336	21/12/2000	20:07	4.3	33
-77.589	0.728	9/5/2005	20:21	4.3	10
-76.506	2.265	6/9/1991	08:11	4.3	10

-74.067	6.688	27/9/2003	02:48	4.7	33
-72.998	6.766	6/6/1996	09:04	4.7	160
-73.016	6.771	10/1/2005	17:34	4.7	157
-72.924	6.789	5/6/1994	23:59	4.7	162
-75.829	6.918	2/1/1993	01:57	4.7	24
-76.781	6.96	29/11/1996	00:55	4.7	33
-76.812	7.006	6/12/2006	14:37	4.7	45
-76.11	7.081	19/10/1992	02:16	4.7	10
-73.325	7.098	20/4/1992	07:52	4.7	137
-72.999	7.305	21/7/2009	07:54	4.7	144
-73.172	7.376	14/12/2010	19:00	4.7	140
-74.731	7.433	9/3/2013	04:38	4.7	68
-75.195	7.506	6/7/1997	03:59	4.7	59
-73.226	7.7442	13/6/2014	23:32	4.7	52
-74.154	7.938	2/11/1999	15:18	4.7	63
-77.2832	8.3075	29/7/2015	06:54	4.7	26
-72.637	8.486	12/1/1990	13:21	4.7	198
-73.4929	8.4913	19/6/2017	16:13	4.7	159
-72.709	8.679	24/8/1996	14:01	4.7	21
-75.2228	9.1923	27/11/2014	19:43	4.7	26
-74.022	9.953	30/12/1999	16:59	4.7	89
-73.726	10.586	8/11/2003	20:38	4.7	70
-74.575	10.831	1/10/2009	07:48	4.7	21
-74.158	10.942	20/10/2012	03:42	4.7	24
-71.794	11.921	7/5/1994	11:16	4.7	33
-71.949	11.96	27/2/2013	18:49	4.7	50
-76.302	4.354	4/9/1991	04:32	4.6	10
-76.876	2.662	16/2/2007	22:39	4.6	147
-75.882	3.329	9/7/2011	10:57	4.6	183
-71.3338	3.6613	9/8/2014	00:30	4.6	15
-76.7513	3.7039	11/7/2016	00:50	4.6	102
-76.85	3.83	22/10/2007	22:43	4.6	65
-76.7031	4.0115	24/1/2017	19:35	4.6	101
-76.512	4.024	30/4/2006	11:41	4.6	97
-77.446	4.1	28/9/2000	10:19	4.6	6
-71.446	4.2444	30/11/2014	23:22	4.6	16
-76.019	4.501	22/8/2004	23:35	4.6	113
-76.309	4.894	14/1/2003	05:52	4.6	105
-76.7041	4.9142	19/6/2017	20:02	4.6	99
-76.845	5.312	15/4/2008	22:28	4.6	70
-76.702	5.482	9/4/2007	14:14	4.6	150
-73.9445	5.5127	26/11/2016	19:32	4.6	124
-76.102	5.728	14/4/2002	09:10	4.6	62

-75.808	4.233	2/1/1991	17:21	4.3	10
-76.41	5.09	21/10/1999	16:38	4.3	100
-76.688	7.723	11/10/1995	19:47	4.3	33
-76.371	8.852	1/2/1993	04:22	4.3	10
-74.595	2.181	26/3/1996	05:54	4.2	62
-77.65	2.255	12/10/2006	03:18	4.2	79
-73.994	2.831	6/1/1994	21:19	4.2	103
-76.974	4.03	10/4/2007	00:33	4.2	120
-76.698	4.043	23/1/2008	00:24	4.2	63
-74.996	4.502	25/1/1993	12:58	4.2	86
-76.105	4.704	22/12/2005	11:17	4.2	117
-76.416	4.842	29/10/1994	23:05	4.2	118
-76.035	4.928	17/4/2006	16:23	4.2	141
-72.595	5.192	22/10/2006	01:31	4.2	35
-77.192	5.208	14/12/2003	10:11	4.2	69
-76.602	5.473	31/3/2004	05:51	4.2	41
-73.981	5.499	3/9/2008	02:21	4.2	125
-74.271	5.556	23/10/2008	21:19	4.2	107
-73.622	5.657	23/5/2003	05:17	4.2	145
-76.904	5.875	11/5/2003	07:22	4.2	79
-73.824	5.91	2/8/2001	04:02	4.2	153
-77.065	5.944	26/7/1996	14:29	4.2	33
-72.223	6.02	21/12/2001	20:05	4.2	33
-72.717	6.142	13/3/1995	14:08	4.2	199
-72.972	6.224	24/4/2005	04:11	4.2	189
-77.371	6.285	11/10/2005	01:10	4.2	86
-73.545	6.352	8/5/2004	19:55	4.2	138
-72.664	6.485	15/2/1993	18:31	4.2	188
-73.442	6.747	25/10/2008	12:34	4.2	63
-74.276	6.757	11/1/2002	19:02	4.2	33
-72.961	6.803	13/4/1999	00:12	4.2	166
-72.984	6.804	10/1/1999	04:05	4.2	200
-72.655	7.132	3/11/1996	01:46	4.2	126
-73.13	7.552	11/7/2008	18:22	4.2	35
-72.958	7.575	18/1/1997	14:19	4.2	150
-74.904	7.592	10/2/1999	08:25	4.2	33
-76.767	7.621	5/11/1996	04:32	4.2	33
-73.112	7.738	8/10/2005	22:12	4.2	153
-74.687	7.742	20/2/1998	14:26	4.2	83
-72.778	7.801	9/8/2001	18:13	4.2	200
-73.017	8.124	26/7/2005	18:43	4.2	166
-73.025	9.959	27/11/1995	01:08	4.2	139
-76.072	2.611	27/8/2000	14:23	4.2	10

-71.9346	6.2557	20/11/2013	02:20	4.6	23
-77.1	6.346	4/1/1992	07:07	4.6	33
-72.804	6.382	29/6/2000	23:22	4.6	33
-71.834	6.431	22/5/2006	00:35	4.6	53
-73.2561	6.446	11/5/2014	16:28	4.6	149
-73.628	6.467	27/3/1998	04:11	4.6	33
-71.811	6.57	3/2/2002	21:23	4.6	33
-72.9049	6.6982	3/12/2014	20:15	4.6	168
-72.9569	6.7392	28/3/2017	16:56	4.6	162
-72.975	6.786	19/12/2012	00:23	4.6	166
-73.31	6.85	2/5/2008	14:33	4.6	147
-76.3217	6.892	3/5/2017	16:45	4.6	8
-76.722	6.905	12/9/2011	21:16	4.6	49
-75.875	6.912	13/8/2003	16:33	4.6	98
-74.448	6.915	26/7/2007	18:55	4.6	95
-72.73	6.924	7/4/1993	16:50	4.6	191
-76.09	6.925	30/1/2006	12:16	4.6	65
-76.841	6.935	17/7/2003	11:30	4.6	33
-76.463	6.981	3/3/1996	18:30	4.6	64
-73.341	6.992	27/1/1999	14:06	4.6	151
-76.638	6.993	31/7/2012	23:44	4.6	52
-76.86	7.038	28/3/2001	09:13	4.6	33
-73.163	7.05	28/2/1996	17:09	4.6	150
-72.764	7.067	1/12/2005	18:31	4.6	189
-73.387	7.117	12/9/1993	06:16	4.6	150
-76.7766	7.128	18/12/2016	12:50	4.6	62
-72.643	7.217	17/10/2001	04:49	4.6	33
-74.8183	7.2171	16/2/2014	11:26	4.6	79
-75.127	7.337	7/9/2012	07:52	4.6	67
-76.548	7.366	7/5/2008	09:53	4.6	36
-73.032	7.378	9/7/2012	09:50	4.6	42
-76.997	7.412	31/5/2001	15:29	4.6	24
-73.0289	7.4408	21/10/2014	08:01	4.6	153
-74.9	7.867	21/3/2001	03:58	4.6	25
-72.8018	7.8941	28/4/2017	02:34	4.6	47
-75.473	7.897	13/3/1995	18:13	4.6	33
-75.133	8.091	5/3/2007	18:49	4.6	62
-72.614	8.429	23/3/1996	03:05	4.6	204
-73.368	8.638	18/4/2006	03:10	4.6	134
-73.295	8.77	28/7/2006	00:31	4.6	131
-73.37	9.712	23/10/2005	19:29	4.6	113
-74.666	10.013	1/6/1992	03:40	4.6	43
-74.026	10.326	8/8/2011	11:29	4.6	91

-73.68	4.39	27/1/2011	14:06	4.2	4
-74.663	4.694	3/12/1999	07:28	4.2	10
-74.586	5.333	8/2/2012	09:38	4.2	16
-76.991	2.48	13/10/1991	11:39	4.2	90
-74.785	2.907	9/10/1991	17:19	4.2	33
-77.023	3.79	20/9/1991	22:34	4.2	32
-76.479	5.058	24/10/1991	15:00	4.2	100
-75.933	5.169	22/2/1998	00:52	4.2	33
-77.31	6.652	22/2/1998	03:04	4.2	42
-77.398	7.306	19/11/1998	00:32	4.2	5
-77.323	7.698	8/7/1998	03:40	4.2	10
-78.022	2.552	12/6/1997	11:35	4.1	138
-75.154	4.504	19/1/2007	03:16	4.1	56
-76.208	4.587	11/3/2000	01:07	4.1	141
-75.319	4.797	15/3/2006	01:17	4.1	36
-77.177	4.865	16/11/2004	01:57	4.1	15
-73.621	5.198	18/2/2005	13:52	4.1	160
-76.389	6.23	10/2/1998	05:13	4.1	33
-73.149	6.28	19/1/1997	11:15	4.1	150
-76.589	6.283	13/2/2006	15:06	4.1	108
-72.663	6.406	2/1/1999	10:18	4.1	200
-76.657	6.444	6/4/1993	04:08	4.1	33
-73.299	6.77	8/10/1999	23:03	4.1	176
-75.533	7.021	28/7/2001	12:34	4.1	103
-73.399	7.022	13/6/1997	08:49	4.1	150
-73.465	7.126	5/3/1997	04:23	4.1	200
-77.543	7.262	21/5/1999	02:58	4.1	18
-75.988	7.411	8/5/1993	22:58	4.1	114
-72.96	7.414	23/7/1998	04:56	4.1	100
-73.035	7.558	12/4/2006	22:56	4.1	177
-72.778	7.667	11/3/2007	22:25	4.1	183
-77.111	7.756	22/3/1996	16:04	4.1	36
-76.297	7.867	10/5/1993	21:08	4.1	115
-74.824	7.933	20/11/2005	20:24	4.1	93
-74.075	8.409	29/5/2005	04:55	4.1	108
-74.488	9.967	8/12/1992	14:56	4.1	66
-71.6042	6.9895	19/7/2017	18:56	4.1	10
-76.048	6.555	13/7/1998	02:17	4.1	10
-77.757	1.749	8/10/1991	19:16	4.1	33
-77.273	2.442	15/10/1991	04:03	4.1	90
-74.803	2.942	9/1/1991	11:23	4.1	33
-73.824	3.419	23/9/1991	15:40	4.1	33
-76.644	1.544	9/3/2006	15:59	4	49

-75.794	2.036	28/7/1999	20:05	4.6	12
-74.68	3.18	18/3/2010	13:47	4.6	24
-74.873	4.589	28/8/2000	16:48	4.6	10
-74.55	5.53	9/10/1999	12:02	4.6	30
-77.244	7.265	23/1/2008	15:36	4.6	14
-76.086	2.114	17/10/1991	05:42	4.5	33
-78.273	2.173	23/6/2004	03:31	4.5	105
-77.7205	2.4226	3/2/2017	20:33	4.5	92
-75.282	3.12	23/10/1990	09:13	4.5	33
-76.894	3.944	16/9/2004	06:53	4.5	103
-73.8904	4.2284	12/6/2014	06:30	4.5	42
-77.359	4.245	19/3/2000	18:18	4.5	72
-77.213	4.856	16/2/2000	17:32	4.5	33
-72.795	4.93	2/1/2007	19:49	4.5	60
-74.569	4.961	2/2/1998	14:21	4.5	45
-76.455	5.006	4/2/2007	17:08	4.5	111
-72.417	5.133	11/7/2000	06:57	4.5	100
-76.906	5.135	16/11/2004	21:32	4.5	84
-73.71	5.279	30/5/2012	00:57	4.5	156
-72.965	5.338	26/4/1997	04:56	4.5	33
-73.6464	5.3471	13/7/2016	02:15	4.5	149
-71.872	5.521	11/10/1995	00:38	4.5	64
-71.957	6.296	30/3/2010	03:03	4.5	28
-71.583	6.374	1/7/2013	03:41	4.5	10

-75.613	1.91	4/7/1990	13:21	4	33
-73.374	4.109	8/2/1996	08:39	4	33
-72.607	4.474	4/5/1996	07:59	4	33
-75.583	5.221	18/12/2000	20:03	4	129
-71.687	5.54	23/1/1993	13:15	4	227
-72.441	5.577	9/4/2000	12:41	4	33
-73.752	5.634	4/12/2006	04:39	4	144
-72.962	6.163	13/2/2005	06:57	4	201
-73.242	6.441	17/2/2000	15:03	4	221
-76.761	6.879	3/5/1997	18:44	4	33
-76.516	6.904	2/7/2003	14:54	4	48
-76.381	7.06	11/5/2004	05:21	4	24
-73.141	7.175	23/3/1998	03:07	4	136
-73.134	7.352	7/4/1999	18:43	4	100
-73.964	7.46	4/9/2005	18:06	4	112
-74.73	7.469	26/1/1998	12:37	4	33
-76.138	7.746	24/1/1997	00:54	4	33
-73.837	4.155	12/2/1999	01:20	4	10
-76.091	5.378	19/12/2000	19:03	4	10
-75.031	2.73	10/10/1991	08:29	4	10
-76.261	3.898	31/8/1991	05:12	4	99
-76.781	4.23	25/10/1991	18:40	4	75
-76.802	4.757	9/9/1991	03:16	4	33
-76.096	5.035	18/10/1991	14:55	4	90

Tabla 11. Catálogo sísmico de eventos fuertes.
Fuente: Elaboración propia.

Longitud	Latitud	Fecha	Hora	Mag (Mw)	Prof (km)
-75.968	3.873	22/9/2001	03:23	5.9	179
-73.764	4.33	24/5/2008	19:20	5.9	9
-75.607	5.111	15/8/1992	19:02	5.9	119
-76.494	4.564	19/2/1997	18:25	5.8	101
-73.832	5.638	2/1/1992	19:41	5.8	134
-75.517	4.79	13/9/2008	09:32	5.7	133
-76.855	8.596	2/3/2011	18:50	5.7	44
-74.495	3.447	31/10/2016	00:20	5.6	33
-71.971	6.785	17/1/2000	12:20	5.6	33
-72.952	6.702	24/2/2012	13:43	5.5	162
-72.995	6.83	1/1/1990	18:03	5.5	158
-76.501	2.73	22/2/2015	12:56	5.5	149
-76.644	4.557	5/1/2014	03:36	5.5	54
-77.414	1.464	27/6/2000	07:10	5.4	143
-75.642	3.737	3/7/2009	10:04	5.4	52

Longitud	Latitud	Fecha	Hora	Mag (Mw)	Prof (km)
-72.263	11.67	9/6/2017	21:17	5.2	55
-76.595	2.265	18/8/2004	07:06	5.1	26
-76.032	2.483	4/11/2017	00:16	5.1	157
-76.234	3.047	18/12/2009	14:30	5.1	165
-74.476	3.288	23/11/2002	23:56	5.1	64
-74.999	3.924	29/7/2010	19:34	5.1	51
-75.891	5.626	24/4/2007	08:53	5.1	53
-72.897	6.767	27/10/2009	16:25	5.1	162
-76.615	7.025	11/4/2016	09:29	5.1	22
-73.148	7.528	1/10/2017	01:35	5.1	129
-73.272	7.712	20/4/2009	08:54	5.1	123
-74.928	8.33	8/9/2001	22:45	5.1	33
-77.905	1.245	25/11/2006	13:50	5.1	43
-76.166	2.719	4/3/2008	11:23	5.1	69
-75.589	3.8	15/7/2007	19:30	5.1	35

-72.602	4.893	16/3/2017	15:38	5.4	17
-72.984	6.807	31/12/1990	02:38	5.4	155
-77.476	7.536	12/10/2015	04:35	5.4	10
-72.856	8.531	21/2/1994	22:17	5.4	24
-71.7	6.537	17/2/2014	09:41	5.4	43
-72.946	6.705	6/5/2007	04:47	5.4	160
-72.929	6.74	17/2/2008	21:15	5.4	155
-72.892	6.751	8/11/1999	05:51	5.4	164
-73.985	3.594	2/7/2017	19:26	5.3	28
-76.18	4.67	21/2/2015	22:26	5.3	95
-73.94	6.154	8/3/1998	04:59	5.3	33
-72.09	6.536	8/8/2017	20:43	5.3	49
-72.993	6.794	26/5/1992	11:59	5.3	158
-71.829	6.963	17/11/1995	02:12	5.3	33
-72.607	4.602	29/1/2007	07:47	5.3	436
-73.783	5.553	20/5/1995	22:18	5.3	142
-73.059	6.668	25/2/2005	06:41	5.3	166
-72.899	6.743	19/11/2001	21:01	5.3	165
-72.894	6.813	1/1/1997	04:35	5.3	164
-77.652	6.909	24/1/2006	02:15	5.3	24
-76.434	2.914	13/11/1991	13:21	5.3	149
-75.843	2.974	9/1/2014	12:50	5.3	26
-76.04	4.589	2/11/2009	12:18	5.3	102
-76.685	4.613	10/3/1991	12:28	5.3	90
-75.767	4.79	1/6/2011	22:58	5.3	80
-77.505	5.519	25/1/2012	14:37	5.3	37
-75.784	5.65	10/1/1990	02:57	5.3	62
-72.914	6.749	11/2/2009	17:17	5.3	163
-71.949	6.75	27/10/1990	16:31	5.3	40
-72.933	6.842	25/5/1998	02:17	5.3	155
-75.654	8.955	7/7/2010	20:38	5.3	39
-76.495	2.082	6/3/2007	13:05	5.2	43
-78.388	2.122	23/5/2000	16:36	5.2	33
-76.269	5.014	21/4/2005	03:39	5.2	103
-72.912	5.244	25/6/1991	23:06	5.2	14
-73.61	6.639	26/4/2002	01:36	5.2	33
-72.958	6.691	7/2/2014	20:37	5.2	159
-72.962	6.739	31/12/1992	01:28	5.2	167
-72.993	6.815	10/12/1994	15:24	5.2	158
-72.175	7.136	20/6/2007	19:04	5.2	23
-73.523	9.996	18/3/1999	23:54	5.2	94
-75.39	1.808	6/12/1992	00:40	5.2	18
-75.983	2.953	2/9/2008	17:21	5.2	23

-76.628	3.806	27/8/2013	23:22	5.1	81
-76.333	4.178	24/8/2007	17:45	5.1	141
-75.756	4.229	11/1/2010	18:48	5.1	180
-77.294	4.764	15/12/1991	07:37	5.1	28
-77.231	6.032	8/1/2003	14:35	5.1	33
-72.531	6.278	17/7/1999	12:21	5.1	12
-72.987	6.706	8/1/1996	08:00	5.1	167
-72.993	6.709	28/11/2015	17:45	5.1	167
-73.021	6.733	12/7/2002	18:07	5.1	156
-72.991	6.734	25/7/2013	12:09	5.1	153
-73.012	6.759	3/5/2001	16:13	5.1	163
-72.946	6.772	14/4/1999	07:25	5.1	161
-72.971	6.774	22/9/2016	10:42	5.1	151
-76.292	6.778	1/11/2007	12:20	5.1	25
-72.896	6.796	8/2/2003	17:43	5.1	164
-73.099	6.898	23/7/1995	15:06	5.1	154
-72.896	7.197	12/4/2017	11:28	5.1	166
-76.026	7.251	10/12/2003	19:40	5.1	33
-75.615	7.656	31/10/1995	05:24	5.1	49
-74.94	7.88	31/3/2009	00:50	5.1	18
-74.629	8.106	30/6/1991	13:18	5.1	52
-74.966	9.522	30/12/2004	15:02	5.1	43
-73.564	10.14	26/10/2017	07:59	5.1	86
-75.946	4.42	8/3/2005	15:59	5	66
-72.911	6.679	10/1/2006	03:14	5	163
-73.304	7.652	14/10/2015	07:47	5	126
-76.922	1.687	28/12/2016	05:05	5	138
-77.294	1.734	31/12/2011	00:53	5	96
-74.915	2.764	11/11/2017	14:45	5	46
-73.981	3.712	21/1/2006	21:10	5	14
-71.172	3.886	28/11/2015	10:59	5	15
-71.417	3.976	27/3/2014	10:21	5	26
-76.113	4.14	15/1/2004	00:25	5	154
-75.752	4.178	18/9/2015	04:35	5	16
-76.539	4.214	1/3/2012	01:41	5	117
-73.616	4.343	1/6/1999	21:42	5	33
-76.532	4.417	2/10/2005	22:07	5	99
-75.634	4.603	18/7/1992	01:40	5	153
-76.284	4.79	30/10/2003	13:09	5	124
-75	4.857	30/7/2017	05:40	5	10
-76.567	5.059	31/8/2007	23:05	5	95
-74.359	5.123	25/3/2008	07:38	5	28
-72.797	5.249	11/3/2014	13:57	5	10

-75.885	3.615	3/4/2000	09:52	5.2	185	-73.585	5.376	14/12/2014	01:49	5	152
-74.027	3.774	17/7/1997	12:45	5.2	42	-77.365	5.422	5/6/1992	17:24	5	76
-76.395	3.941	31/1/2011	07:13	5.2	98	-72.766	5.596	20/6/1992	08:26	5	22
-77.221	4.705	22/12/2016	08:59	5.2	48	-72.6	5.642	22/5/2009	04:53	5	23
-76.23	4.712	23/1/1991	01:05	5.2	117	-76.09	5.67	6/7/2011	04:16	5	36
-75.49	4.89	4/3/2010	22:09	5.2	131	-76.135	5.772	13/1/2009	19:47	5	58
-74.493	4.905	4/6/1995	17:39	5.2	61	-76.146	5.899	19/1/2017	12:01	5	64
-74.316	6.292	1/5/2009	15:26	5.2	21	-74.249	6.044	19/9/2015	20:45	5	18
-73.078	6.676	18/2/1994	10:15	5.2	158	-74.226	6.116	22/11/1996	01:08	5	47
-73.036	6.703	13/9/2003	08:56	5.2	154	-71.664	6.341	6/10/2002	04:19	5	32
-73.115	6.722	11/6/1997	07:07	5.2	166	-72.89	6.689	30/10/1991	13:43	5	166
-72.931	6.726	1/12/2006	15:57	5.2	158	-74.632	6.752	18/11/1993	14:55	5	90
-72.992	6.744	12/9/2000	10:54	5.2	164	-72.96	6.773	8/8/1993	15:25	5	166
-73.003	6.748	4/9/2017	20:28	5.2	156	-72.949	6.806	23/6/1990	16:35	5	159
-72.957	6.778	2/4/2011	17:30	5.2	151	-71.926	6.817	13/4/1990	16:01	5	38
-76.357	6.809	1/5/2009	15:44	5.2	30	-73.862	7.109	21/3/2017	10:30	5	86
-74.614	6.872	19/9/1994	22:28	5.2	33	-77.404	7.304	6/8/2013	02:50	5	28
-74.579	7.063	11/6/1996	16:57	5.2	59	-76.301	7.391	16/11/1992	16:32	5	33
-74.643	7.391	28/3/2000	19:23	5.2	55	-75.062	8.091	25/11/1990	01:52	5	74
-74.11	7.62	3/9/1993	14:04	5.2	91	-73.873	8.754	4/1/1998	20:44	5	33
-73.642	7.667	17/2/1994	05:59	5.2	33	-74.707	10.69	2/5/2006	18:16	5	28
						-72.118	11.48	9/5/2015	14:31	5	39

Tabla 12. Catálogo sísmico de eventos destructivos.
Fuente: Elaboración propia.

Longitud	Latitud	Fecha	Hora	Mag (Mw)	Prof (km)
-76.362	1.929	30/9/2012	16:31	7.3	170
-76.862	7.075	18/10/1992	15:11	7.2	10
-77.393	1.135	9/2/2013	14:16	6.9	145
-76.057	2.917	6/6/1994	20:47	6.8	12
-75.749	3.849	2/9/1997	12:13	6.8	199
-75.577	5.139	19/8/1995	21:43	6.6	120
-72.916	5.05	19/1/1995	15:05	6.5	17
-76.622	4.104	8/2/1995	18:40	6.4	74
-77.393	7.306	4/11/1996	17:24	6.3	14
-72.988	6.776	10/3/2015	20:55	6.2	155
-75.724	4.461	25/1/1999	18:19	6.1	17
-75.574	4.707	23/11/1990	22:35	6.1	145
-71.21	6.47	22/7/1993	04:57	6.1	20
-76.169	7.374	14/9/2016	01:58	6	18

11.3. FRECUENCIA DE LOS SISMOS.

Se presentan las tablas de las diferentes frecuencias de los sismos elaboradas por año, mes, día y hora de ocurrencia.

Tabla 13. Frecuencia por año.
Fuente: Elaboración propia.

AÑO	FRECUENCIA
1990	18
1991	87
1992	24
1993	30
1994	17
1995	23
1996	29
1997	31
1998	30
1999	45
2000	44
2001	25
2002	16
2003	28
2004	34
2005	33
2006	39
2007	35
2008	25
2009	16
2010	16
2011	17
2012	20
2013	15
2014	27
2015	20
2016	28
2017	36
TOTAL	808

Tabla 14. Frecuencia por mes.
Fuente: Elaboración propia.

MES	FRECUENCIA
1	112
2	65
3	66
4	57
5	75
6	52
7	66
8	53
9	58
10	78
11	66
12	60
TOTAL	808

Tabla 15. Frecuencia por día.
Fuente: Elaboración propia.

DÍA	FRECUENCIA
1	21
2	35
3	24
4	23
5	16
6	25
7	24
8	41
9	27
10	29
11	27
12	23
13	29
14	24
15	21
16	21
17	25
18	32
19	44
20	24
21	26
22	25
23	32
24	28

25	23
26	24
27	22
28	24
29	18
30	29
31	22
TOTAL	808

Tabla 16. Frecuencia por hora.
Fuente: Elaboración propia.

HORA	FRECUENCIA
00:00	39
01:00	46
02:00	27
03:00	36
04:00	39
05:00	34
06:00	26
07:00	36
08:00	22
09:00	26
10:00	27
11:00	28
12:00	33
13:00	33
14:00	45
15:00	47
16:00	37
17:00	31
18:00	38
19:00	35
20:00	34
21:00	25
22:00	36
23:00	28
TOTAL	808