



Determinación de la magnitud máxima probable a partir del análisis de completitud sísmica en la región colombiana del Eje Cafetero

José Alejandro Cucuyame Morales

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Licenciatura en Ciencias Geológicas

Director:
Juan Pablo Marín Arias, Msc.

Co-director:
Dr. Luis Carlos Mas.

Universidad Nacional del Comahue
Facultad de Ingeniería, Departamento de Geología y Petróleo
Neuquén, Neuquén, Argentina
2020

Resumen

El proyecto se plantea con el fin de determinar los períodos de retorno de sismos de gran magnitud, magnitudes máximas probables y recurrencia de sismos fuertes para la región del Eje Cafetero en la República de Colombia, empleando la ley de Gutenberg-Richter, el método de Stepp y el ajuste potencial al mismo. Se elabora por métodos estadísticos y científicos un catálogo sísmico completo, generando una base de datos sólida, confiable y homogeneizada a magnitudes M_s y M_b . Las magnitudes máximas probables (M_{max}) obtenidas por la ley de Gutenberg-Richter corresponden a $M_s=8,020$ y $M_b=7,192$. Por el método de Stepp fue determinada una $M_{max}=6,745$ para la magnitud M_s y una $M_{max}=6,617$ para la magnitud M_b . Asimismo, la magnitud máxima probable obtenida a través del ajuste potencial al método Stepp son $M_s=6,338$ y $M_b=6,382$. En general, los resultados obtenidos evidencian una mejora al aplicar un ajuste potencial al método de Stepp, aunque, al momento de analizar los resultados obtenidos se debe tener en cuenta las limitaciones discutidas en el desarrollo del trabajo para una acertada interpretación.

Palabras clave: completitud sísmica, magnitud máxima probable del Eje Cafetero, método de Stepp.

Abstract

The project is proposed with the purpose of determine the return periods of large earthquakes, maximum probable magnitudes, and recurrence of strong earthquakes for the Eje Cafetero region of the Republic of Colombia, using the Gutenberg-Richter law, the Stepp's method and the potential adjustment of it. A complete seismic catalog was elaborated by statistics and scientific methods, producing a solid, reliable, and homogenized database of magnitudes M_s and M_b . The maximum probable magnitudes (M_{max}) obtained by the Gutenberg-Richter law correspond to $M_s=8,020$ and $M_b=7,192$. By Stepp's method a $M_{max}=6,745$ for the M_s magnitude, and a $M_{max}=6,617$ for the M_b magnitude were determined. Likewise, the maximum probable magnitude obtained through the potential adjustment to Stepp's method are $M_s=6,338$ and $M_b=6,382$. In general, the results obtained show an improvement when applying a potential adjustment to Stepp's method, although, at the moment to analyzing the results obtained, the limitations discussed in the development of the work must be taken into account for a correct interpretation.

Keywords: seismic completeness, maximum probable magnitude of the Eje Cafetero, Stepp's method.

Reconocimientos

En primer lugar, agradezco a mis padres por todo el apoyo incondicional que me han brindado siempre, por guiarme y formarme, por estar siempre presentes. Sin ellos, y sin su esfuerzo, este proyecto de vida no hubiera sido posible. Le agradezco a mi hermano y abuelos por siempre estar a mi lado, brindándome su apoyo y consejos. A mi novia por ser incondicional, por incentivar y motivarme siempre a superar con creces los objetivos trazados.

Le agradezco a la Universidad Nacional del Comahue por haberme formado como profesional, a todos los profesores que me aportaron a su medida sus enseñanzas y conocimientos, les agradezco la dedicación y vocación brindadas. A la República Argentina le agradezco por convertirse en mi segundo hogar, recibíndome con los brazos abiertos, siendo un país poseedor de una exquisita cultura, de la cual en esta última etapa he podido crecer tanto académicamente como personalmente. Sin duda alguna, Argentina será siempre parte de mí. Les agradezco a mis amigos que siempre estuvieron apoyándome, con los cuales compartimos muchas experiencias, gracias por estar siempre presentes.

Le agradezco al director Juan Pablo Marín Arias por toda su colaboración y excelente disposición, aportando toda su sabiduría para el desarrollo de la investigación, por su excelsa hospitalidad en la ciudad de Manizales y por haber aceptado realizar esta investigación. Le agradezco al co-director Luis Carlos Mas por su guía y colaboración, por sus consejos y recomendaciones, y aporte a este trabajo, gracias por aplicar sus saberes y conocimientos en pro del desarrollo de este trabajo de grado. A ambos, gracias por su paciencia y dedicación, esfuerzo y vocación, por todo el tiempo prestado para poder lograr siempre los mejores resultados. Sin duda alguna siempre estaré agradecido con ustedes.

Les agradezco a los integrantes del jurado, Sheyla Iglesias, José Gatica y Luis Peralta por haber asumido la responsabilidad de evaluar este trabajo, gracias por su tiempo y por aportarme sus correcciones y observaciones para que los resultados sean lo mejor.

Este trabajo está dedicado a mis padres, hermano, abuelos y novia por siempre apoyarme en el camino hacia una meta más.

La imaginación es más importante que el conocimiento. El conocimiento es limitado, la imaginación rodea el mundo.

Albert Einstein

Contenido

Pág.

1. Introducción	1
2. Justificación	4
3. Objetivos	5
3.1 Objetivo general	5
3.2 Objetivos específicos.....	5
4. Geografía y marco geológico de la zona de estudio	7
4.1 Geología tectónico regional	7
4.2 Estratigrafía de la región de estudio	9
4.2.1 Paleozoico.....	13
4.2.2 Mesozoico.....	15
4.2.3 Cenozoico	19
4.3 Geología estructural de la región de estudio	22
5. Marco teórico	26
5.1 Catálogo sísmico	26
5.2 La importancia de la estadística en la investigación científica	27
5.2.1 Regresión y correlación lineal	27
5.2.2 Error en las medidas	29
5.3 Magnitud sísmica	30
5.3.1 Magnitud local (MI).....	31
5.3.2 Magnitud de momento (Mw).....	32
5.3.3 Magnitud de ondas superficiales (Ms).....	32
5.3.4 Magnitud de ondas internas (Mb).....	33
5.4 Umbral mínimo de detección instrumental (M_{\min}) y frecuencia de ocurrencia sísmica.....	34
5.5 Método de Stepp.....	35
5.5.1 Recurrencia sísmica	37
5.5.2 Periodo de retorno de sismos.....	37
5.6 Método de Stepp mediante ajuste potencial	38
6. Metodología	39
6.1 confección de un catálogo sísmico	39
6.1.1 Descarga de información y ajuste al formato único	39

6.1.2	Distinción de la fuente y orden cronológico.....	43
6.2	Análisis de la sismicidad histórica	43
6.3	Complementación del catálogo mediante regresiones lineales	44
6.4	Cálculo del Umbral mínimo de detección instrumental (M_{\min}) y frecuencia de ocurrencia sísmica	47
6.5	Metodología del análisis de completitud probable y evaluación de la magnitud máxima probable a partir del método de Stepp.....	48
6.5.1	Metodología para el cálculo del periodo de retorno	51
6.6	Metodología para aplicar el método de Stepp mediante al ajuste potencial	52
7.	Resultados y discusión.....	54
7.1	Análisis de la sismicidad histórica	54
7.1.1	Focos sísmicos con profundidades hipocentrales menores a 30 kilómetros	62
▪	Sector oeste.....	63
▪	Sector este.....	63
7.1.2	Focos sísmicos con profundidades hipocentrales entre 30 a 60 kilómetros.....	65
7.1.3	Focos sísmicos con profundidades hipocentrales entre 60 a 100 kilómetros.....	67
7.2	Resultados al confeccionar y completar el catálogo sísmico	69
7.3	Umbral mínimo de detección instrumental (M_{\min}) y frecuencia de ocurrencia sísmica calculados para la región del Eje Cafetero	72
7.4	Análisis de completitud probable y resultados de la evaluación de la magnitud máxima probable a partir de la aplicación del método de Stepp.....	74
7.4.1	Periodo de retorno calculado para las magnitudes M_b y M_s para la región del Eje Cafetero	82
7.5	Resultados al aplicar el método de Stepp mediante el ajuste potencial	84
8.	Conclusiones y recomendaciones	91
8.1	Conclusiones	91
8.2	Recomendaciones.....	92

Lista de figuras

Pág.

Figura 1. Ubicación del área de estudio. Mapa confeccionado a partir de la información contenida en la base de datos del Servicio Geológico Colombiano.	1
Figura 2: Mapa tectónico del norte de Sudamérica y el Caribe el cual evidencia el sentido de los esfuerzos intraplaca. Se detalla el tipo de falla según la leyenda y se determinan las más importantes en esta región del continente. Entiéndase a ridge como dorsal. (Lopez & Zuluaga, 2012)	8
Figura 3: Mapa geológico extraído y adaptado para la región en estudio (A) y sus convenciones geológicas (B). (Tapias <i>et al.</i> , 2015)	10
Figura 4. Descripción gráfica de la geología estructural de la región. Mapa confeccionado a partir de la información contenida en las bases de datos del Servicio Geológico Colombiano.	23
Figura 5. Ejemplificación de correlación lineal (a) positiva, (b) ejemplificación de una nube de puntos que no tiene correlación y (c) negativa.....	28
Figura 6. Gráfico de Mb vs Log N.....	48
Figura 7. Ejemplo de cómo de como se hace la comparación entre $\sigma(\lambda)$ y $1T$	51
Figura 8. Metodología aplicada para la eliminación de puntos y corregir el R^2	53
Figura 9. Representa la cantidad de sismos entre 1805-1954 según el año vs número de sismos.....	54
Figura 10. Representa la cantidad de sismos entre 1955-1992 según el año vs número de sismos.....	55
Figura 11. Representa la cantidad de sismos entre 1993-2019 según el año vs número de sismos.....	56
Figura 12. RSNC vs otras fuentes.....	56

-
- Figura 13. Mapa de distribución de epicentros de todos los sismos ocurridos en el Eje Cafetero desde 1805 al 2019. Mapa confeccionado a partir de la información contenida en el catálogo y la base de datos del Servicio Geológico Colombiano. 58
- Figura 14. Mapas de sismos mayores (A) y menores (B) a 100 Km de profundidad. Mapa confeccionado a partir de los datos contenidos en el catálogo y la información contenida en la base de datos del Servicio Geológico Colombiano..... 59
- Figura 15. Mapas de sismos con focos menores a los 30 kilómetros (Km) de profundidad (A), focos de 30 a 60 Km de profundidad (B) y focos de 60 a 100 km de profundidad (C). Mapas confeccionados a partir de los datos contenidos en el catálogo y la información contenida en la base de datos del Servicio Geológico Colombiano. 60
- Figura 16: Representación gráfica confeccionada en tercera dimensión (3D) de todos los sismos con profundidades hipocentrales menores a 100 kilómetros contenidos en el catálogo, evidenciando las fallas más importantes (líneas negras). La vista del cubo es en sentido hacia el noroccidente (A) y hacía el nororiente (B). Para la realización del modelamiento (3D) de la región del Eje Cafetero se empleó información descargados desde la base de datos del Sistema Geológico Colombiano. 62
- Figura 17: Representación gráfica confeccionada en tercera dimensión (3D) de todos los sismos con profundidades hipocentrales menores a 30 kilómetros contenidos en el catálogo, evidenciando las fallas más importantes (líneas negras) y la magnitud. La vista del cubo es en sentido hacia el nororiente (A) y hacía el noroccidente (B). Para la realización del modelamiento (3D) de la región del Eje Cafetero se empleó información descargados desde la base de datos del Sistema Geológico Colombiano. 64
- Figura 18: Representación gráfica confeccionada en tercera dimensión (3D) de todos los sismos con profundidades hipocentrales de 30 a 60 kilómetros contenidos en el catálogo, evidenciando las fallas más importantes (líneas negras) y la magnitud. La vista del cubo es en sentido hacia el noroccidente (A) y hacía el nororiente (B). Para la realización del modelamiento (3D) de la región del Eje Cafetero se empleó información descargados desde la base de datos del Sistema Geológico Colombiano. 66
- Figura 19: Representación gráfica confeccionada en tercera dimensión (3D) de todos los sismos con profundidades hipocentrales de 60 a 100 kilómetros contenidos en el catálogo, evidenciando las fallas más importantes (líneas negras) y la magnitud. La vista del cubo es

en sentido hacia el nororiente (A), suroriente (B) y noroccidente (C). Para la realización del modelamiento (3D) de la región del Eje Cafetero se empleó información descargados desde la base de datos del Sistema Geológico Colombiano	69
Figura 20. Regresiones lineales para el Eje Cafetero de las ecuaciones 18-23.	70
Figura 21. Regresiones lineales para el Eje Cafetero de las ecuaciones 24-29.	71
Figura 22. Gráficos provenientes de las Tabla 12 y Tabla 13.	73
Figura 23. Graficas de correspondientes a las magnitudes Ms (a) y Mb (b).	74
Figura 24. Grafico del periodo de tiempo vs Desviación estándar para Ms.	79
Figura 25. Grafico del periodo de tiempo vs Desviación estándar para Mb.....	80
Figura 26. Gráfico de la Magnitud Ms vs Log N.....	81
Figura 27. Gráfico de la Magnitud Mb vs Log N.	82
Figura 28. Gráfico de Años vs Desviación estándar para las magnitudes Ms antes del ajuste potencial.....	84
Figura 29. Gráfico de Años vs Desviación estándar para las magnitudes Mb antes del ajuste potencial.....	84
Figura 30. Gráfico de Años vs Desviación estándar para las magnitudes Mb después de aplicar el ajuste potencial.....	85
Figura 31. Gráfico de Años vs Desviación estándar para las magnitudes Ms después de aplicar el ajuste potencial.....	86
Figura 32. Gráfico Ms vs Log N para el ajuste potencial al método de Stepp correspondiente a la magnitud Ms.....	88
Figura 33. Gráfico Mb vs Log N para el ajuste potencial al método de Stepp correspondiente a la magnitud Mb.	89

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1: Cuadro cronoestratigráfico extraído del original para la región de estudio. (Tapias <i>et al.</i> , 2015)	10
Tabla 2. Formato único con las características básicas del sismo.	42
Tabla 3. Explicación de las siglas usadas en el formato único.	42
Tabla 4. Formato tomado del catálogo original donde se puede ver la clasificación por colores y el orden cronológico.	43
Tabla 5: Clasificación de las fuentes por un color asociado.	43
Tabla 6: Ejemplificación del filtro aplicado para Mw vs Ms.	45
Tabla 7: Tablas donde se observa el ajuste a base del cálculo de errores. En la tabla (a) se selecciona el 20% y en la tabla (b) se han de eliminar.	46
Tabla 8. Tabla que evidencia el ordenamiento y los cálculos de N y Log N.....	47
Tabla 9. Magnitudes divididas en periodos de tiempo de 5 años y en intervalos de 0,5 unidades de magnitud.	49
Tabla 10. Metodología a seguir para organizar los valores de la desviación estándar en determinados periodos de tiempo.	50
Tabla 11. Comparación de los R^2	71
Tabla 12: Magnitud Ms agrupada en intervalos de 0,5.....	72
Tabla 13. Magnitud Mb agrupada en intervalos de 0,5.	72
Tabla 14: Magnitud Ms agrupada en intervalos de 0,5 a partir del M_{\min}	73
Tabla 15: Magnitud Mb agrupada en intervalos de 0,5 a partir del M_{\min}	73
Tabla 16. Número acumulativo de sismos para magnitud Ms.....	74
Tabla 17. Número acumulativo de sismos para magnitud Mb.	75
Tabla 18. Número acumulativo de sismos y tasa de ocurrencia de sismos para la magnitud Ms.	76

Tabla 19. Número acumulativo de sismos y tasa de ocurrencia de sismos para la magnitud Mb.....	77
Tabla 20. Desviación estándar para cada periodo de tiempo y magnitud Ms.....	78
Tabla 21. Desviación estándar para cada periodo de tiempo y magnitud Mb.	79
Tabla 22. Intervalos de tiempo que se encuentran en completitud para la magnitud Ms aplicando el método de Stepp.	81
Tabla 23. Intervalos de tiempo que se encuentran en completitud para la magnitud Mb aplicando el método de Stepp.	81
Tabla 24. Períodos de retorno para las Magnitudes Ms en la región del Eje Cafetero aplicando el método de Stepp.	82
Tabla 25. Períodos de retorno para las Magnitudes Mb en la región del Eje Cafetero aplicando el método de Stepp.	83
Tabla 26. R^2 para los intervalos de magnitudes Ms sin el ajuste potencial.....	85
Tabla 27. R^2 para los intervalos de magnitudes Mb sin el ajuste potencial.	85
Tabla 28. R^2 para los intervalos de magnitudes Ms con el ajuste potencial.	86
Tabla 29. R^2 para los intervalos de magnitudes Ms con el ajuste potencial.	86
Tabla 30. Intervalos de completitud determinados para la magnitud Ms.	87
Tabla 31. Intervalos de completitud determinados para la magnitud Ms.	87
Tabla 32. Cálculo del promedio de la tasa media de ocurrencia, numero de eventos y Log N para el ajuste potencial al método de Stepp correspondiente a la magnitud Ms.....	87
Tabla 33. Cálculo del promedio de la tasa media de ocurrencia, numero de eventos y Log N para el ajuste potencial al método de Stepp correspondiente a la magnitud Mb.	88
Tabla 34. Períodos de retorno para las Magnitudes Ms calculadas a partir del ajuste potencial al método de Stepp en la región del Eje Cafetero.	89
Tabla 35. Períodos de retorno para las Magnitudes Mb calculadas a partir del ajuste potencial al método de Stepp en la región del Eje Cafetero.	90
Tabla 36: tabla que resume los resultados obtenidos para la magnitud máxima probable empleando los métodos propuestos en el actual trabajo	90

1. Introducción

El Eje Cafetero es una importante región geográfica, cultural, económica y ecológica de la República de Colombia, la componen los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda y zonas aledañas a los departamentos de Tolima, Antioquia Valle del Cauca, Chocó y Cundinamarca (Figura 1).

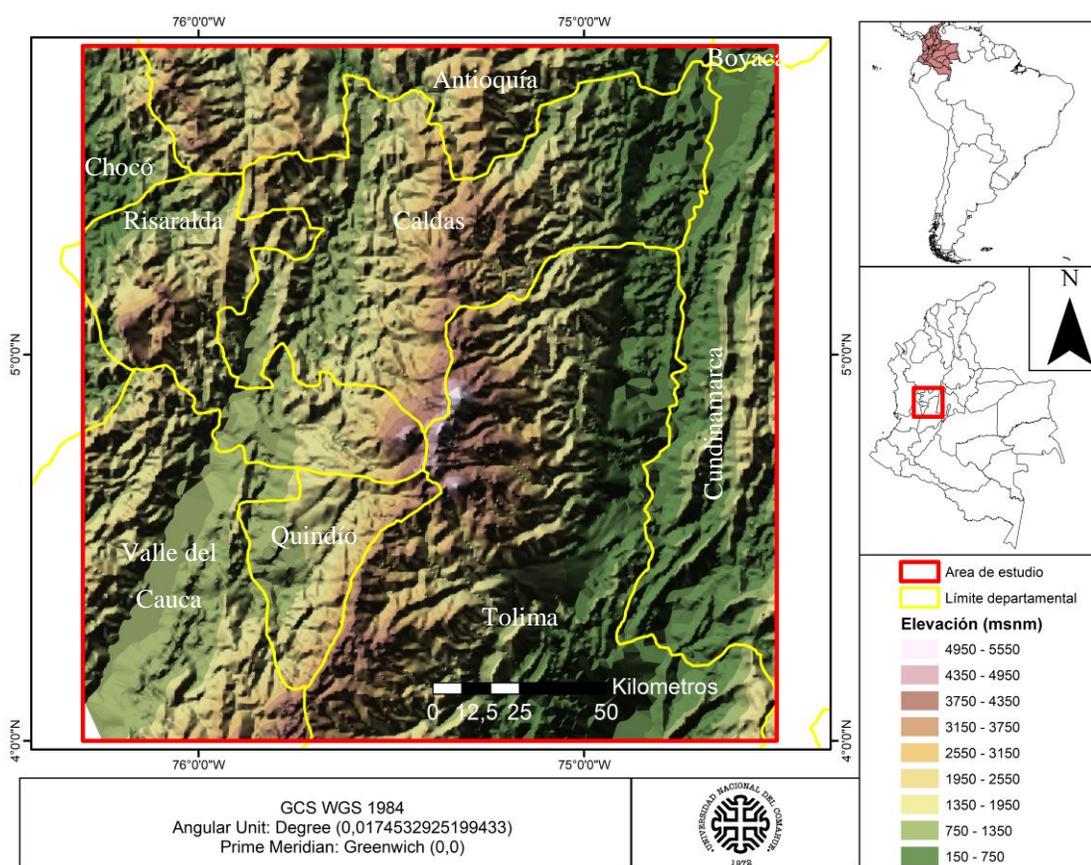


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Mapa confeccionado a partir de la información contenida en la base de datos del Servicio Geológico Colombiano.

La Unesco ha nombrado a esta región por su paisaje cultural como patrimonio de la humanidad, siendo además un importante núcleo económico del país, siendo un impulsor en

este sector gracias a que históricamente son los mayores exportadores del café del país, aportando el 4% del PIB, aun así, es una región que no es ajena a fenómenos sísmicos y que ha sido afectada en repetidas ocasiones, un ejemplo claro es el terremoto de 1999 el cual afectó gran parte del departamento del Quindío y zonas aledañas, provocando 1900 muertes aproximadamente e incalculables daños en las edificaciones, inhabilitando parcial o definitivamente su uso.

Debido a la ubicación de esta región (4° y $5,8^{\circ}$ de latitud oeste; $76,3^{\circ}$ y $74,5^{\circ}$ de longitud oeste), entre las cordilleras Occidental y la Central de los Andes colombianos, está demarcada por una zona que es afectada por los procesos tectónicos que cubren esta parte del continente a través de los Andes. En este sentido, la convergencia de la placa de Nazca, Cocos, Caribe y Sudamericana es uno de los principales factores de la sismicidad colombiana, lo cual conlleva a tener un alto riesgo sísmico en esta región, surgiendo la necesidad de reunir información de registros sísmicos que han sido recopilados a través del tiempo (en este caso, referente a un periodo comprendido desde 1805 al 2019).

El dinamismo y el movimiento de estas cuatro placas determinan ciertas características de la región colombiana en cuestión, como son las manifestaciones volcánicas e importantes conjuntos de fallas, como la Romeral, la cual corresponde a un sistema de fallas que se entrecruzan, extendiéndose 1600 km con dirección de sur a norte. Estas se ubican en el piedemonte de la cordillera central (Kammer, 1993); también, en otros sectores se presenta la falla de desplazamiento dextralateral La Palestina, con extensión de 350 km, una dirección $N 15^{\circ} E$ y un (Duque-Escobar, 2019).

En vista de la geografía, marco geológico y del historial sísmico conocido de la región en cuestión, surge la necesidad de recopilar los registros sísmicos que han sido confeccionados a través del tiempo (periodo comprendido desde 1805 al 2019), de esta manera, procediendo con el empleo de métodos estadísticos, como es el método de Stepp, la relación de Gutenberg-Richter y otro que se desarrolla con base de un ajuste potencial del método de Stepp, se ha de generar bases de datos artificiales que ayuden a determinar distintos parámetros como magnitudes máximas posibles, hallar la tasa media de ocurrencia de sismos fuertes y periodos de retorno de fenómenos sísmicos. Dado esto, es posible comprender de

manera más detallada el riesgo que genera la actividad sísmica en esta región, y consecuentemente completar vacíos en los registros sísmicos originales.

En este trabajo se parte de los datos recopilados en catálogos de distintas fuentes y como primer paso se ejecuta una estandarización para una mejor comprensión, además de poder anexar de manera más ordenada la información que provenía de distintos orígenes. En total, se logró la recopilación de 12203 sismos registrados que ocurrieron en un lapso de 215 años, estos fueron filtrados y asimismo corregidos. Debido a las distintas magnitudes con las que los registros fueron almacenados, para obtener un análisis más claro, se decidió convertir todas las magnitudes en valores de M_b y M_s , esto de acuerdo a ciertas condiciones que se explican en el desarrollo del presente estudio, posteriormente completando los vacíos de estas dos magnitudes en el catálogo (que no es lo mismo que el proceso de completitud), usando distintas fórmulas calculadas a partir de la aplicación de regresiones lineales. Luego, a este catálogo unificado, estandarizado y completado respecto a sus magnitudes M_b y M_s , le fueron aplicados los métodos estadísticos mencionados anteriormente, definiendo posiblemente periodos de completitud, calculando periodos de retorno y magnitudes máximas probables.

2. Justificación

Debido a la sismicidad producida por el movimiento y convergencia generada por las placas Cocos, Nazca, Caribe y Sudamericana y partiendo del hecho de que no es posible poder predecir un terremoto, surge la necesidad de tener un catálogo completo, que, a partir de él y por medio de la implementación de métodos estadísticos, se puedan extraer datos importantes, asimismo, determinar la magnitud máxima probable, periodos de retorno y recurrencia de sismos fuertes, pueden proveer información y recomendaciones sobre el comportamiento y características sísmicas generales, a las entidades encargadas de la prevención y gestión de riesgo por amenaza sísmica de la región.

La región del eje cafetero ha sido afectada a lo largo de su historia por grandes sismos, por lo cual, el experimentar con nuevos métodos estadísticos junto al tradicional y poder comparar sus resultados. Se espera un impacto favorable, ya que la actualización y normalización de información del catálogo sísmico original de la región, aportará al ámbito científico, académico, social y económico, de una valiosa información de las características sísmicas de la región. Esto puede ayudar a la comprensión de estos fenómenos sísmicos, y promover a que los métodos aplicados en este trabajo puedan ser replicados en otros lugares.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Elaborar un análisis de completitud sísmica de la región del Eje Cafetero debido a la falta de registros de diferentes magnitudes y que, a partir de esto se pueda emplear el método de Stepp, ley de Gutenberg-Richter y la aplicación del ajuste potencial al método de Stepp, obteniendo los períodos de retorno de sismos de gran magnitud, magnitudes máximas probables y recurrencia de sismos fuertes con el fin de aportar información sobre las características sísmicas de esta región.

3.2 Objetivos específicos

- Contribuir con información y subsanar vacíos del catálogo sísmico elaborado para el Eje Cafetero (Galeano & Ramirez, 2015), y para el Departamento de Caldas (Manrique Escobar, 2019), para las magnitudes de onda superficiales (Ms), y de ondas de cuerpo (Mb), y de esta manera confeccionar el catálogo sísmico con información faltante hasta el año 2019.
- Emplear la ley de Gutenberg – Richter para el cálculo del umbral mínimo de detección instrumental.
- Emplear el método de Stepp, el cual es un método que evalúa la estabilidad de la tasa media de la ocurrencia de sismos en un rango de magnitud y en una serie de periodos de tiempo predefinidos (Stepp, 1972).
- Emplear el método del ajuste potencial al método de Stepp, siendo éste una variante metodológica al método original y de este modo comparar los resultados obtenidos con los dos métodos, permitiendo obtener una base de datos más fidedigna a las características sísmicas de la región en estudio (Arroyo *et al.*, 2017).

-
- Asociar al marco geológico de la zona las características sísmicas obtenidas y los eventos plasmados en el catálogo sísmico confeccionado, determinando en función de la profundidad y coordenadas geográficas, su vinculación con los procesos de tectónica de placa o de grandes grupos de fallas que afectan esta región.

4. Geografía y marco geológico de la zona de estudio

4.1 Geología tectónica regional

El territorio colombiano se ubica en el extremo más septentrional de Sudamérica, y a su vez constituye el margen noroccidental de la Placa Sudamericana. Dicha placa ha tenido una constante interacción con las placas de Caribe y Nazca (Figura 2), generando el levantamiento del sistema orogénico del norte de los Andes a lo largo del Cenozoico. En la actualidad, estas placas están en constante movimiento, acercándose entre sí, ocasionando deformaciones en la corteza continental, y así mismo, una actividad sísmica y actividad volcánica intensas (Lopez & Zuluaga, 2012).

La convergencia oblicua entre las placas Caribe y Sudamericana en sentido sureste, con un ángulo de subducción de aproximadamente 20° y una velocidad de convergencia de 1-2 cm/año, provoca un evento tectónico compresivo que deforma el margen noroccidental de la Placa Sudamericana en el norte del territorio colombiano (Montes *et al.*, 2010). Se destacan algunas importantes cadenas montañosas en dirección subperpendicular al vector de convergencia relativa, producto de los esfuerzos interplaca, de lo cual son ejemplo el sector norte de la Cordillera Oriental, la Serranía del Perijá y los Andes de Mérida en Venezuela. (Kellogg & Bonini, 1982).

La Placa de Nazca converge de manera oblicua con la Placa Sudamericana en dirección sureste y tiene una tasa de movimiento de 6,6 cm/año y un ángulo de subducción aproximado de 35° . Una porción del movimiento es absorbida parcialmente por el continente, generando acortamiento cortical, y el movimiento restante es transferido a los sistemas de fallas de rumbo dextral que se observan en las cordilleras Occidental, Central y Oriental, y los valles (Figura 2). La actividad volcánica de Colombia se encuentra asociada a la subducción de la

Placa de Nazca, lo cual conlleva a la formación de un arco volcánico segmentado en varios sectores a lo largo de la Cordillera Central. (Balanta *et al.*, 2008)

La Microplaca Coiba se ubica entre el Cinturón de Deformación del Sur de Panamá y el límite transcurrente de Hey (Figura 2), cuya dirección de movimiento es en sentido oeste-este con una tasa de 2,5 cm/año, provocando el levantamiento de la Serranía del Baudó, ubicada entre Colombia y Panamá (Monsalve & Mora, 2005). Por su parte, la microplaca Panamá tiene una tasa de movimiento de 3 cm/año y colisiona contra el continente aportando a una mayor deformación cortical, generando cabalgamientos y transurrencias sinestrales, como las fallas de Arma, Santa Marta-Bucaramanga, etc (Balanta *et al.*, 2008).

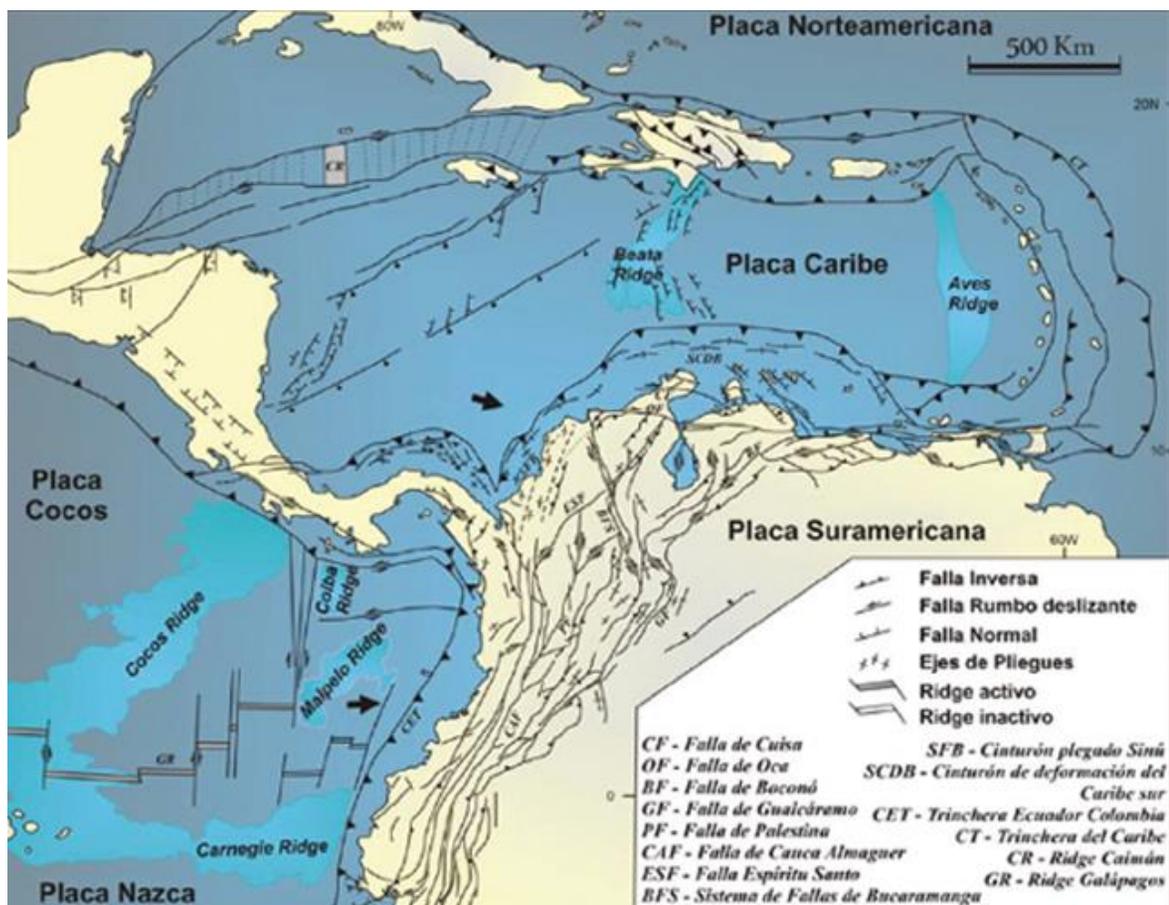
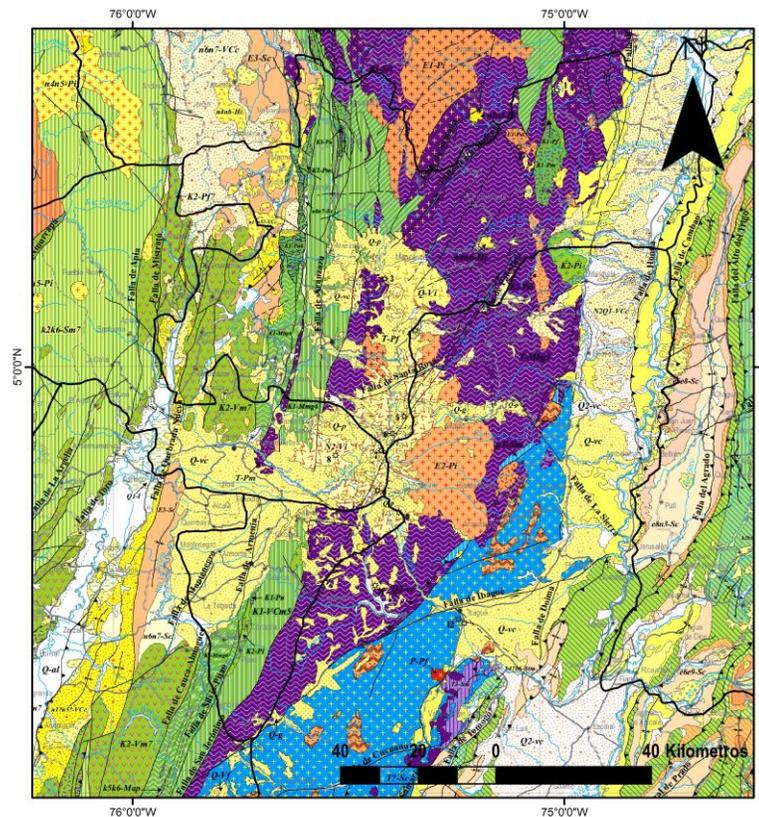


Figura 2: Mapa tectónico del norte de Sudamérica y el Caribe el cual evidencia el sentido de los esfuerzos intraplaca. Se detalla el tipo de falla según la leyenda y se determinan las más importantes en esta región del continente. Entiéndase a ridge como dorsal. (Lopez & Zuluaga, 2012)

La Placa de Cocos (Figura 2) subduce debajo de la Placa Caribe con una velocidad de convergencia aproximada de 7,3 a 8,4 cm/año y provoca un evento tectónico compresivo que deforma el margen occidental de Centroamerica, destacándose algunas cadenas montañosas importantes (DeMets, 2001). La subducción entre estas dos placas genera el vulcanismo del Arco Volcánico Centroamericano e intensa actividad sísmica (Giner-Robles *et al.*, 2008). El límite entre la Placa de Nazca y de Cocos es divergente en algunos sectores y en otros es transformante. Estas dos placas provienen de la antigua Placa de Farallón, que se fragmento hace aproximadamente unos 25 a 28 millones de años (Lonsdale & Klitgard, 1978).

4.2 Estratigrafía de la región de estudio

Se puede observar en la Figura 3 el mapa geológico de la región en estudio y su respectivo cuadro cronoestratigráfico en la Tabla 1 en el cual se detalla la litología y su respectiva edad de depositación.



A

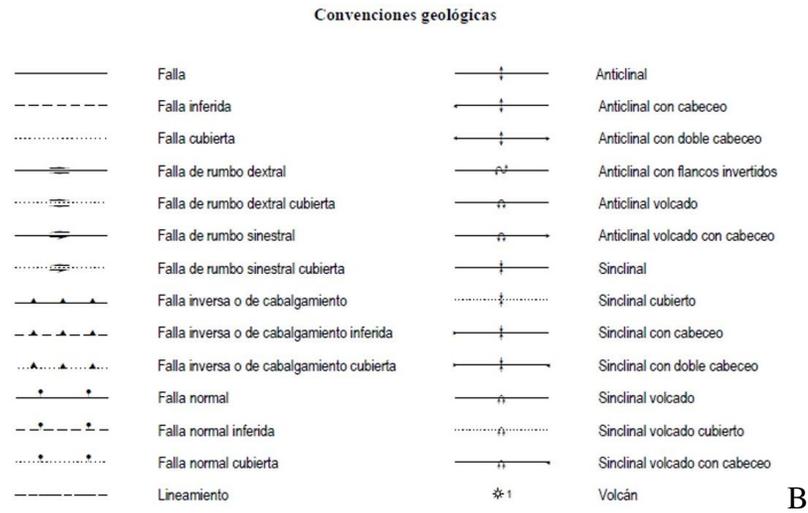
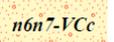
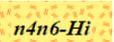
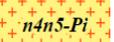
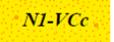
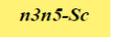
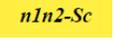
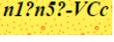
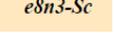
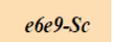
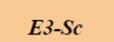
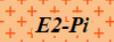
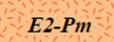
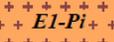
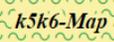
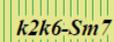
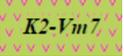
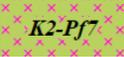
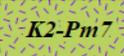
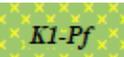
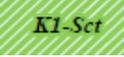
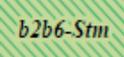
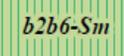
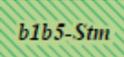
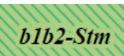


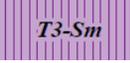
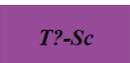
Figura 3: Mapa geológico extraído y adaptado para la región en estudio (A) y sus convenciones geológicas (B). (Tapias *et al.*, 2015)

Tabla 1: Cuadro cronoestratigráfico extraído del original para la región de estudio. (Tapias *et al.*, 2015)

Era	Periodo	Leyenda			
C	U	<i>Q2-vc</i>	Flujos volcanoclásticos constituidos por piroclastos y epiclastos de composición andesítica y dacítica		
		<i>Q-t</i>	Terrazas aluviales		
		<i>Q-g</i>	Depósitos glaciares		
		<i>Q-al</i>	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales		
		<i>Q-Vi</i>	Andesitas porfiríticas		
		<i>Q1-l</i>	Arcillas, turbas, y arcillas arenosas con niveles delgados de gravas.		
		<i>Q-vc</i>	Flujos volcanoclásticos constituidos por piroclastos y epiclastos de composición andesítica		
		<i>Q-p</i>	Depósitos de ceniza y lapilli de composición andesítica		
		E	(Q)	<i>N2Q1-Vcc</i>	Arenitas feldespáticas y líticas; arcillolitas, y conglomerados
				<i>N2-Vi</i>	Lavas e ignimbritas de composición andesítica
<i>n6n7-Sc</i>	Arenitas líticas a sublíticas, arenitas conglomeráticas, limolitas y arcillolitas abigarradas				

O Z O I C O (CZ)	N E Ó G E N O (N)		Basaltos y andesitas basálticas porfiríticas con fenocristales de granate intercalados con aglomerados y tobas. Predominio de epiclastos
			Pórfidos dioríticos, granodioríticos y tonalíticos
			Monzonitas y tonalitas
			Brechas riolíticas constituidas por piroclastos y epiclastos
			Cuarzoarenitas de grano fino a conglomeráticas intercaladas con lodolitas
			Arenitas granodecrecientes de grano medio predominante
			Conglomerados, arenitas de grano grueso y tobas dacíticas.
	P A L E Ó G E N O (E)		Arcillolitas abigarradas y cuarzoarenitas de grano fino a conglomeráticas
			Intercalaciones de capas rojas de conglomerados, arenitas líticas conglomeráticas y arcillolitas
			Arenitas, limolitas y lodolitas con mantos delgados de carbón
			Arenitas conglomeráticas y conglomerados en la base y el techo; arenitas, arcillolitas y carbones en la parte media
			Intercalaciones de lodolitas calcáreas y silíceas; arenitas calcáreas; tobas; aglomerados; cherts, y basaltos
			Granodioritas que varían a cuarzdioritas y cuarzomonzonitas
			Cuarzdioritas que varían a dioritas
		Cuarzdioritas	
		Tonalitas a granodioritas con algunas variaciones a dioritas, aplitas y gabros	
		Shales y arenitas glauconíticas a la base; limolitas y arcillolitas intermedias, y calizas y shales calcáreos al tope	
			Esquistos glaucofánicos intercalados con esquistos anfibólicos y cloríticos
			Lodolitas; arenitas lodosas y arenitas líticas; cherts; calizas; tobas, y aglomerados. Localmente cataclasitas

M E S O Z O I C O O (MZ)	C R E T Á C I C O (K)		Basaltos toleíticos, y doleritas, picritas, tobas básicas y brechas volcánicas.
			Tonalitas que varían a cuarzodioritas
			Gabros que varían de olivínicos a cuarzogabros, a través de noritas y gabros hornbléndicos
			Granodioritas, tonalitas y cuarzodioritas
			Basaltos y andesitas intercalados con arenitas lodosas líticas, lodolitas carbonosas, arenitas feldespáticas, calizas y limolitas silíceas
			Tonalitas y granitos
			Serpentinas
			Conglomerados y cuarzoarenitas que gradan a limolitas y lodolitas oscuras con intercalaciones de arenitas y conglomerados
			Gabros bandeados isotrópicos y dioritas
			Peridotitas serpentinizadas intruidas por diques de rodingitas
			Anfibolitas, algunas granatíferas; metagabros; metadioritas, y serpentinitas.
			Shales calcáreos o silíceos; cherts; cuarzoarenitas y arenitas líticas; conglomerados gradados, y calizas arrecifales.
			Shales con yeso, cherts, calizas y arenitas
			Shales y cuarzoarenitas de grano fino a grueso
			Cuarzoarenitas; arenitas feldespáticas o líticas, gradadas, finas a conglomeráticas, e intercalaciones rítmicas de shales y calizas al tope.
	JU RÁ SI CO		Granodioritas que varían de sienogranitos a tonalitas y de cuarzomonzonitas a cuarzomonzodioritas
			Tobas, aglomerados y gravas; ocasionalmente intercalaciones de arenitas líticas rojas
	T		Ortogneises graníticos

R I Á S I C O (T)			Calizas interestratificadas con arcillolitas, limolitas, <i>shales</i> calcáreos y arenitas
			Esquistos grafiticos, cuarzomoscovíticos, cloríticos y anfibólicos; filitas; cuarcitas; mármoles, y serpentinitas
			Gneises cuarzofeldespáticos, algunos con sillimanita y cordierita; metatonalitas; anfibolitas; granulitas, y migmatitas
			Capas rojas de limolitas, arenitas de grano fino hasta conglomeráticas, conglomerados y brechas
PA LEO ZO ICO (PZ)	PÉR MI CO (P)		Granitos de anatexia, gneises cuarzofeldespáticos, gneises migmatíticos, anfibolitas y granulitas

4.2.1 Paleozoico

Las rocas paleozoicas que afloran en el área son metamorfitas de bajo a medio grado de metamorfismo en facies esquistos verde a anfibolita que forman el núcleo de la Cordillera Central (González, 2001).

Complejo Cajamarca: Nombre empleado para designar el conjunto de rocas metamórficas que constituyen el núcleo de la Cordillera Central (Gonzales, 1989). Esta área presenta una composición muy variada, lo que es resultado de diversos episodios metamórficos regionales a los cuales se suman efectos térmicos o dinámicos locales de intensidad variable. El área es separada en tres grupos composicionales, diferenciación que es notable a partir de las características mineralógicas además de su fácil identificación, estas son (González, 2001):

- Grupo Pelítico: Constituido por filitas, esquistos sericíticos y micáceos y metasedimentitas.
- Grupo Cuarzoso: Cuarcitas.
- Grupo Básico: Esquistos Actinolíticos-Cloríticos o verdes y anfibolitas.

Grupo Bugalagrande: Postulado como una secuencia metamórfica pelítica-metavolcánica de composición básica, probablemente de origen oceánico (Mc Court & Feininger, 1984). Está compuesto de esquistos Anfibólicos, esquistos cloríticos, esquistos grafíticos con intercalaciones locales de cuarcitas y psamitas (Court *et al.*, 1985).

Neis de Chinchiná: En principio denominado Neis Intrusivo de Chinchiná (Mosquera, 1978), nomenclatura simplificada al tener presentes las características mineralógicas y relación con otras unidades metamórficas en el área. A nivel macroscópico predomina la roca de grano medio a grueso con estructura néisica, la cual es definida por la orientación de láminas de biotita entre bandas gruesogranulares de cuarzo y feldespato, a veces porfidoblástica con cristales de ortoclasa, e incluso en algunos casos plegada con bandas claras de cuarzo-feldespato que se estrangulan y se segmentan. Por otro lado, a nivel microscópico se aprecia una orientación definida por láminas de mica y ocasionalmente sillimanita fibrosa. Además, está constituida por cuarzo, feldespatos y, de vez en cuando, granate (Estrada *et al.*, 2001; González, 2001).

Intrusivos Gnéisicos: Rocas granitoides de estructura gnéisica, limitados mayoritariamente por fallas, siendo posible evidenciar un origen ígneo en gran parte de ellas. Son notoriamente intrusivos en las metamorfitas encajantes generando paragénesis metamórficas en desequilibrio térmico con aquellas de metamorfismo regional, por otro lado, logra cambiar la estructura produciendo cornubianitas. Pueden ser considerados intrusivos sintectónicos ya que al observar varias muestras, la textura protoclastica parece haber sido obtenida cuando el magma estaba parcialmente cristalizado (González, 2001).

Esquistos anfibólicos del río Cauca: Se presenta en forma de cuerpo alargado y estrecho, circunscrita a la depresión del río Cauca, que lo corta en forma longitudinal. Éste se presenta intercalado con esquistos cuarzo-sericíticos y hacia el sur en contacto fallado con rocas ultrabásicas serpentinizadas, además, los intruyen cuerpos de andesitas porfiríticas tanto al este como al oeste (Calle & González, 1982).

Esquistos cuarzo sericíticos: Su principal exposición es una franja estrecha a lo largo del río Cauca. Estos esquistos son rocas finamente laminadas en capas, localmente pueden ser

algo bandeados, su color es oscuro, de lustre graso, untuoso al tacto, por lo general replegados y con venas de cuarzo lechoso, paralelas a la foliación y que se acomodan por lo general a la forma de los plegamientos. La textura es generalmente heteroblástica y están principalmente compuestos por cuarzo, plagioclasa, moscovita, clorita, biotita, calcita, sericita, grafito, ocasionalmente clinozoisita y cloritoide o granates y como accesorios comunes esfena, circón e ilmenita (Calle & González, 1982).

4.2.2 Mesozoico

Batolito de Sonsón: Intrusivo jurásico que da inicio al registro del Mesozoico en la presente zona de la Cordillera Central, en parte cubierto por rocas piroclásticas recientes que enmascaran sus relaciones con otras unidades en el área. Es de composición homogénea, predominantemente tonalítica con rocas más básicas, dioritas y gabros, y además señala un origen magmático inyectado en una sola etapa (González, 2001).

Formación Valle Alto: De origen jurásico. En el área se encuentran contactos entre sedimentitas y plutonitas o metamorfitas que son fallados o están cubiertos por acumulación de piroclastos recientes. Predominan sedimentitas areno-rudáceas y las facies reconocidas son de conglomerados, arenitas, lodolitas y de vulcanoclastitas (González, 2001).

Formación Abejorral: Unidad originada en el cretácico inferior, en gran parte cubierta por depósitos piroclásticos recientes que enmascaran los contactos con las unidades adyacentes. Es una secuencia areno-arcillosa con delgadas intercalaciones de cenizas finas en los niveles arcillosos superiores, así, el nivel basal expuesto está conformado por capas de conglomerado con soporte arenoso y, en ocasiones, grano soportados, con gravas tamaño guijo y guijarro, redondeadas a subredondeadas de cuarcitas y cuarzo lechoso, con matriz de grano fino a grueso de formas redondeadas. Por encima de los niveles conglomeráticos aparecen facies de arenitas con estructuras, composición y contenido faunístico variable (González, 2001).

Complejo Quebrada grande: Se caracteriza por intercalaciones de rocas volcánicas y sedimentarias, con amplias variaciones litológicas tanto en la secuencia sedimentaria como en la relación entre flujos volcánicos y capas piroclásticas. Constituye gran parte del flanco occidental de la Cordillera Central, poseen una alta complejidad estructural y una clara ausencia de una base y un techo, lo cual dificulta la definición de sus linderos estratigráficos (González, 2001), siendo esta de edad Cretáceo inferior (Court *et al.*, 1985).

Ultramáficas de Filadelfia: Mayormente constituido por ultramafitas serpentinizadas de estructura masiva a esquistosa intensamente fracturada y con plegamientos de arrastre, poliedros de cizalladura con núcleos de peridotita masiva y capas envolventes de serpentinita esquistosa. La roca fresca es finogranular de color gris oscuro verdoso y cambia a colores grises azulosos y verdes de acuerdo con el grado de serpentización. Por otro lado, a nivel microscópico, la composición mineralógica corresponde a la de peridotitas con variando de dunitas a harzburgitas y posiblemente websterita, además, los accesorios más comunes son cromita, picotita, magnetita y carbonatos (magnesita secundaria) (Estrada *et al.*, 2001; González, 2001).

Complejo Arquía: Nombre empleado para agrupar las metamorfitas cretácicas localizadas al occidente del Complejo Quebradagrande y separado de esta unidad por la Falla Silvia-Pijao. En función del predominio de rocas pelíticas o básicas es posible considerar dos unidades en el área de trabajo, una donde predominan esquistos sericíticos grafitosos y otra de metabasitas separando de ésta debido a sus características particulares el cuerpo de Anfibolita Saussurítica de Chinchiná (González, 2001)(Estrada *et al.*, 2001).

Stock de Manizales: Cuerpo de rocas granitoides de origen cretácico, aflora al norte del Volcán Nevado del Ruiz y al este de la ciudad de Manizales, en gran parte se encuentra cubierto por depósitos piroclásticos provenientes de la acción pliocuaternaria del Complejo Volcánico Ruiz-Tolima. El Stock presenta un intenso diaclasamiento que facilita la acción de agentes atmosféricos y son comunes los bloques redondeados en capas producto de meteorización esferoidal. A nivel macroscópico, está constituido por rocas faneríticas equigranulares de grano medio a fino, y composición predominante granodiorita-tonalita, con facies ocasionales un poco más ácidas. La textura es hipidiomórfica granular,

localmente afectada por efectos dinámicos que producen granulación y modificación en las características cristalográficas de las fases presentes, tales como extinción ondulatoria, flexionamiento de micas y fracturamiento (González, 2001).

Grupo Cañasgordas: Comprende la Formación Barroso y la Formación Penderisco como litunidades, asociadas al cretáceo tardío. Por un lado, la Formación Barroso constituye dos franjas que difieren en sus características litológicas: una occidental, donde predominan tobas y aglomerados sobre los basaltos y diabasas, con intercalaciones de sedimentos silíceos, y una franja oriental con basaltos y diabasas donde no se encuentran rocas piroclásticas ni sedimentitas (Estrada *et al.*, 2001). Por otro lado está la formación Penderisco, cuya variedad litológica permite dividirla en dos unidades: sedimentos de características turbidíticas (Miembro Urrao) y sedimentos biogénicos o químicos finos (Miembro Nutibara) (Estrada *et al.*, 2001).

El Stock Monzonítico de Irra: Corresponde a un cuerpo intrusivo La roca predominante es un granitoide de grano medio a grueso, masivo, de color gris a gris rosa moteado de negro por ferromagnesianos y de composición monzonita piroxénica, con variación a sienita y cerca de los contactos a diorita piroxénica–monzodiorita piroxénica y gabro. Forma parte del cinturón de plutones del Cretácico Superior que se localiza entre las cordilleras Central y Occidental en el Graben Cauca–Patía (Estrada *et al.*, 2001).

Rocas Ultramáficas y Máficas de Anserma–Belén de Umbría: En este conjunto se incluyen las rocas ultramáficas de Puente Umbría - La Isla, el Gabro de Anserma y el Gabro Uralítico de Belén de Umbría, por lo general, asociadas con lavas básicas y limolitas silíceas en el flanco este de la Cordillera Occidental. Las diferentes unidades–roca están controladas estructuralmente, lo cual dificulta establecer las relaciones espacio–temporales originales y la ausencia de análisis químicos impide determinar la posible relación magmática entre ellas, sin embargo, es considerado del cretácico tardío debido a relaciones estratigráficas (Estrada *et al.*, 2001).

Plutón de Mistrató: Cuerpo intrusivo que pudo haberse formado en el Cretácico tardío, posee amplia variación litológica con facies tonalítica, diorítica y gabroide, también rocas

masivas de grano medio a fino, de color gris medio moteado a gris oscuro, además, el área presenta generalmente un avanzado estado de alteración y meteorización. La textura predominante es hipidiomórfica a alotriomórfica granular, que se modifica hacia los bordes debido a efectos dinámicos que generan una orientación ligera de los ferromagnesianos (Estrada *et al.*, 2001).

Stocks Gabrodioríticos de Pereira -Santa Rosa: Formación de origen Cretácico, agrupa dos cuerpos de composición variable entre gabro y diorita que afloran entre Santa Rosa de Cabal y Pereira. En la Cordillera Central están aparentemente relacionados con la falla de Romeral, así como están asociados con rocas volcánicas espilitizadas y ultramáficas (Caballero & Zapata, 1984).

Basaltos de la trinidad: Unidad litológica a la cual se le asigna una edad cretácica tardía, definida por Parra (1983), en el Cairo, Valle del Cauca, alcanzando a aflorar en el extremo suroeste del departamento de Risaralda. Macroscópicamente son rocas macizas de color gris verdoso, compuestas por plagioclasa alterada de color verdoso y máficos de color oscuro que corresponden a basaltos y diabasas, además presenta también tobas o aglomerados (Zapata, 2001).

Formación Lázaro: Secuencia establecida en el Cairo, Valle del Cauca, es constituida en orden de abundancia, por lodolitas, limolitas, areniscas y conglomerados, son de carácter terrígeno y han sufrido metamorfismo regional de bajo grado que llega hasta la facies esquisto verde bajo (Parra, 1983).

Formación Consólida: Unidad estratigráfica de origen cretácico, aflora al extremo Noreste del departamento de Risaralda y está constituida por piroclástitas básicas interestratificadas con sedimentos silíceos y en menor proporción calizas (Parra, 1983).

Formación Santa Cecilia: Aflora en la vertiente occidental de la Cordillera Occidental, al oriente del Batolito de Mandé, y está conformada por flujos basálticos y lavas almohadilladas, con intercalaciones locales de limolitas, lodolitas calcáreas, tobas y calizas (Parra & Salazar, 1999).

4.2.3 Cenozoico

Batolito de Mandé: Cuerpo extendido en su mayoría en el Departamento de Antioquia, sobre el flanco occidental de la Cordillera Occidental, siendo el cuerpo granítico de mayor tamaño en esta cordillera. Está compuesto de rocas de composición variable desde diorítica, incluyendo monzodiorita, tonalita, hasta granodiorítica. Es asignado a la edad terciaria, estableciendo que su cristalización dio inicio en el Paleoceno y se extendió hasta el Eoceno (Parra & Salazar, 1999).

Formación Irra – Tres Puertas: Perteneciente al periodo Terciario, hace referencia al conjunto de conglomerados ricos en rocas verdes, arenas, limos, arcillas y delgadas capas de carbón, a los conglomerados ricos en cuarzo lechoso y chert negro y al conjunto de estratos compuestos por arenas cuarzosas ricas en pómez y conglomerados ricos en pórfidos andesíticos. De base a techo, se ha subdividido la secuencia en las siguientes unidades:

- Conglomerados ricos en rocas verdes, areniscas, limolitas y arcillolitas con láminas de carbón.
- Conglomerados ricos en cuarzo lechoso y chert negro.
- Volcano-sedimentitas de composición andesítica.

Batolito de Farallones: Surge en el Terciario y corresponde a un cuerpo homogéneo emplazado en la cresta de la Cordillera Occidental. Se constituye principalmente por tonalitas y granodioritas, estas suelen estar muy frescas, son de grano medio a grueso y su textura de hipodiorítica. Los constituyentes mineralógicos en orden decreciente son plagioclasa, hornblenda, biotita, cuarzo, ortoclasa accesorios, productos de alteración y opacos, siendo los accesorios más comunes, esfena, apatito y circón (Calle & González, 1982).

Rocas Hipoabisales Porfídicas: Cuerpos de rocas porfídicas hipoabisales de composición predominante andesítica con variaciones locales a dacítica, cuya formación data es ubicada en el periodo Neógeno. Se incluyen los Porfidos Andesíticos y Dacíticos de Irra, el Pórfido Dacítico de Mistrató y el Pórfido Andesítico de Palestina, los cuales presentan geoformas

sobresalientes fácilmente identificables como los cerros de Ginebra, Bravo y Don Erasmo, cerca de Irra (Estrada *et al.*, 2001).

Formación Amagá: Establecida a lo largo de la margen occidental de la Cordillera Central durante el Oligoceno tardío, está constituida esencialmente por arenitas, arenitas conglomeráticas y limolitas de color ocre (Estrada *et al.*, 2001)(Caballero & Zapata, 1984).

Grupo Honda: Aflora en el flanco oriental de la Cordillera Central y está relacionado a la sedimentación continental del Valle Medio del Magdalena. Su conformación litológica general consiste en una frecuente intercalación de capas de areniscas y arcillolitas con lentes delgados de conglomerados, y le es asignada una edad de Mioceno (Ferreira *et al.*, 2002).

Formación Combia: Con una posición estratigráfica que permite asignarle una edad del Mioceno medio a tardío. En la zona de estudio no aflora la parte basal de esta formación conformada por rocas volcánicas y sólo se encuentra el miembro sedimentario, que está constituido por conglomerados, brechas sedimentarias, areniscas de grano medio a fino y arcillolitas intercaladas con material piroclástico (Estrada *et al.*, 2001).

Formación Mesa: Ocupa la depresión del valle del Magdalena y está compuesta por bancos de gravas arenosas, arenas tobáceas, arcillolitas de color blanco y arcillas grisáceas. Los clastos de roca son, en su mayoría, rocas efusivas y fragmentos de pumitas de composición andesítica-dacítica, en su mayoría constituido por material volcánico, presentando fragmentos que incluyen cuarzo, cuarzodiorita y metamorfitas. Esta formación ha sido posicionada sobre la edad Plioceno inferior (Orrego *et al.*, 1989).

Miembro Cinta de Piedra de la Formación Cauca superior: Conformado por una serie de areniscas verdosas hasta pardo-rojizas con intercalaciones de arcillolitas duras, siendo datado como Oligoceno tardío (Caballero & Zapata, 1984).

Formación La Paila: Constituida esencialmente por conglomerados con intercalaciones menores de arcillolitas, dichos conglomerados están compuestos por fragmentos de líticos tanto de rocas volcánico-sedimentarias que flotan en una matriz areno-arcillosa. Esta formación es asignada a una edad del Mioceno (Estrada *et al.*, 2001).

Formación Zarzal: De carácter sedimentario, constituida por diatomitas, arcillas y arenas tobáceas (Hammen, 1960). Se asignó una edad pliocena a esta formación con base en análisis palinológicos y relaciones litoestratigráficas en el Valle del Cauca (Caballero & Zapata, 1984).

Sedimentos de Viterbo: Conjunto de rocas no consolidadas que aflora en los alrededores de Viterbo constituido por gravas, arenas y arcillas con niveles tobáceos y de cenizas volcánicas hacia el techo. Este nombre se utiliza como término informal, pues no es posible precisar el tope ni la base del conjunto. Cabe destacar que no se tienen determinaciones paleontológicas y palinológicas, sin embargo, la disposición horizontal a subhorizontal y la poca consolidación que presentan estos sedimentos, indican una sedimentación reciente, posiblemente plio-pleistocena (Estrada *et al.*, 2001).

Flujos Andesíticos: Hace referencia a gruesas capas de material volcánico que cubren amplias zonas de la Cordillera Central, considerándose como el producto de eventos volcánicos que se han dado desde el Mioceno-Pleistoceno hasta hoy. Se encuentran cantos de dacitas, andesitas, basaltos, traquitas y riolitas en proporciones diferentes (Caballero & Zapata, 1984).

Formación Armenia: También es conocida como Glacis del Quindío, cuenta con una edad Plio-Pleistoceno y se constituye de una secuencia de depósitos no consolidados, principalmente de cenizas volcánicas y flujos de lodo, que afloran al oeste de Armenia fosilizando rocas más antiguas y enmascarando las relaciones geológicas (Court *et al.*, 1985).

Cenizas y Flujos de Escombros: La Formación Irra – Tres Puertas se encuentra cubierta localmente por arenas tobáceas, flujos aluviales con niveles arenosos y conglomeráticos y por flujos de escombros, probablemente lahares depositados discordantemente. Estos flujos de escombros se caracterizan por presentar bloques, preferencialmente de composición andesítica. Por sus relaciones estratigráficas con la Formación Irra – Tres Puertas y su bajo grado de consolidación, estas unidades han sido asignadas al Cuaternario (Estrada *et al.*, 2001).

Depósitos Piroclásticos: Producto de la actividad cuaternaria, entre el Pleistoceno tardío y el Holoceno, de los volcanes del Complejo Ruiz-Tolima, cubren gran parte de la región aledaña al eje de la Cordillera Central, oscureciendo las relaciones entre unidades litológicas más antiguas y suavizando la morfología del terreno. Las capas piroclásticas están compuestas por cenizas, lapilli pumicítico y, ocasionalmente, bombas volcánicas (González, 2001).

Depósitos Glaciares: Constituidos por bloques de lavas andesíticas y andesitas basálticas en una matriz areno-arcillosa de color amarillo a blanco amarillento, resultado de lo que fueron las glaciaciones del Pleistoceno tardío que cubrieron la alta montaña andina en la Cordillera Central, por encima de los 4.000 msnm (González, 2001).

Depósitos Aluviales Recientes: Agrupan los sedimentos de relleno de los ríos Cauca, Risaralda, Chinchiná, Mapa, Guacaica y de algunos de los afluentes, incluyendo, además, algunos depósitos coluviales. Estos depósitos están constituidos por gravas, arenas y limo, ubicándose en el periodo cuaternario (Estrada *et al.*, 2001).

4.3 Geología estructural de la región de estudio

Las estructuras tectónicas que encierra el área del eje cafetero son complejas y de difícil determinación, debido a los diversos eventos tectónicos que se han superpuesto con el paso de los periodos geológicos y al enmascaramiento de los flujos de lodo y cenizas volcánicas, lo que genera afectación en la litología (Calle & González, 1982; Court *et al.*, 1985). En la Figura 4 se representa el sistema de fallas de la región en cuestión y a continuación, se presenta una breve descripción de los sistemas más representativos de la zona. Para la confección de este mapa se descargó la información de la base de datos del Servicio Geológico Colombiano.

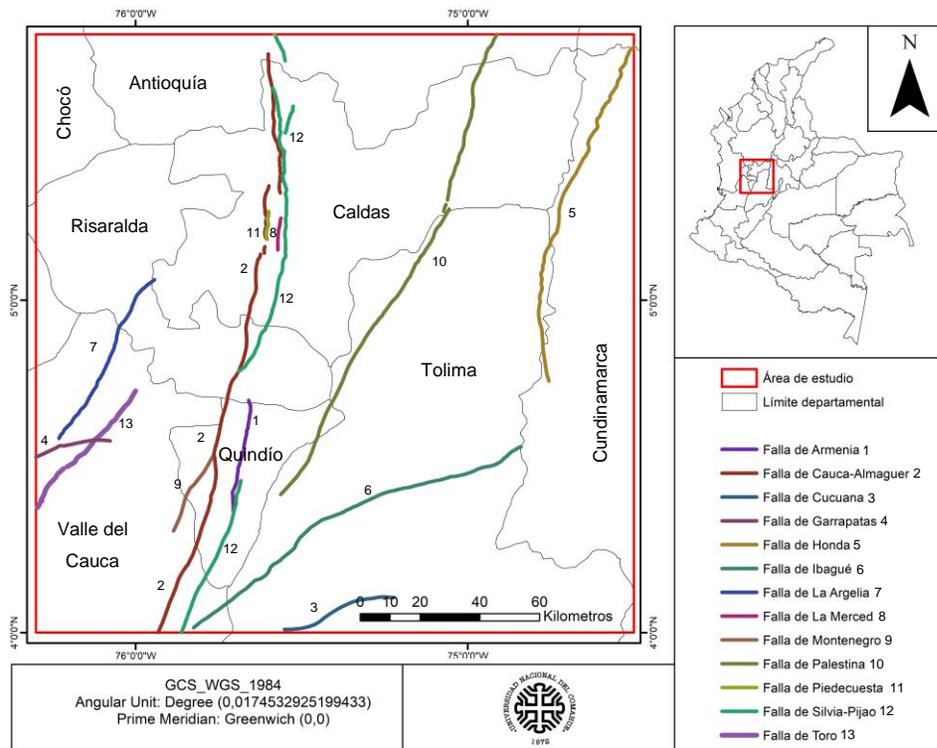


Figura 4. Descripción gráfica de la geología estructural de la región. Mapa confeccionado a partir de la información contenida en las bases de datos del Servicio Geológico Colombiano.

Sistema de Fallas Romeral: Define el límite occidental de las rocas metamórficas paleozoicas del Complejo Cajamarca y se ha interpretado como el límite entre corteza oceánica al occidente y corteza continental al oriente (Estrada *et al.*, 2001). Se extiende por más de 1200 km en dirección norte-sur y la deformación se manifiesta a lo largo de toda la traza del mismo, constituyendo, una zona de debilidad cretácica reactivada en el Cenozoico (González, 2001). El ancho de las zonas individuales de deformación precenozoicas varía entre 200 y 1500 m con rocas dinámicas miloníticas foliadas hacia los respaldos, mientras que, en las rocas cenozoicas, las zonas de cizalla tienen un ancho que va desde 1 a 50 m, y las fallas superponen rocas cristalinas precenozoicas del Complejo Arquía sobre rocas sedimentarias plegadas del Cenozoico inferior. Algunas de las fallas pertenecientes a este sistema son Silvia-Pijao, Cauca-Almaguer, Piedecuesta y La Merced. (Caballero & Zapata, 1984; González, 2001).

Sistemas de Fallas Palestina: Su principal rasgo estructural es la Falla Palestina, de rumbo con desplazamiento dextral que atraviesa la Cordillera Central sobre 350 km de longitud desde el río Quindío al sur. La zona de esta falla es de una debilidad importante en la corteza, de 0,5 a 30 km de ancho. La Falla Palestina tiene una expresión morfológica caracterizada por una depresión lineal notable con valles alargados y alineados, y boquerones profundos en las crestas de los cerros. Se estima que su grado de actividad es bajo, determinado a partir de características geomorfológicas y del desplazamiento de depósitos volcánicos en su superficie (González, 2001).

Falla Ibagué: Posee una longitud de 80 km, con una dirección OSO-ENE, siendo una falla transcurrente en sentido dextral. Esta cruza la parte central y el flanco oriental de la Cordillera Central, en unos 40 km afecta el Cuaternario medio a tardío. Presenta lomos de presión, control direccional de drenajes (quebradas) y escarpes de línea de falla. El bloque sur por lo general está levantado con respecto al bloque norte. Su actividad es de grado moderado a alto, con una tasa de movimiento de 1-5 mm/año (Paris & Romero Leon, 1994).

Falla Cucuana: Esta falla se encuentra al sur de la falla Ibagué en la Cordillera Central, atravesando rocas metamórficas del paleozoico, rocas ígneas del mesozoico (Batolito de Ibagué), estratos terciarios. La falla se extiende en la Cordillera Oriental a través del Valle del Magdalena, cortando rocas sedimentarias del cretácico. La Tasa de deslizamiento es 0.01-0.1 mm/año basados en el desplazamiento de características geomorfológicas del Cuaternario. (París, *et al.*, 2000)

Falla Honda: Esta falla se extiende a través del Valle medio del Magdalena, cerca al río Magdalena y a las ciudades de Ambalema, Honda y la Dorada. Esta desplaza estratos de la Formación Honda del Mioceno, de la Formación Mesa del Plioceno y sedimentos cuaternarios en terrazas aluviales. Tasa de movimiento menor a 1 mm/año, basado en el desplazamiento de características geomorfológicas y terrazas datadas del Cuaternario. (París, *et al.*, 2000)

Falla Garrapatas: La falla tiene un muy buen desarrollo en forma de valle en ‘V’ a lo largo de las partes superiores de los ríos Garrapatas y Las Vueltas. Se localiza al occidente de la

ciudad de Buga. La falla se desplaza entre el eje de la Cordillera Occidental y las colinas Los Paraguas y desplaza rocas sedimentarias y volcánicas oceánicas. Esta probablemente se conecta con la falla Argelia. Su tasa de movimiento es desconocida, probablemente menor a 2 mm/ año. (París, *et al.*, 2000)

Falla de Toro: Forma parte del Sistema del Cauca, que corre por la margen oriental de la Cordillera Occidental y se prolonga hasta el límite septentrional de las Cordilleras Central y Occidental, además se reporta una tasa de actividad de baja a muy baja (Caballero & Zapata, 1984).

Falla Argelia: Está localizada en la Cordillera Occidental, al occidente de la ciudad de Pereira. La falla corta rocas oceánicas del mesozoico que fueron acrecionadas al continente en algún momento durante el Cretácico tardío. La falla Argelia muestra algunas características neotectónicas y probablemente se conecta con la falla Garrapatos. Tasa de movimiento desconocida, probablemente menor a 2 mm/ año. (París, *et al.*, 2000)

5. Marco teórico

5.1 Catálogo sísmico

En regiones como la del Eje Cafetero, que debido a su ubicación, donde su peligrosidad sísmica es elevada, es de suma importancia tener una base de datos completa que abarque un extenso intervalo temporal. Los catálogos sísmicos completos son el punto de partida para determinar ciertos parámetros sísmicos, siendo una herramienta que aporta una ayuda significativa para comprender cómo los sismos han afectado la región en el pasado, y así, mitigar futuras pérdidas de vidas y pérdidas materiales causadas por terremotos.

En general, un catálogo sísmico brinda información acerca del año, mes, día, hora, minuto y segundo, coordenadas geográficas (latitud y longitud), profundidad, magnitud (varía el tipo de magnitud según la fuente consultada), y un código de identificación.

El catálogo confeccionado para esta investigación tiene como base el reportado por Galeano y Ramírez (2015), que va desde el año 1805 al 2013, recopilando todos los registros de sismos en esta región del eje cafetero, teniendo en total 6119 sismos registrados por distintas fuentes (seis para dicha investigación). Luego, Manrique (2019) anexa los registros faltantes del periodo 2014 al 2018 del departamento de Caldas exclusivamente.

El catálogo del presente trabajo es elaborado para el Eje Cafetero, abarcando un periodo desde las cero horas (00:00) del día 1 de enero del año 1805 hasta las veinticuatro horas (24:00) del día 31 de diciembre del 2019.

Tomando como base el catálogo de Galeano y Ramírez (2015), se procede a realizar una nueva búsqueda y se realiza la descarga de nueva información que anteriormente no fue tomada en cuenta. Luego, se realiza el mismo procedimiento con el catálogo de Manrique (2019), que genera un aporte de datos para un polígono de menores dimensiones.

Al unificar toda la información previa se obtiene un catálogo al cual es necesario anexarle la información faltante, de modo que se descargan de distintas fuentes los registros de los sismos ocurridos en el periodo 2013 al 2019 en todo el Eje cafetero.

5.2 La importancia de la estadística en la investigación científica

La estadística juega un rol muy importante en las investigaciones científicas, aportando herramientas de gran valor, como es la estadística descriptiva, encargada del análisis y la interpretación de datos, así como la estadística inferencial, que se encarga de la predicción. La implementación de estas herramientas conduce a un análisis coherente respecto a los datos en cuestión y dado el caso, a una toma de decisiones apropiada (Fisher, 1971).

Debido a lo complejo que resulta ser el planeta Tierra al momento de estudiarlo, la estadística es un instrumento que proporciona alternativas de carácter cuantitativo, proporcionando los medios necesarios para realizar conclusiones objetivas a partir de los datos observados.

5.2.1 Regresión y correlación lineal

El análisis de regresión lineal es una técnica por la cual se puede estudiar la relación entre dos variables. La importancia de esta técnica radica en que es la herramienta usada para la complementación del catálogo. La regresión emplea modelos basados en funciones matemáticas lineales, siendo una explicación simplificada de la realidad. Es un método muy ágil al momento de su aplicación. La regresión lineal es adecuada cuando se precisa conocer la posible relación entre dos variables (Bacchini *et al.*, 2018).

- **Recta de regresión:** a partir de un diagrama de dispersión (Figura 5) se puede analizar el tipo de correlación existente entre las dos variables en cuestión, y según como la nube de puntos se ajuste a una recta, se cuantifica el grado de relación lineal existente. Cabe aclarar que no todas las nubes de puntos tienen un ajuste perfecto a

la recta y esto es un inconveniente, por eso siempre se busca una recta capaz de representar todos los puntos (Tusell, 2011).

La recta describe la pauta observada en la nube mediante una función matemática simple, expresada de la forma dada en la ecuación 1.

$$Y = B_0 + B_1X_i \quad 1$$

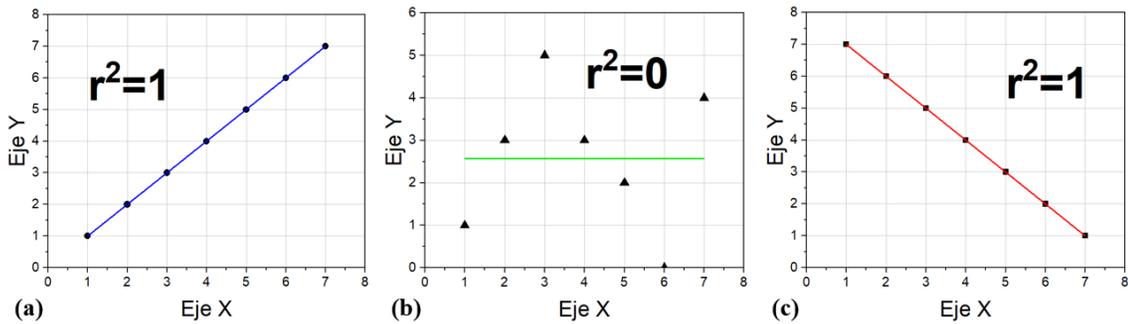


Figura 5. Ejemplificación de correlación lineal (a) positiva, (b) ejemplificación de una nube de puntos que no tiene correlación y (c) negativa

Donde, B_0 es la ordenada al origen, B_1 es la pendiente de la recta, siendo la tangente del ángulo que forma con la horizontal. Estos dos parámetros definen la recta, siendo las variables Y: eje de las ordenadas y X: eje de las abscisas.

- **Coefficiente de correlación lineal de Pearson:** es un estimador muestral que es usado para evaluar la asociación lineal entre dos variables. Este es un valor adimensional que varía entre los valores -1 y +1. Cuando r es un valor positivo, la correlación lineal tiende a ser directa, de tal manera que si aumenta Y, también lo hace X (Figura 5a), mientras que, si r es un valor negativo este tenderá a una correlación lineal inversa, por lo tanto, si aumenta una variable, disminuye la otra (Figura 5c). Por otro lado, si se tiene una nube de puntos en la cual no existe una correlación notable como en la Figura 5b, el r tiende a cero (Bacchini *et al.*, 2018). Es de aclarar que programas como Excel representa el cuadrado del coeficiente de correlación lineal como R^2 , el cual indica la medida de ajuste independientemente de si la correlación es directa o inversa.

5.2.2 Error en las medidas

Cuando se realiza una investigación, siempre existe la posibilidad de cometer errores, sin embargo, se puede contar con un tratamiento de los mismos sin importar que sea una medida directa (proveniente del aparato) o indirecta (utilizando una fórmula), cabe destacar que estos no siguen una ley dada y pueden generarse por distintas causas (Guerrero-Peña & Díaz-Londoño, 2007). El presentar este tipo de errores conlleva a obtener un resultado alejado al real. Esta herramienta es empleada en esta investigación para definir en qué grado de aproximación se encuentran los valores en cuestión con el valor real. Hay distintos tipos de errores:

- Errores aleatorios o accidentales: son errores que se producen por factores externos a la medición y que no se pueden controlar, por lo tanto, se trata de medir varias veces y calcular un promedio de los resultados para disminuir el error.
- Errores sistemáticos: son errores cometidos por la forma en que se usa el instrumento de medida, se divide en errores de paralaje y de calibrado.
 - Error de calibrado: es un tipo de error que está relacionado directamente con la falla del instrumento. Si el instrumento tiene algún defecto, o una mala calibración antes de la toma de las medidas, los resultados tendrán un sesgo.
 - Error de paralaje: se presenta en instrumentos cuya medida depende de agujas que marcan valores. Consiste en el error que se comete al leer los resultados en posiciones distintas, al cambiar de posición la lectura varía.

Cálculo del error:

- Residuo: es el valor obtenido de la diferencia entre el valor experimental (X_e) y el valor que se considera real o exacto (X_t), de modo que puede tomar valores positivos o negativos (Ecuación 2), lo que permite observar la dispersión sobre y bajo la línea de tendencia.

$$\text{Residuo} = X_t - X_e \quad 2$$

- Error absoluto (E_a): es el valor absoluto de la diferencia entre el valor obtenido experimentalmente y el valor teórico, es decir, el valor absoluto del residuo. Dicho valor puede cuantificar la calidad de la medida, sí el error absoluto es menor, mejor calidad tendrá la medición (Guerrero-Peña & Díaz-Londoño, 2007). El error absoluto conserva las unidades de la medición y la fórmula para calcularlo está dada por:

$$E_a = |X_t - X_e| \quad 3$$

- Error relativo: es el valor que se obtiene al dividir el error absoluto (E_a) con el valor teórico, el error porcentual es el obtenido al multiplicarlo por 100 y no tiene unidades. En general, en la comparación entre el error absoluto calculado y el valor real, se obtiene el porcentaje de desviación del valor medido respecto del valor teórico (Sáez Ruiz & Font Avila, 2001). La expresión que lo describe es la siguiente:

$$E_r = \frac{|X_t - X_e|}{X_t} \times 100 \quad 4$$

5.3 Magnitud sísmica

La magnitud sísmica es una medida que busca cuantificar el tamaño de un sismo y la energía liberada, siendo definida por Richter en 1935. Las magnitudes son medidas en escala logarítmica, esto quiere decir que para un sismo de orden de magnitud 5, la energía liberada es aproximadamente 32 veces más grande que para un sismo de magnitud 4.

En 1935, Richter, para cada terremoto del catálogo sísmico de California, representó la amplitud máxima frente a la distancia, y comprobó que las curvas obtenidas eran prácticamente iguales entre sí para todas las distancias, diferenciándose solamente en un factor de escala, lo cual conlleva a expresar esta diferencia como un número independiente de la distancia (López & Muñoz, 2003):

$$M = \log A - \log A_0 \quad 5$$

Dónde, M : magnitud, A : amplitud máxima medida y A_0 : amplitud de un terremoto patrón a una misma distancia.

Gutenberg y Richter elaboraron una escala, con el objetivo de emplear un parámetro de magnitud, la cual es basada en el máximo movimiento del suelo (Gutenberg & Richter, 1956).

El cálculo de magnitudes es un proceso que se repite continuamente, y actualmente es calculada por algoritmos computacionales. Las magnitudes en un primer momento son reportadas por distintos organismos, y cada uno difiere según las metodologías para el cálculo de la magnitud y la cantidad de datos que se obtienen, los cuales suelen ser pocos. Luego, pasado un tiempo y con una mayor cantidad de datos se procede a una revisión de la estimación, donde las magnitudes de los distintos organismos coinciden aproximadamente, aunque, puede variar debido al tipo de datos que usan (Robles Avalos, 2017). A través del tiempo se han implementado distintos tipos de magnitud, de los cuales, se presentan a continuación aquellos obtenidos en la descarga de los distintos catálogos:

- Magnitud local (MI).
- Magnitud de ondas superficiales (Ms).
- Magnitud de momento (Mw).
- Magnitud de ondas internas (Mb).

5.3.1 Magnitud local (MI)

También conocida comúnmente como Magnitud Richter. Inicialmente fue diseñada para una región de California y un instrumento de medición particular, pero ha sido calibrada a lo largo del tiempo para usarse en distintos lugares del mundo, aunque actualmente ha disminuido su aplicación debido a sus limitaciones (por ejemplo, la saturación en mediciones >7 y su poca exactitud al medir en terrenos con litologías distintas a la tomada arbitrariamente por Richter en California), siendo reemplazada por la escala Mw (Magnitud de momento), cuya escala es mucho más general (Robles Avalos, 2017). Esta magnitud está definida en la ecuación 6, donde A es la amplitud máxima en el sismograma, T es el periodo de tiempo asociado a dicho máximo y Q es una función entre la distancia epicentral (D) y la profundidad (h).

$$M = \log(A/T)_{max} + Q(D, h) \quad 6$$

5.3.2 Magnitud de momento (Mw)

Fue desarrollada e introducida en 1979 por Thomas Hanks y Hiroo Kanamori como la sucesora de la escala MI, presentando mejoras, debido a que la escala Mw no presenta el problema que consiste en los valores tomados de mediciones mayores o iguales a un valor determinado (en general sismos grandes) reflejen magnitudes similares, es decir, se saturan, además coincide y conserva los parámetros de la escala MI (Kanamori, 1983).

5.3.3 Magnitud de ondas superficiales (Ms)

Esta escala, junto a la escala Mb, se estableció a partir de instrumentos de banda ancha (registran el movimiento del suelo en un intervalo de frecuencias más amplio que los de banda corta) y de periodos medios y largos, para un rango epicentral mayor (Kanamori, 1983). Las ondas tienen periodos entre los 3 a 60 segundos, pero predominan los de orden de 20 segundos. Esta escala fue desarrollada por Gutenberg en 1942 y en general mide terremotos poco profundos, más fuertes o más lejanos de lo que la escala de Richter podía abarcar. En común, la escala Ms coincide con la escala MI hasta valores aproximados a 6, con valores mayores diverge.

Para terremotos con foco superficial en donde la amplitud máxima debe ser medida cuando el movimiento de las partículas es armónico simple y en la misma frecuencia de la onda Rayleigh, la magnitud Ms es la indicada. Las ondas más destructivas y que llevan la mayor parte de la energía del terremoto son las ondas Love y Rayleigh, las cuales se propagan a lo largo de la superficie terrestre. Un limitante de la magnitud Ms es que, para terremotos grandes con longitudes de ruptura mayores a 100 km, la escala comienza a saturarse alrededor de la magnitud 8,3 Ms (Sanchez, 2001).

La fórmula dada en la ecuación 7 es la que se utiliza actualmente, en esta, A es la amplitud del desplazamiento del suelo medido en micras, D es la distancia epicentral en grados y T el periodo de tiempo en el cual se da el desplazamiento del suelo.

$$Ms = \log(A/T) + 1.66 \cdot \log(D) + 3.3 \quad 7$$

Existen algunas consideraciones al momento de hacer uso de esta magnitud, como, por ejemplo, la amplitud máxima de las ondas superficiales deben ser medidas en la componente vertical del sismógrafo, y la escala se debe usar para terremotos con profundidad menores a 60 kilómetros con distancias angulares comprendidas entre los 20° a 160°.

5.3.4 Magnitud de ondas internas (Mb)

Es una de las magnitudes más usadas actualmente debido a la instalación del WWSSN (World Wide Standardized Seismograph Network) dada la prohibición parcial de ensayos nucleares en la década del 60. Se usa para caracterizar terremotos a larga distancia. Esta magnitud usa solo ondas P y fue establecida a partir de instrumentos de periodos cortos, mejorando la detección de sismos de magnitudes más pequeñas, también ayuda a discernir entre sismos de origen tectónico o de explosiones nucleares (Molina *et al.*, 2004). Esta magnitud se expresa mediante la siguiente formula (ecuación 8):

$$Mb = \log(A/T) + P(D, h) \quad 8$$

Siendo A la amplitud máxima en el sismograma, T el periodo de tiempo asociado a dicho máximo y P es una función entre la distancia (D) y la profundidad tabulada para distancias angulares de hasta 100° (h).

Esta magnitud mide la amplitud en la componente vertical y presenta el mismo defecto que la magnitud MI que se satura con valores cercanos a 7, debiéndose a que la amplitud de onda P se mide a una frecuencia cercana a 1 Hz (Pelaez, 2011).

5.4 Umbral mínimo de detección instrumental (M_{\min}) y frecuencia de ocurrencia sísmica

Los registros sísmicos colombianos tienen una gran heterogeneidad a lo largo del tiempo y del espacio, lo cual está relacionado a la falta de registros instrumentales antes de 1923 (Ramírez, 1975), ya que es solo a partir de 1993 que se instala lentamente en todo el territorio colombiano, la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), introduciendo equipos más sensibles y aumentando la resolución de los registros, lo que se ve reflejado en el aumento de la cantidad de datos que entran al catálogo cada año.

Al hablar de heterogeneidad se debe sacar a colación dos factores importantes que la afectan y consisten en la calidad de los registros y su ubicación. La calidad de los registros en Colombia varía paulatinamente antes del 1993, en virtud de que existen varias estaciones como la OSSO, Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana (IGUJ), la RSNC etc., y cada una tiene una calidad y cantidad de registros distinta. El segundo factor que genera una mayor heterogeneidad es la ubicación, dado que, para la confección de un catálogo, se recopila información tanto de redes o estaciones locales como internacionales y cada una tiene un área de registro distinta (Caneva *et al.*, 2004), por lo tanto, pueden variar los registros, generándose la necesidad de determinar la magnitud mínima que sea confiable para una región determinada.

Al determinar el umbral mínimo de detección se define la sensibilidad y la resolución, en otras palabras, es la mínima cantidad de sismos registrados sin interrupción en una región definida, con determinación de coordenadas y tiempo del evento, por lo tanto, al tener una muy buena sensibilidad y resolución, tendremos un grupo de registros de sismos con un umbral igual a una magnitud baja, abarcando gran cantidad de datos del total del catálogo (Caneva *et al.*, 2004).

Cuando se estima la M_{\min} , la distribución de los sismos según los valores de sus energías está dada por la ley de potencias y se expresa por la ley de Gutenberg-Richter vista en la ecuación 9 (Aki & Richards, 1980):

$$\text{Log } N = a - bM \quad 9$$

Siendo N la cantidad de sismos acumulados en un área y periodo de tiempo determinado, con magnitudes mayores o iguales a la magnitud de referencia, a y b son constantes determinadas a partir de una muestra de datos determinada (Stepp, 1972).

Se supone que la distribución de los sismos en una regresión lineal logarítmica debe ser lineal, por lo tanto, para determinar el valor de M_{\min} se debe tener en cuenta que, la gran ocurrencia de sismos de baja magnitud y la poca ocurrencia de sismos con gran magnitud provoca que la distribución se vea alterada, por lo tanto, se eliminan estos puntos donde no satisfagan la correlación lineal de Gutenberg-Richter y a partir de este umbral se considera el catálogo completo.

Para la determinación de la Magnitud máxima probable (M_{\max}) en el área de estudio a partir de un catálogo sísmico real, con magnitudes de sismos que pueden ser subestimados debido a la poca ocurrencia en comparación a otros con gran cantidad de ocurrencia; se emplea la fórmula de la ecuación 10:

$$M_{\max} = a/b \quad 10$$

5.5 Método de Stepp

El método es introducido por el J.C Stepp en el año de 1972. En su investigación empleó una muestra de terremotos de 100 años en el área de Puget Sound, Washington, comprendido entre el año 1870 al 1969. Al proceder a aplicar la metodología para el desarrollo del trabajo, se logró completar el catálogo y se trató de ajustar la fórmula de la ley de Gutenberg-Richter (anteriormente mencionada) para datos con intervalos de recurrencia más cortos y evitar que estos se sesguen en comparación a otros sismos más fuertes que tienen periodos más largos; debido a esto, el método consiste en hallar los intervalos de tiempo, en los cuales, un valor determinado de una magnitud se considera totalmente reportado, lo que permite determinar

en qué periodo de tiempo la relación de Gutenberg-Richter (ley de recurrencia sísmica) está bien descrita por la regresión (Caneva *et al.*, 2004).

$$\lambda = \frac{N}{\text{Año}} \quad 11$$

En la teoría, una secuencia de sismos sigue la distribución de Poisson, razón por la cual este modelo estadístico es empleado para calcular la futura ocurrencia de sismos. En el método de Stepp (1972), se divide la muestra en intervalos de tiempo que se consideran incompletos y se determina la tasa media de ocurrencia de sismos por año (λ , ecuación 11) para cada clase de magnitud en cada sub intervalo de tiempo y de esta manera, se procede a determinar el periodo de tiempo donde λ se considera estable y representa un intervalo de tiempo completo (Galeano & Ramirez, 2015).

A partir de la condición de que λ sea constante, se puede determinar la desviación estándar de la tasa media de ocurrencia por un periodo de tiempo acumulado, la cual está definida en la ecuación 12:

$$\sigma(\lambda) = \sqrt{\frac{\lambda}{T}} \quad 12$$

De esta fórmula se puede deducir que, para cualquier valor de magnitud, σ disminuye si aumenta T, pero, siendo proporcional y paralela a $\sqrt{1/T}$. Esto se logra con intervalos de tiempo T suficientemente largos para la estimación de la media, solo si estos no incluyen periodos de tiempo incompletos, debido a que genera un dato erróneo y alejado de la realidad.

Si σ se desvía demasiado de $\sqrt{1/T}$ se considera que la muestra en el periodo de tiempo T no es la más indicada para para estimar una tasa de ocurrencia de sismos y por lo tanto no está en completitud.

5.5.1 Recurrencia sísmica

Recurrencia sísmica (N) se define a partir de la ley de Gutenberg-Richter y explica la frecuencia existente para la ocurrencia de un sismo de una magnitud y lugar determinado. Se basa en los sismos pasados y en lo que ha ocurrido históricamente, generando una estimación de un intervalo de tiempo en el cual puede ocurrir el sismo con una probabilidad definida. Por ejemplo, los sismos de baja magnitud ocurren con más frecuencia que los sismos de magnitudes mayores, por lo tanto, de los primeros se espera que ocurran más frecuentemente entre un periodo de tiempo determinado (Gutenberg & Richter, 1956).

5.5.2 Periodo de retorno de sismos

El periodo de retorno se define como el tiempo en el cual la probabilidad de ocurrencia se distribuye uniformemente, siendo así, un estimativo de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno en un periodo determinado. En el campo de la ingeniería sísmica se usa para tasar la ocurrencia de un sismo de determinadas características, de igual o mayor magnitud, definido en un intervalo de tiempo. Es muy útil su empleo en vista de que no se pueden predecir los sismos, siendo imposible determinar cuándo ocurrirán con exactitud.

Este término estadístico se obtiene mediante el ajuste de distribuciones de probabilidad de las variables analizadas, tomando como base valores extremos registrados en intervalos de tiempo, generando un nivel de confianza a estos valores extremos. Para su determinación, y teniendo en cuenta las características del presente trabajo, se emplean las ecuaciones 13 y 14 descritas a continuación:

$$T = \frac{1}{N} \times 65 \text{ años} \quad 13$$

$$T = \frac{1}{N} \times 65 \text{ años} \times 365 \text{ días} \quad 14$$

5.6 Método de Stepp mediante ajuste potencial

La variante metodológica al método de Stepp (1972) surge como una necesidad, a consecuencia de que el método original está ligado en gran medida a la percepción de quien lo aplique, es así como en este se pueden generar márgenes de error a partir de escenarios de incertidumbre originados por la dependencia del grado de subjetividad del investigador y su consecuente interpretación. En la realización de la investigación “completitud del catálogo de la red sismológica nacional de Costa Rica durante 1975-2014” (Arroyo *et al.*, 2017) emplearon esta variante metodológica apoyándose en parámetros estadísticos como el coeficiente de correlación, al cual se le aplica un ajuste potencial, logrando un menor grado de incertidumbre en los datos, disminuyendo la subjetividad a la hora de aplicar el método e interpretar los resultados obtenidos, realizándolo de forma más objetiva.

La diferencia entre este método y el original de Stepp (1972) se basa en que al momento de definir los periodos que están en completitud, el método original se realiza mediante una comparación visual entre la desviación estándar de una magnitud dada y de la recta teórica $\sqrt{1/T}$, generando un grado de incertidumbre más alto por lo explicado anteriormente y corriendo el riesgo de que los análisis posteriores estén errados y lejos de la realidad; en cambio, en la variante metodológica, se realiza un ajuste potencial de modo que, sí el coeficiente de correlación es muy cercano a 1 (tomando los ajustes con un alejamiento menor a 0,01), y por ende con valores mayores a $R^2 = 0,99$, se toma como un periodo de tiempo que se encuentra en completitud y es aproximadamente paralelo a $\sqrt{1/T}$, mitigando la subjetividad generada por el método original (Arroyo *et al.*, 2017).

6. Metodología

6.1 Confección de un catálogo sísmico

6.1.1 Descarga de información y ajuste al formato único

Como primer paso, la información se descargó de distintas fuentes, se tomaron 6 fuentes, de las cuales se descargaron sus catálogos correspondientes, dicha información se usó para actualizar y completar el catálogo hasta el año 2019. En el sitio web de cada fuente se ingresó las coordenadas del polígono determinado y correspondiente al del Eje Cafetero (4° y 5,8° de latitud oeste; 76,3° y 74,5° de longitud oeste) y se procedió a la descarga de la información.

Las fuentes consultadas son las siguientes:

CERESIS: (Centro Regional de sismología para América del Sur). Es un organismo autónomo, intergubernamental e internacional creado entre la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y el gobierno del Perú en el año de 1966. Los países miembros son Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, España, Paraguay, Perú, Trinidad y Tobago, Uruguay y Venezuela. Su función consiste en el trabajo mancomunado entre los países miembros para realizar investigaciones científicas, monitoreo de sismicidad y actividad volcánica, elaboración de estudios de riesgos, aplicación y traslado de los conocimientos a medidas prácticas de mitigación, educación y capacitación.

- Página web: www.ceresis.org
- Base de datos: vía correo electrónico con la dirección, Catálogo de terremotos para América del Sur, Vol. 1 y SISAN (Proyecto de sismicidad Andina), Catálogos sísmicos, Vol. 2.

CMT: (Global Centroid Moment Tensor Project): es supervisado por el investigador principal Göran Ekström y el co-investigador principal Meredith Nettles en el Observatorio de la Tierra Lamont-Doherty (LDEO) de la universidad de Columbia. Fue fundado por Adam Dziewonski en 1982 en la universidad de Harvard hasta 2006. Del 2006 fue trasladado al LDEO.

- Página web: www.globalcmt.org
- Base de datos: Global CMT Catalog Search.

ISC: (International Seismological Centre). Es una institución no gubernamental creada en 1964, siendo sucesora del resumen sismológico internacional. Esta entidad se encarga de la colección, análisis, y publicación final de información de sismos en todo el mundo. Está financiado por las instituciones interesadas de distintos países (actualmente 50).

- Página web: www.isc.ac.uk
- Base de datos: Catálogo de terremotos instrumentales globales ISC-GEM, versión 5.1. y Global CMT Catalog Search

USGS: (U.S. Geological Survey). Es una agencia científica del gobierno federal de los Estados Unidos, con sede en Reston; Virginia. Fue fundada en 1879. La USGS controla la National Earthquake Information Center que se encarga de detectar la magnitud y localización de los sismos de todo el mundo. Contiene una base de datos muy completa e información interactiva, convirtiéndolo en una muy buena fuente de información, además, a lo largo de sus 120 años ha sido pionera en el progreso de la ciencia aplicada a la geología.

- Página web: www.usgs.gov
- Base de datos: NEIC (National Earthquake Information center).

OSSO: (Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente). Es un grupo multidisciplinario creado en 1987 con sede en la ciudad de Santiago de Cali, capital del departamento del Valle del Cauca, Colombia. Promueve la docencia, investigación y extensión en geofísica, sismología e ingeniería sísmica, aportando conocimientos a la

comunidad del suroccidente colombiano para la prevención y mitigación de desastres producto de fenómenos geofísicos. Esta entidad ayuda a la reducción de la vulnerabilidad en la región y están encargados de la operación y mantenimiento de la Red Sismológica del Suroccidente Colombiano. En 1987 se funda la REDSW para el monitoreo de la actividad sísmica en el suroccidente colombiano.

- Página web: www.osso.univalle.edu.co
- Base de datos: Línea de investigación sísmica-sección boletín sismológico.

SGC-RSNC: (Servicio Geológico Colombiano - Red Sísmica Nacional). El SGC hace investigación en geociencias básicas, evaluación del potencial de recursos del subsuelo y evacuación y monitoreo de amenazas geológicas. La Red Sismológica Nacional de Colombia se funda en 1993, debido a que el país se vio en la obligación de estudiar y monitorear estos fenómenos geofísicos ya que recientemente habían ocurrido varios sucesos como los terremotos de Tumaco y el eje cafetero (1979) y la erupción del Volcán Nevado del Ruiz (1985) y consecuentemente aportando herramientas para la prevención y atención de desastres. Esta red hace parte del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Tiene como objetivo estudiar la actividad sísmica y el riesgo asociado con el objetivo de mitigarlo.

- Página web: <https://www.sgc.gov.co>
- Bases de datos: El catálogo de sismicidad del Servicio Geológico Colombiano en el enlace.

La información obtenida de las fuentes mencionadas anteriormente se encuentra en diferentes formatos o patrones de organización, lo que varía según el autor. Se decide elaborar un formato único y adecuar todos los datos descargados para una mejor interpretación, ayudando a la organización de las características básicas, dicho formato se evidencia en la Tabla 2. La Tabla 3 presenta la explicación de cada uno de los ítems que compone el formato.

Tabla 2. Formato único con las características básicas del sismo.

#	AAAA	mm	dd	hh	mm	ss	Latitud	Longitud	Profundidad	Mw	Mb	Ms	MI	Fuente	ID
...

Donde:

Tabla 3. Explicación de las siglas usadas en el formato único.

#	Número de sismo
Fecha	
AAAA	Año
mm	Mes
dd	Día
Hora (UTM)	
hh	Hora
mm	Minuto
ss	Segundo
Localización	
Latitud	Coordenada geográfica de epicentro. Indica la distancia desde un punto al paralelo del ecuador dada en grados. En el área de trabajo se aplica longitud oeste.
Longitud	Coordenada geográfica de epicentro. Indica la distancia desde un punto al meridiano de Greenwich dada en grados. El área de trabajo se sitúa en latitud Norte
Profundidad	Profundidad o punto hipocéntrico dado en Km
Magnitudes	
Mw	Magnitud de momento sísmico
Mb	Magnitud de ondas de compresión.
Ms	Magnitud de ondas superficiales superficial
MI	Magnitud de ondas locales
Fuente	Organismo que aporta la información del sismo
ID	Identificación otorgada por la fuente que detectó e informó el sismo

Tomando el catálogo de Galeano y Ramírez (2015) para el Eje Cafetero y Manrique (2018) para el departamento de Caldas y zonas aledañas, se añadió la información faltante a los periodos de 1805-2013 para el Eje Cafetero y 1805-2018 para Caldas y Zonas aledañas.

Luego se procedió a descargar la información faltante y correspondiente al periodo 2013-2019 para el Eje Cafetero, modificándola de tal forma que se ajuste al formato único.

6.1.2 Distinción de la fuente y orden cronológico

Las distintas fuentes son clasificadas según su color, esto permite una mejor visualización dentro del catálogo, generando que todos los datos básicos de un sismo determinado tendrán el color correspondiente a su fuente (Tabla 5). El catálogo está organizado de forma cronológica, yendo de los sismos más antiguos a los más recientes a medida que se descende en el formato (Tabla 4).

Tabla 4. Formato tomado del catálogo original donde se puede ver la clasificación por colores y el orden cronológico.

#	aaaa	mm	dd	hh	mm	ss	Latitud	Longitud	Profundidad	Mw	mb	Ms	ML	Fuente	ID
1	1805	6	16	8	15	0	5,300	-74,500				7,0	7,0	Ceresis	545
2	1824	12	17	23	23	0	5,200	-74,900				3,5		Ceresis	941
3	1824	12	18	4	0	0	5,200	-74,900				4,5		Ceresis	942
4	1824	12	31	0	0	0	5,000	-74,849	25	4,9				SISAN(LCO)	
5	1825	1	1	0	0	0	4,500	-75,200				4,0		Ceresis	944
6	1827	10	10	9	25	0	5,400	-75,500				4,0		Ceresis	1030
7	1829	12	9	9	30	0	5,000	-75,500				5,0		Ceresis	1155
8	1845	2	19	12	0	0	4,500	-75,400				4,0		Ceresis	1601

Tabla 5: Clasificación de las fuentes por un color asociado.

Fuente	Color	Fuente	Color
CERESIS	ROJO	RSNC	NEGRO
CMT	PURPURA	USGS	VERDE
ISC	AZUL CELESTE	Magnitudes calculadas con las fórmulas de regresión lineal	MARRÓN
OSSO	AMARILLO		

6.2 Análisis de la sismicidad histórica

El sismógrafo fue inventado por el físico escocés James David Forbes en 1842, su funcionamiento consistía en un péndulo que a causa de su inercia permanecía inmóvil, mientras todo su alrededor estaba en movimiento. El péndulo llevaba una especie de

marcador que iba escribiendo sobre un rodillo de papel, registrando el movimiento (Ben-Menahem, 2009). Cabe aclarar que había prototipos de sismógrafos más antiguos que el del físico Forbes, con un funcionamiento más rudimentario.

A lo largo del tiempo la tecnología ha ido mejorando la forma de registrar un sismo, impactando positivamente esta rama de la ciencia, como es el caso de los sismógrafos modernos, los de banda ancha, por ejemplo, son capaces de registrar en un ancho rango de frecuencias y consisten en una masa de tamaño pequeño que esta confinada por fuerzas eléctricas que mantienen la masa fija cuando ocurre un sismo, además, la fuerza para conseguir esto queda registrada.

6.3 Complementación del catálogo mediante regresiones lineales

Al tomarse los catálogos del eje cafetero, perteneciente al periodo de 1805-2013 (Galeano & Ramirez, 2015) y del departamento de Caldas para el periodo de 1824-2018 (Manrique Escobar, 2019), se les realiza un exhaustivo control, depurando datos anómalos, como, por ejemplo, magnitudes y profundidades registradas de manera errónea, para posteriormente agregar los sismos del Eje Cafetero correspondientes al periodo de tiempo comprendido desde el día 1 enero del 2014 al 31 de diciembre del 2018, (exceptuando al departamento de Caldas) y para toda la región del Eje Cafetero desde el 1 de enero al 31 de diciembre de dicho año para contar con un total de 12.204 eventos sísmicos.

Luego de ese control de errores y actualización al catálogo original, se obtiene el catálogo sísmico de la región del Eje Cafetero del periodo 1805-2019 y se procede a completar los vacíos existentes en las magnitudes M_s y M_b . Para esta investigación se decidió convertir las magnitudes M_w y M_l en M_s y M_b , debido a que, los catálogos originales (los que han sido obtenidos directamente de las fuentes) tienen poca cantidad de registros en estas magnitudes.

A partir de lo planteado anteriormente se toman 6 pares de magnitudes:

- Mw vs Ms
- MI vs Ms
- Mb vs Ms
- Mw vs Mb
- MI vs Mb
- Ms vs Mb

Por medio de filtros de Excel se omiten los vacíos de información en las columnas que contienen las magnitudes en cuestión, como se puede observar en la Tabla 6a donde no se ha aplicado dicho filtro y la Tabla 6b donde se han eliminado los vacíos. Luego, los valores de cada magnitud seleccionada se plotean en un gráfico y se halla su correspondiente ecuación cuyo R^2 puede tener un valor bajo con respecto a 1 o en el caso más favorable, muy cercano a 1.

Tabla 6: Ejemplificación del filtro aplicado para Mw vs Ms.

Mw	Ms
5,0	3,9
7,2	7,0
6,3	6,3
6,1	5,0
5,9	5,7
5,1	4,3
5,7	4,7
5,0	3,7
	3,3
	2,8
	4,2
	3,8
3,9	
3,7	
4,3	3,7
3,4	

Mw	Ms
5,0	3,9
7,2	7,0
6,3	6,3
6,1	5,0
5,9	5,7
5,1	4,3
5,7	4,7
5,0	3,7
4,3	3,7

Se procede a tomar los valores contenidos en las diferentes magnitudes de los sismos registrados en el rango de tiempo de interés sobre la zona de estudio, a partir de ello se realizan diagramas de dispersión que pueden aportar a la completitud del catálogo sísmico. Al tener dichos diagramas, se procede a determinar la recta que mejor se ajusta a la nube de puntos por el método de mínimos cuadrados, obteniendo a su vez un valor de correlación lineal que mide qué tanto se ajusta la recta a los puntos graficados.

Por ejemplo, en esta investigación se obtuvo la ecuación 15 a partir de la tabla con el filtro aplicado para Mw vs Ms, cuyo es $R^2 = 0,9268$:

$$M_s = 1,1801M_w - 1,7095$$

15

Cabe la necesidad de efectuar un ajuste que dé paso a la corrección del coeficiente de correlación lineal y así mismo tener valores más coherentes que den una tendencia confiable (Tabla 7), para lo cual se recalcula el valor de la ordenada en cada uno de los puntos obedeciendo a la tendencia marcada por la recta obtenida, de tal modo se tienen dos valores para la ordenada por cada punto en la abscisa, siendo uno el valor teórico hallado desde la tendencia en el diagrama de dispersión y otro el determinado experimentalmente (registro de sismos). Posteriormente se efectúa un ajuste estadístico a base del cálculo de errores.

Tabla 7: Tablas donde se observa el ajuste a base del cálculo de errores. En la tabla (a) se selecciona el 20% y en la tabla (b) se han de eliminar.

(a)	Ms teórico	Error absoluto	Error relativo	(b)	Ms teórico	Error absoluto	Error relativo
	4,19	0,3	6,943%		4,19	0,3	6,943%
	6,78	-0,2	3,135%		6,78	-0,2	3,135%
	5,72	-0,6	10,041%		5,48	0,5	8,911%
	5,48	0,5	8,911%		5,25	-0,4	8,508%
	5,25	-0,4	8,508%		5,96	0,1	1,026%
	5,96	0,1	1,026%		5,60	-0,3	5,223%
	5,60	-0,3	5,223%		4,78	0,0	0,396%
	4,78	0,0	0,396%		4,19	0,4	9,330%
	4,19	0,4	9,330%		4,30	0,0	0,209%
	4,42	0,5	11,905%		5,01	0,3	6,320%
	4,30	0,0	0,209%		3,36	-0,3	9,958%
	5,01	0,3	6,320%		3,01	-0,1	2,959%
	4,19	0,5	11,716%		3,01	0,1	3,683%
	3,36	-0,3	9,958%		3,24	-0,2	4,715%
	3,01	-0,1	2,959%		3,36	0,0	1,042%
	3,01	0,1	3,683%		3,12	-0,2	5,468%
	3,24	-0,2	4,715%				
	2,53	-0,4	14,224%				
	3,36	0,0	1,042%				
	3,12	-0,2	5,468%				

Al realizar el ajuste de las ecuaciones de cada recta obtenida, y de acuerdo con la necesidad evidenciada por cada una de ellas se procede a seguir los pasos descritos a continuación:

- Paso 1: Cálculo de los 3 parámetros (residuo, error absoluto y relativo).
- Paso 2: Se aplica un formato condicional que seleccione el 20% de los datos con el error relativo más alto, Tabla 7a.

- Paso 3: Se eliminan los datos anteriormente seleccionados, de modo que se genere una nueva línea de tendencia, ajustando el coeficiente de correlación, Tabla 7b.

Finalmente se obtienen las ecuaciones necesarias para efectuar los cálculos correspondientes y la posterior completitud del catálogo.

Siguiendo con el ejemplo M_w vs M_s , al aplicar la metodología anteriormente explicada se llega a la ecuación 16, donde $R^2 = 0,9497$, el cual, en comparación al de la ecuación 15, evidentemente aumentó.

$$M_s = 1,1701M_w - 1,6521$$

16

6.4 Cálculo del Umbral mínimo de detección instrumental (M_{\min}) y frecuencia de ocurrencia sísmica

Para el cálculo del umbral mínimo de detección (M_{\min}) se procede a agrupar las magnitudes M_b y M_s procedentes del catálogo completo en intervalos de 0,5 unidades (Tabla 8). Se debe aclarar que se eligen estas dos magnitudes debido a que estas están en mayor cantidad en los registros sísmicos. Se calcula la cantidad de sismos acumulados y a partir de la ecuación 9 determinando el valor de $\log N$ correspondiente a cada intervalo de magnitud. Por ejemplo, se toma los valores de la magnitud M_b :

Tabla 8. Tabla que evidencia el ordenamiento y los cálculos de N y $\log N$.

Clases de magnitud (M_b)	N	$\log N$
$\geq 0,0$		
$\geq 0,5$		
\vdots		
$\geq 6,5$		
$\geq 7,0$		

En base a la suposición teórica de que la distribución de sismos en una regresión logarítmica lineal es de carácter lineal, en la realidad, como es en este caso, la alta ocurrencia de sismos

de baja magnitud y la poca cantidad de alta magnitud, se genera una alteración de la distribución como se observa en la Figura 6 y consecuentemente se deben eliminar puntos que no se ajusten a la correlación lineal de la ecuación 9. La flecha de color rojo ($M_b=3$) en la Figura 6 indica a partir de qué magnitud se considera el catálogo completo y el valor de M_{\min} .

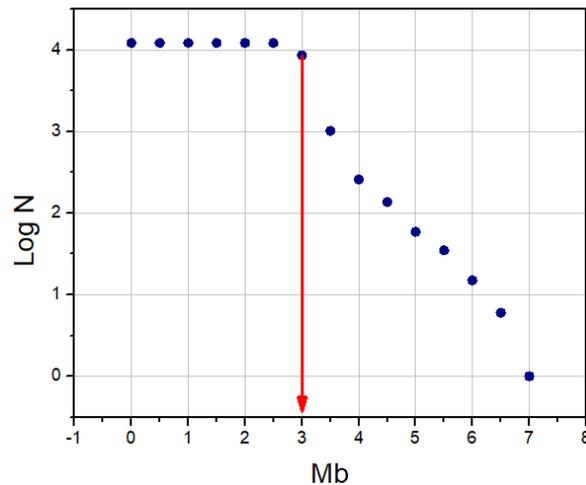


Figura 6. Gráfico de M_b vs $\text{Log } N$.

Para la determinación de la Magnitud máxima probable (M_{\max}) en el área de estudio a partir de un catálogo sísmico real, se emplea la ecuación 10. Siguiendo con el ejemplo anterior, se toma los valores de a y b provenientes de la siguiente ecuación (17), cuya expresión es la de la Figura 6:

$$\text{Log } N = -0,8335M_b + 6,0122 \quad 17$$

Al obtener los valores de a y b , se introducen en la ecuación 10 para hallar M_{\max} .

6.5 Metodología del análisis de completitud probable y evaluación de la magnitud máxima probable a partir del método de Stepp

Para la realización del método de Stepp se debe tomar el periodo de años a analizar, en este caso, comprendido desde el año 1955 al 2019, luego se divide en intervalos de 5 años. Esta

división se debe a que la cantidad de sismos reportados en el periodo de 1805 a 1954 son muy pocos, y justamente en la década del 50 se observa un incremento en la ocurrencia de reportes de los mismos. Al periodo de 1805 a 1954 se divide en intervalos de 50 años. En ambos intervalos de tiempo se tomaron periodos de 0,5 unidades de magnitud.

Luego de dividir el segundo periodo (1955-2019) en intervalos de 0,5 unidades de magnitud, se toman los valores mayores o iguales al valor del umbral mínimo de detección determinado para cada magnitud, como se ve ejemplificado en la Tabla 9, tomando como ejemplo la magnitud Mb.

Tabla 9. Magnitudes divididas en periodos de tiempo de 5 años y en intervalos de 0,5 unidades de magnitud.

Periodo	Años	Clases de Magnitud Mb									Total
		3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	
2015-2019	5										
2010-2014	5										
⋮											
1955-1959	5										

A continuación, partiendo de la Tabla 9 se halla un numero acumulativo de sismos N para cada intervalo de tiempo y clase de magnitud, para las magnitudes Ms y Mb. Tabularlo es una buena ayuda visual y colabora la extracción de valores de N, con el fin de calcular la tasa de ocurrencia empleando la ecuación 11. Siguiendo con el ejemplo para la magnitud Mb, se toma el periodo 1960-2019 para Mb=4. Estos valores se introducen en la ecuación 12, donde N=102 y T=60, entonces:

$$\lambda = N/\text{año} \rightarrow \lambda = 102/60 \rightarrow \lambda = 1,7$$

Siguiendo con la metodología, se tabulan todos los valores de λ para cada valor de magnitud y periodo de tiempo.

Tomando la ecuación 12 se calcula el valor de la desviación estándar (σ) para cada intervalo de tiempo y su magnitud correspondiente (Tabla 10), por ejemplo, para el periodo de 1955-2019 para la magnitud Mb=4,5, donde, $\lambda=1,10769231$ y T=65 años, se tiene lo siguiente:

$$\sigma(\lambda) = \sqrt{\lambda/T} \rightarrow \sigma(\lambda) = \sqrt{1,10769231/65} \rightarrow \sigma(\lambda) = 0,13054279$$

Tabla 10. Metodología a seguir para organizar los valores de la desviación estándar en determinados periodos de tiempo.

Periodos	Años (T)	Magnitud Mb								
		$1/\sqrt{T}$	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
			$\sigma\lambda$							
2015-2019	5									
1960-2019	60									
⋮										
1955-2019	65									

En un gráfico bilogarítmico se introducen y plotean los valores de la Tabla 10, es decir, los valores de $\sigma(\lambda)$ junto con la función $1/\sqrt{T}$, con intervalos de 5 años acumulados para cada magnitud. Luego, al tener todos los valores graficados se procede a realizar una comparación visual entre las líneas de tendencia de $\sigma(\lambda)$ y $1/\sqrt{T}$, tanto para la magnitud Ms como para Mb.

Cuando ciertos intervalos de las líneas de tendencia de $\sigma(\lambda)$ son muy cercanos a la línea de tendencia de $1/\sqrt{T}$, casi coincidiendo, dicho intervalo se considera completo. La metodología empleada para la comparación visual es proyectar una línea recta paralela a $1/\sqrt{T}$, la cual se lleva a la línea de tendencia de $\sigma(\lambda)$ y sobre esta se observa y analiza cuáles intervalos coinciden con ésta, quedando a interpretación de cada investigador que emplee el método. Por ejemplo, en la Figura 7 se puede observar que los periodos de 5 y 10 años (puntos encerrados en el círculo rojo) de la $\sigma(\lambda)$ coinciden mejor que el resto de los puntos dentro de la recta amarilla (recta que se proyecta paralelamente a $1/\sqrt{T}$), por lo tanto, se consideran este intervalo en completitud.

Cabe resaltar que en esta investigación se eligió que la completitud sea aceptable para intervalos de tiempo mínimo de 15 años.

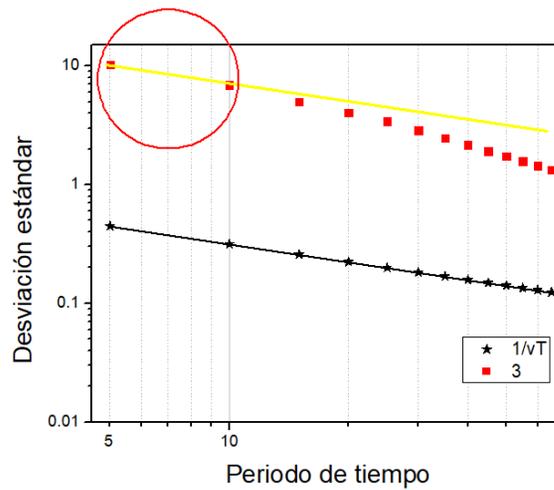


Figura 7. Ejemplo de cómo se hace la comparación entre $\sigma(\lambda)$ y $1/\sqrt{T}$.

Posterior al cálculo de los periodos para cada rango de magnitud, se procede a realizar un promedio de los valores de λ ya calculados y tabulados, se toman valores de λ del intervalo que se determine en consideración, esto para cada periodo y magnitud. Para hallar el número de eventos ocurridos en cada intervalo de tiempo, λ se debe multiplicar por 65 años para hallar el valor de N . Se calcula $\log N$ y se confecciona una gráfica M_b vs $\log N$ y se realiza una regresión lineal con su ecuación para elaborar un catálogo.

6.5.1 Metodología para el cálculo del periodo de retorno

Para el cálculo del periodo de retorno se procede a tomar la recta de la gráfica M_b vs $\log N$. Se toman los valores de a y b , y se introducen en la ecuación 10 para así hallar la magnitud máxima calculada a partir del catálogo generado por el método de Stepp.

Para calcular el periodo de retorno se toman las ecuaciones 13 o 14 (depende de cómo el investigador lo prefiera, ya que puede expresarse en días o en años), determinándola para cada magnitud.

6.6 Metodología para aplicar el método de Stepp mediante al ajuste potencial

Al aplicar esta variante metodológica alternativa se conserva parte del método original, se hacen los mismos procedimientos explicados anteriormente hasta el momento del cálculo de $\sigma(\lambda)$.

Para el desarrollo de este método alternativo se emplea un gráfico semilogarítmico (años vs desviación estándar), donde, el eje de las abscisas está en escala normal y el eje de las ordenadas en escala logarítmica, ver Figura 8. Se grafica tanto para las magnitudes M_s y M_b , de forma separada. Los valores de $\sigma(\lambda)$ se plotean en este gráfico junto con el de $1/\sqrt{T}$. Cabe aclarar que los datos que se grafican son extraídos desde la Tabla 10.

Luego se procede a comprar los R^2 de cada intervalo, constatando que todos sean mayores o iguales a 0,99, es decir, un alejamiento del 0,01 en relación a R^2 . Suele suceder que no siempre se cumple con este requisito, por lo tanto, se debe mejorar el R^2 buscando un valor que cumpla con el primer requisito y esto conlleva a proceder con la eliminación sucesiva de los periodos de forma cronológica, de los más antiguos a los más recientes, hasta obtener un periodo en el cual $R^2 \geq 0,99$ o hasta eliminar un mínimo aceptable de 15 años para determinar ese periodo de tiempo en completitud, tal como se evidencia en la Figura 8 a y b, esto con el fin de mejorar la calidad de la información proveniente de las redes sismológicas con el paso de los años. Por ejemplo, en la Figura 8a, tomando la magnitud $M_b=3,5$, el R^2 antes de la eliminación es de 0,9063 y después, en la Figura 8b, el R^2 es igual a 0,9997.

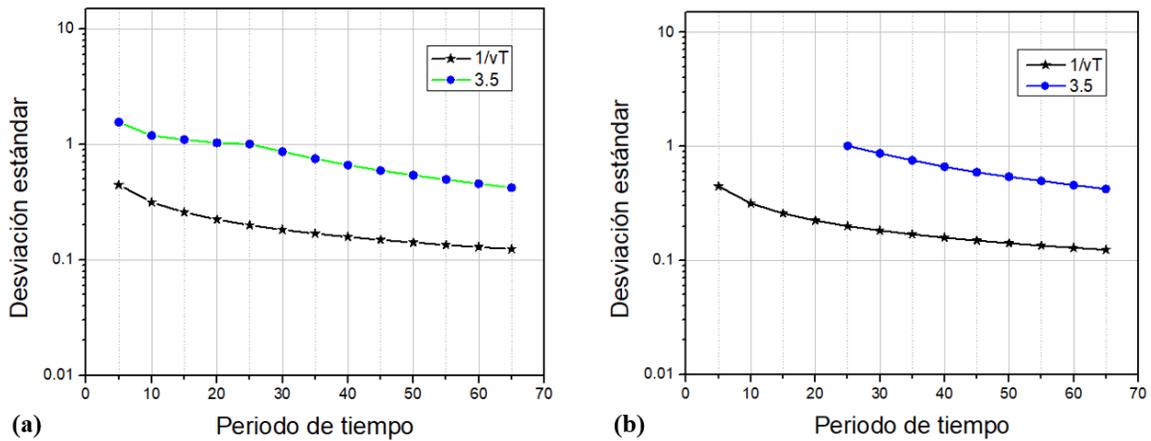


Figura 8. Metodología aplicada para la eliminación de puntos y corregir el R^2 .

Luego de calcular y definir los periodos de tiempo que están en completitud, se calcula N de forma similar al método de Stepp, usando el promedio de las tasas de ocurrencia de los periodos en completitud definidos.

Con los valores de N definidos para cada periodo de tiempo se procede a graficar Magnitud vs $\log N$, obteniendo una ecuación, a partir de la cual, y del mismo modo que el método de Stepp, se determina el periodo de retorno y la magnitud máxima probable en las escalas M_s o M_b , dependiendo de cómo se requiera.

7. Resultados y discusión

7.1 Análisis de la sismicidad histórica

El avance de la tecnología y su impacto en este campo de la geofísica se ve reflejado en los gráficos representados a continuación (Figura 9, Figura 10 y Figura 11). En la Figura 9 se puede observar que para el periodo de tiempo que inicia desde el año 1805 al año 1954, los registros de sismos son muy pocos, además, hay varios años de los cuales no se tiene ningún reporte de sismos. En estos 150 años se tuvo registro de apenas 39 sismos, representando solo el 0,3% del total de sismos registrados hasta el 2019. Es de notar que en gran parte de este periodo de tiempo los registros son memorias escritas de las personas que presenciaron el fenómeno y que describían el evento de carácter cualitativo. A partir de la década del 30 se observa que hay cada vez más registros por año debiéndose al aumento en la sensibilidad en materia de detección de sismos.

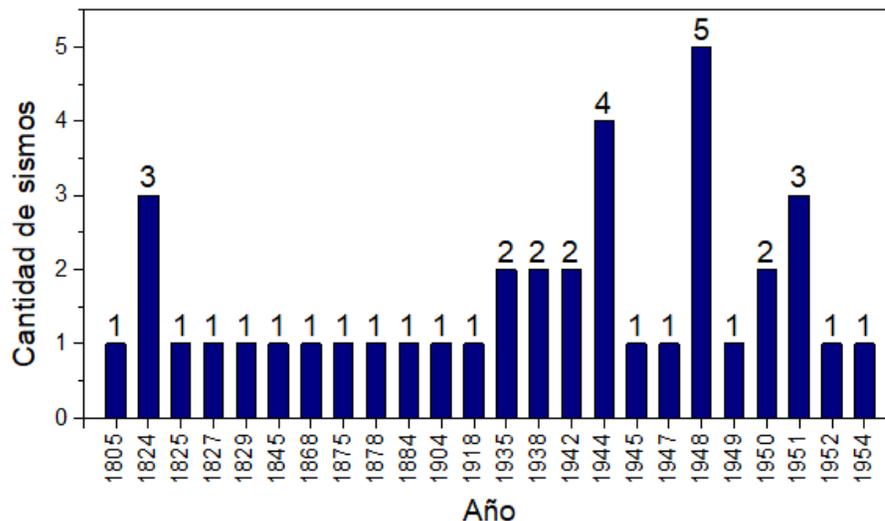


Figura 9. Representa la cantidad de sismos entre 1805-1954 según el año vs número de sismos.

Comparando la Figura 10 y la Figura 11, se puede deducir que a partir del año 1993 hay un gran incremento en los registros de sismos ocurridos por año, lo cual se puede atribuir a la fundación de la Red Sísmica Nacional de Colombia (RSNC) dada el mismo año, aumentando la resolución y consecuentemente la capacidad de las estaciones al registrar sismos de magnitudes muy pequeñas. Consecuentemente, el cambio es aún más notorio a partir del comienzo del año 2009 (Figura 11), ya que el número de sismos en los registros aumenta de manera significativa, siendo la RSNC la fuente de la mayoría de estos. Otro factor para rescatar de la Figura 10 y Figura 11 es que los periodos comprendidos entre el año 1983 al 1993 se tienen pocos registros y esto es debido a periodos de estancamiento, producto de un pobre desarrollo en materia de detección.

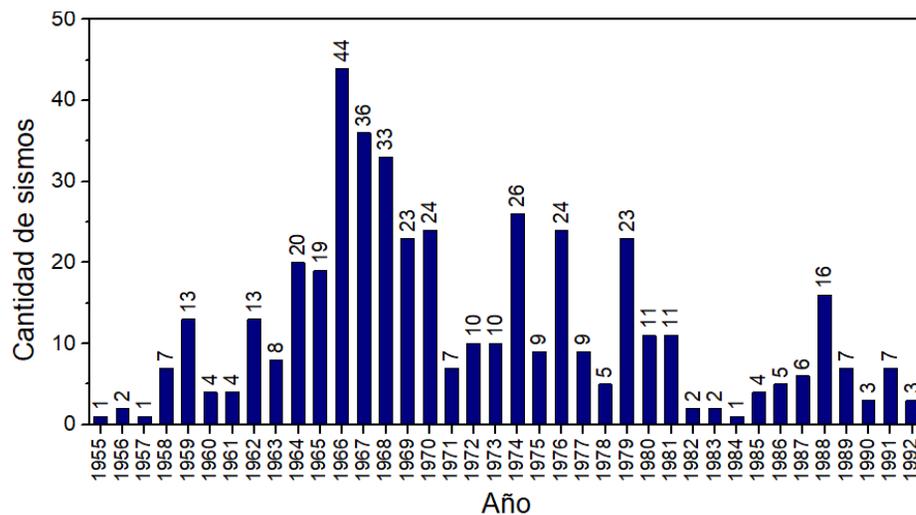


Figura 10. Representa la cantidad de sismos entre 1955-1992 según el año vs número de sismos.

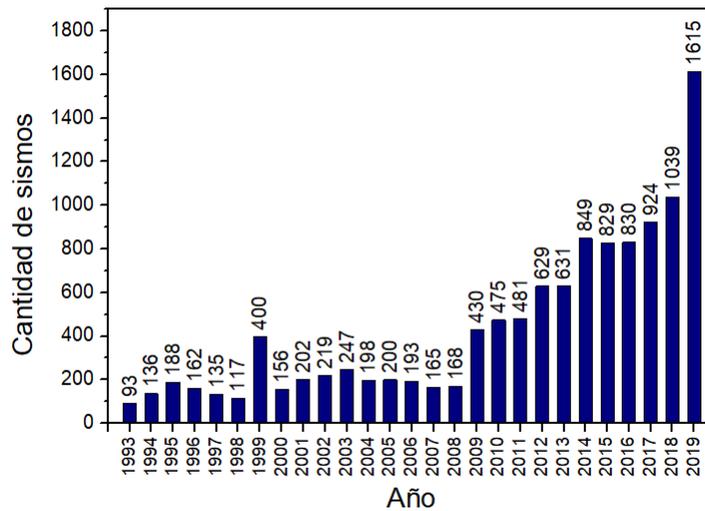


Figura 11. Representa la cantidad de sismos entre 1993-2019 según el año vs número de sismos.

En general la contribución de la RSNC en los últimos años ha sido de mucha importancia, evidenciando un aporte diferenciable al Catálogo Sísmico confeccionado para los 215 años en cuestión, como se puede ver en Figura 12, brindando la mayor cantidad de registros sísmicos al estudio, cercano al 95,20% del total de registros del catálogo.

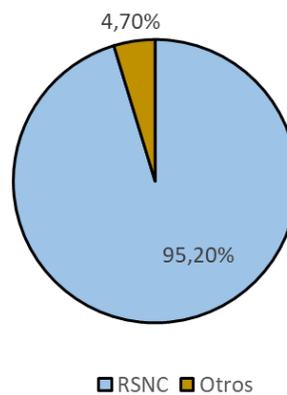


Figura 12. RSNC vs otras fuentes.

A partir de este estudio se definió la distribución de epicentros en la región del Eje Cafetero, en la cual se evidencian cuatro (4) zonas que poseen una mayor concentración de estos (Figura 13). Para la confección del mapa, las fallas se descargaron desde la base de datos del Servicio Geológico Colombiano.

El área 1 se ubica al suroccidente, en los departamentos de Valle del Cauca, Risaralda y Chocó. La mayor concentración de epicentros en este sector puede estar asociado a las fallas de la zona, como son la Falla Cauca-Patía, Quebrada-Nueva, Cauca-Almaguer, Montenegro, Apía y Mistrató en el margen oriental de la Cordillera Central (Figura 13). Nótese el alineamiento de las distribuciones de epicentros de nororiente-suroccidente, siguiendo el rumbo de las cordilleras Occidental y Central.

El área 2 es un área más pequeña que abarca principalmente el departamento de Quindío donde se presenta una menor concentración de epicentros (Figura 13). Esta área está atravesada por fallas importantes como son las de San Jerónimo, Silvia-Pijao, Ibagué y Palestina.

En el noroeste del área de estudio se ubica la zona número 3, cuya alta concentración de epicentros se puede atribuir a la actividad de las fallas Amurapá, Apía y Mistrató (Figura 13). Esta área no fue identificada por Galeano y Ramirez (2015), siendo una de las razones el hecho de que en dicha investigación contaban con menor cantidad de datos en comparación al actual trabajo, lo que les dificultaba su identificación, estando esta zona ubicada entre los departamentos de Chocó, Caldas y sur de Antioquia.

En el área número 4, que se encuentra en el oriente del área de estudio, se detecta una zona con gran cantidad de sismos, que probablemente son producto de las importantes fallas de Cambao, Honda, Alto el Trigo y La Sierra. En este sector la distribución de epicentros sigue un arreglo lineal en sentido nororiente-suroccidente. (Figura 13)

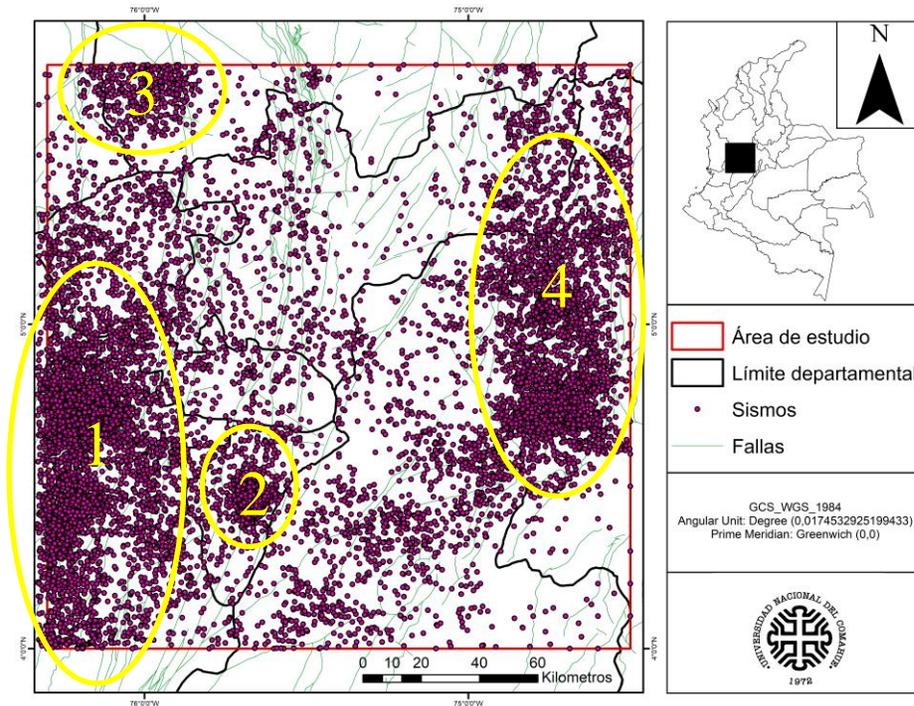


Figura 13. Mapa de distribución de epicentros de todos los sismos ocurridos en el Eje Cafetero desde 1805 al 2019. Mapa confeccionado a partir de la información contenida en el catálogo y la base de datos del Servicio Geológico Colombiano.

A partir de la Figura 14 se representa la distribución epicentral de los sismos con profundidades hipocentrales mayores a 100 kilómetros (Figura 14A) y menores a 100 kilómetros (Figura 14B). Según (Bolt *et al.*, 1975), se considera que los sismos mayores a 100 Km de profundidad no representan gran amenaza sísmica, debido a que a distancias iguales o mayores del foco, la aceleración pico en roca no supera $0,1g$, siendo g la aceleración de la gravedad. Igualmente, ha considerado poco importante a los sismos con distancias hipocentrales mayores a 200 km, de modo que no son muy relevantes en cuanto al daño provocado. Se debe tener en cuenta que la aceleración pico representa los mayores valores de aceleración del suelo en un periodo de tiempo definido.

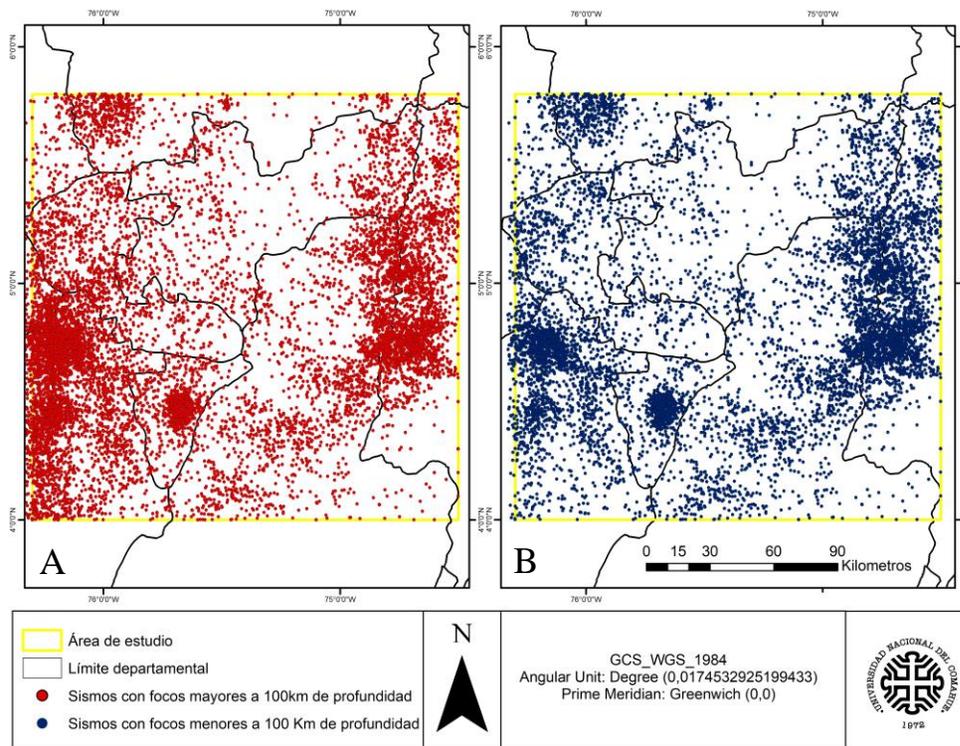


Figura 14. Mapas de sismos mayores (A) y menores (B) a 100 Km de profundidad. Mapa confeccionado a partir de los datos contenidos en el catálogo y la información contenida en la base de datos del Servicio Geológico Colombiano.

En esta investigación se decide ampliar la Figura 14B a la Figura 15, con el fin de poder identificar y analizar con mayor claridad los sismos con profundidades hipocentrales menores a los 100 Km.

En la región del Eje Cafetero la ocurrencia de sismos con hipocentros de 60 a 100 km de profundidad se da principalmente en su margen occidental, entre la Cordillera Central y Occidental (Figura 15A), estando probablemente asociados a la zona de subducción, producto de los esfuerzos interplaca.

En la Figura 15B se observa una mayor concentración de los epicentros de los sismos con profundidades hipocentrales de 30 a 60 kilómetros al noroccidente del área de estudio. Los sismos más someros, con hipocentros menores a 30 kilómetros de profundidad, están asociados probablemente al fallamiento local. Además, se hace notorio el hecho de que en el sector occidental la ocurrencia de sismos es mucho mayor (Figura 15C).

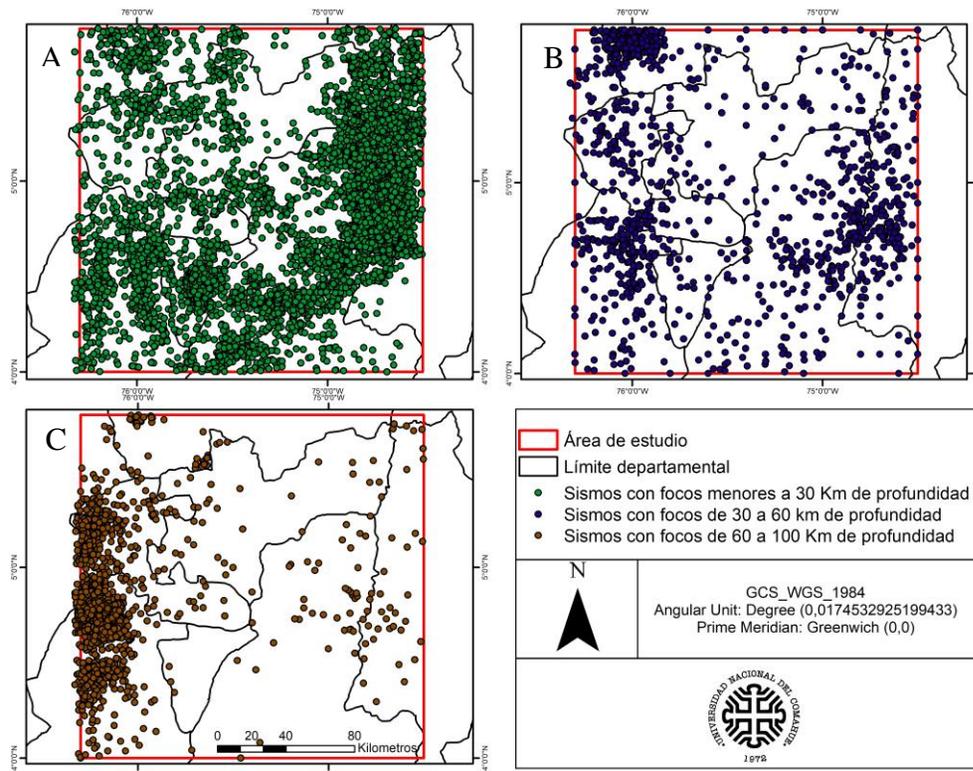
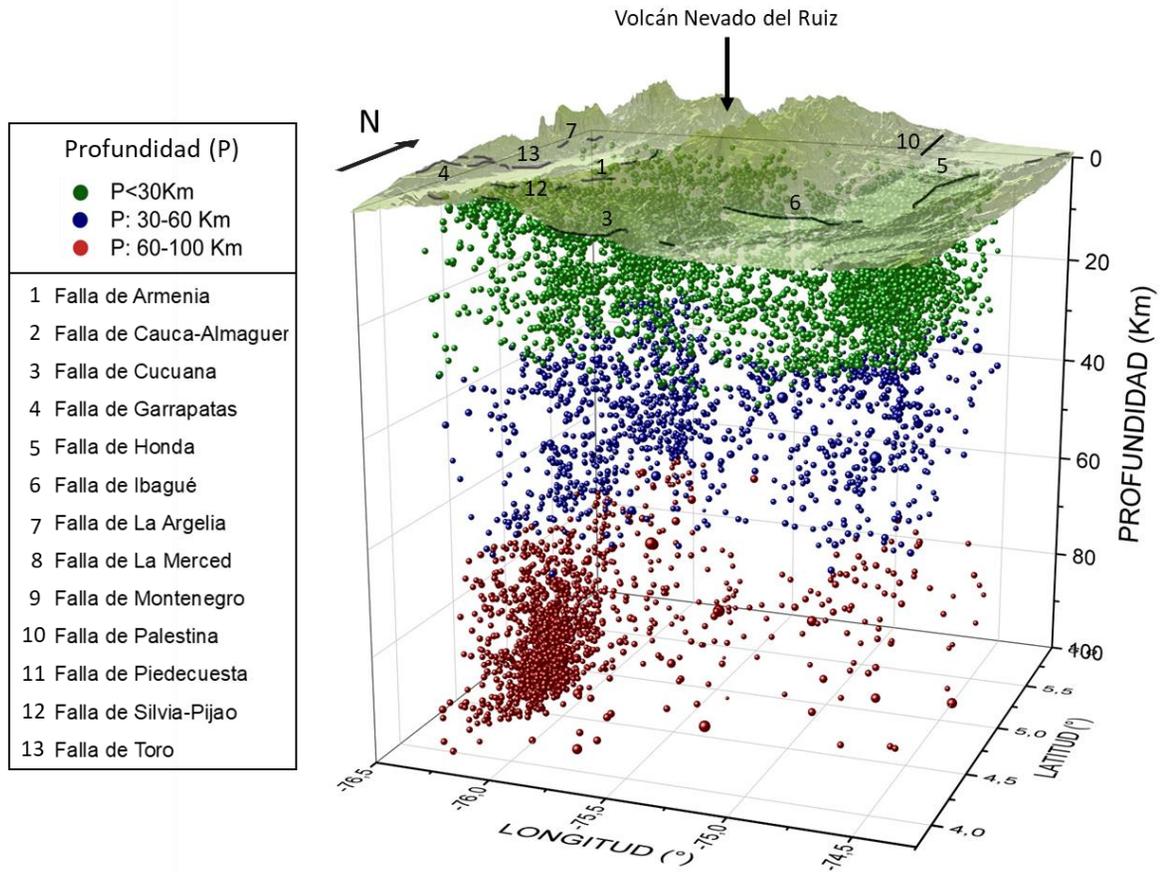


Figura 15. Mapas de sismos con focos menores a los 30 kilómetros (Km) de profundidad (A), focos de 30 a 60 Km de profundidad (B) y focos de 60 a 100 km de profundidad (C). Mapas confeccionados a partir de los datos contenidos en el catálogo y la información contenida en la base de datos del Servicio Geológico Colombiano.

A fin de contar con un análisis de mayor precisión frente a la geología estructural de la zona de estudio, se realizó una representación en tercera dimensión de la distribución de los focos sísmicos en profundidad en el Eje Cafetero (Figura 16), a partir de lo cual se puede apreciar cómo varía dicha distribución en función de la profundidad. La Figura 16 representa dos vistas en tercera dimensión (3D), la primera en sentido noroccidental (Figura 16A) y la segunda en sentido nororiental (Figura 16B).

Como se denota en la Figura 16, los sismos de focos someros están organizados en distintos sectores de la zona de estudio, estando estos concentrados principalmente al oriente. Por otro lado, los sismos de focos profundos están concentrados principalmente al occidente de la zona de estudio, siendo más evidente a medida que aumenta la profundidad focal.

Como se observa en la Figura 16, el área de estudio está afectada por grandes fallas, siendo estas las responsables de la mayoría de los sismos con menor profundidad hipocentral. Como se puede notar, los grandes volúmenes de sismos siguen aproximadamente el mismo sentido de las fallas.



A

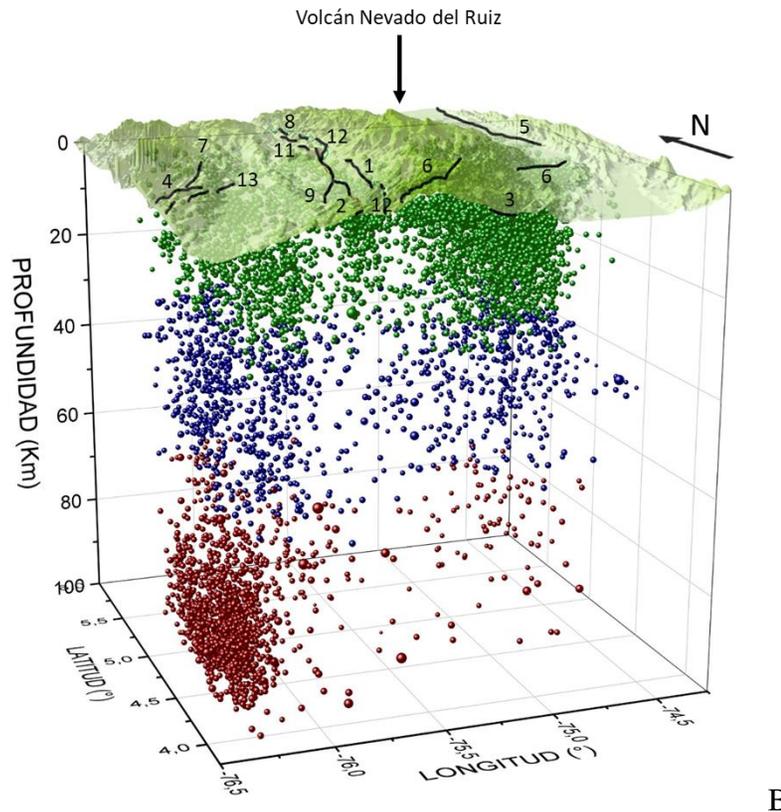


Figura 16: Representación gráfica confeccionada en tercera dimensión (3D) de todos los sismos con profundidades hipocentrales menores a 100 kilómetros contenidos en el catálogo, evidenciando las fallas más importantes (líneas negras). La vista del cubo es en sentido hacia el noroccidente (A) y hacia el nororiental (B). Para la realización del modelamiento (3D) de la región del Eje Cafetero se empleó información descargada desde la base de datos del Sistema Geológico Colombiano.

7.1.1 Focos sísmicos con profundidades hipocentrales menores a 30 kilómetros

Las fuentes sísmicas asociadas a la deformación cortical están relacionadas principalmente a los sistemas de fallas más relevantes que afectan la región de estudio. Estos sistemas de fallas están agrupados de manera paralela y en dirección axial a la Cordillera Central y de los valles, como puede ser observado en la Figura 17, los cuales demarcan los límites de esta cordillera con la Cordillera Occidental y Oriental. En la Figura 17 se representan dos vistas 3D, la primera en sentido nororiental (Figura 17A) y la segunda en sentido noroccidental (Figura 17B).

Los sistemas de fallas más importantes en este sector tienen tasas de movimiento que promedian los 2 milímetros por año, provocando posiblemente una actividad sísmica importante. En la Figura 17 se observa que las distribuciones de puntos coinciden con el rumbo de las principales fallas que afectan la región.

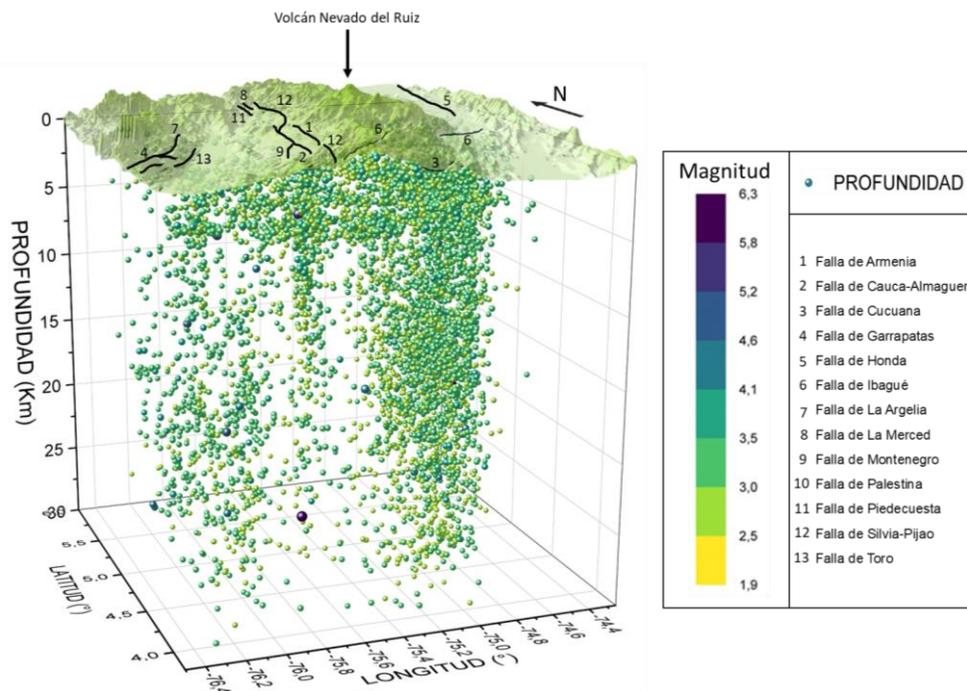
Cabe destacar que en el área de estudio hay sectores con poca ocurrencia de sismos, lo que puede conducir a una acumulación de energía a lo largo del tiempo, que en un futuro podría ser liberada, desencadenando un sismo de mayor magnitud y potencialmente destructivo.

- Sector oeste

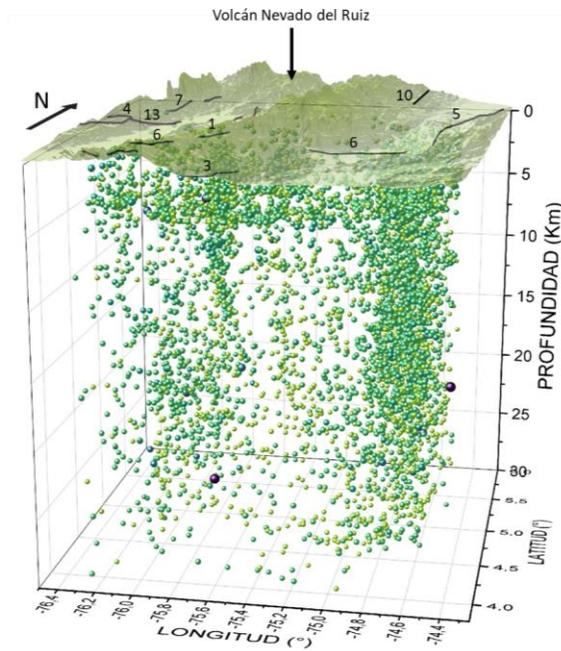
En el sector oeste, la gran cantidad de sismos reportados se debe posiblemente a la alta tasa de movimiento de la Falla Argelia (7), Toro (13), Cauca-Almaguer (2) y Silvia-Pijao (12) todas pertenecientes al sistema de fallas Romeral, (ver Figura 4 para una mejor visualización). A partir de la Figura 17 se puede notar que la mayoría de los sismos que se han generado en este sector del área de estudio están dentro de los primeros 20 kilómetros de profundidad. A mayores profundidades y no superando los 30 kilómetros, se observa que la cantidad de sismos reportada es mucho menor.

- Sector este

En el sector este del área de estudio, en sentido norte-sur se hace evidente una gran cantidad de puntos que representan los eventos sísmicos reportados, los cuales se encuentran alineados aproximadamente en sentido norte-sur, asociándose al tren tectónico de la región (Figura 17). Estas grandes distribuciones de puntos siguen los rumbos de las fallas importantes que cortan esta región, como las fallas de Honda (5), Ibagué (6) y Palestina (10) (ver Figura 4 para una mejor visualización), conduciendo a la posibilidad de tener gran actividad sísmica.



A



B

Figura 17: Representación gráfica confeccionada en tercera dimensión (3D) de todos los sismos con profundidades hipocentrales menores a 30 kilómetros contenidos en el catálogo, evidenciando las fallas más importantes (líneas negras) y la magnitud. La vista del cubo es en sentido hacia el nororiente (A) y hacia el noroccidente (B). Para la realización del modelamiento (3D) de la región del Eje Cafetero se empleó información descargada desde la base de datos del Sistema Geológico Colombiano.

7.1.2 Focos sísmicos con profundidades hipocentrales entre 30 a 60 kilómetros

Los focos sísmicos comprendidos en el intervalo de profundidad de 30-60 kilómetros (Figura 18) muestran una densa distribución de sismos hacia el occidente del área, donde posiblemente importantes juegos de fallas sean las generadoras de estos eventos sísmicos. La Figura 18 representa dos vistas 3D, siendo la primera en sentido noroccidental (Figura 18A) y la segunda en sentido nororiental (Figura 18B).

El sector occidental está afectado por importantes fallas como, La Merced (8), Montenegro (9), Silvia-Pijao (12) y Toro (13), lo cual se puede apreciar con mayor claridad en la Figura 4. Nótese como los sectores con mayor concentración de focos sísmicos se encuentra al este del área, y a medida que aumenta la profundidad, la concentración se hace mayor hacia el oeste, siendo probablemente provocado por los efectos asociados a la subducción. Además, se puede observar en tercera dimensión una orientación en sentido norte-sur para los sectores con gran densidad de focos.

En la Figura 18 se logra percibir que la mayoría de los sismos tienen magnitudes de 2 a 3,5, siendo muy poco probable que superen magnitudes de 5 en todo el Eje Cafetero. Se evidencia también que el sector oriental y noroccidental poseen volúmenes con gran densidad de focos sísmicos.

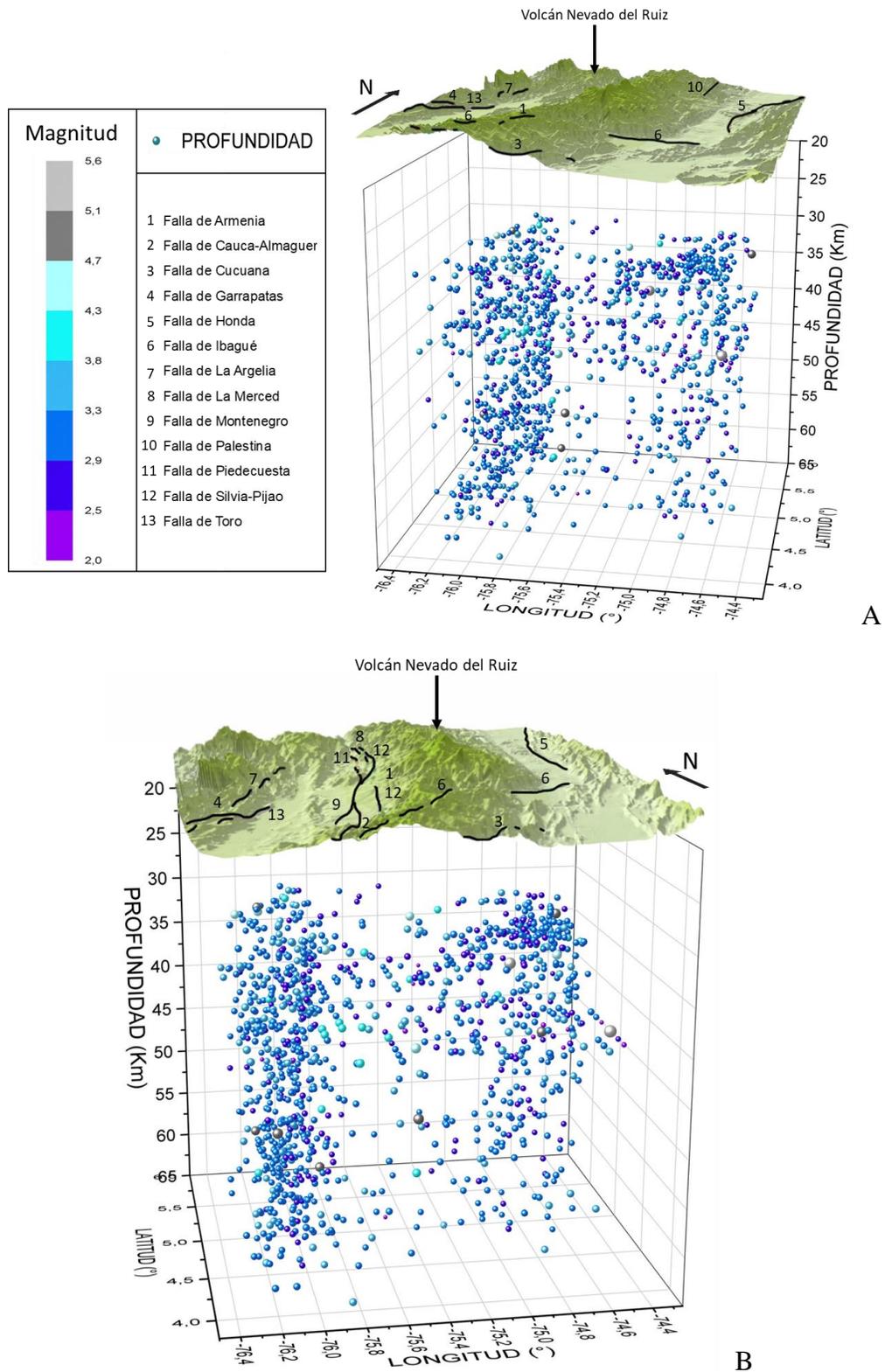


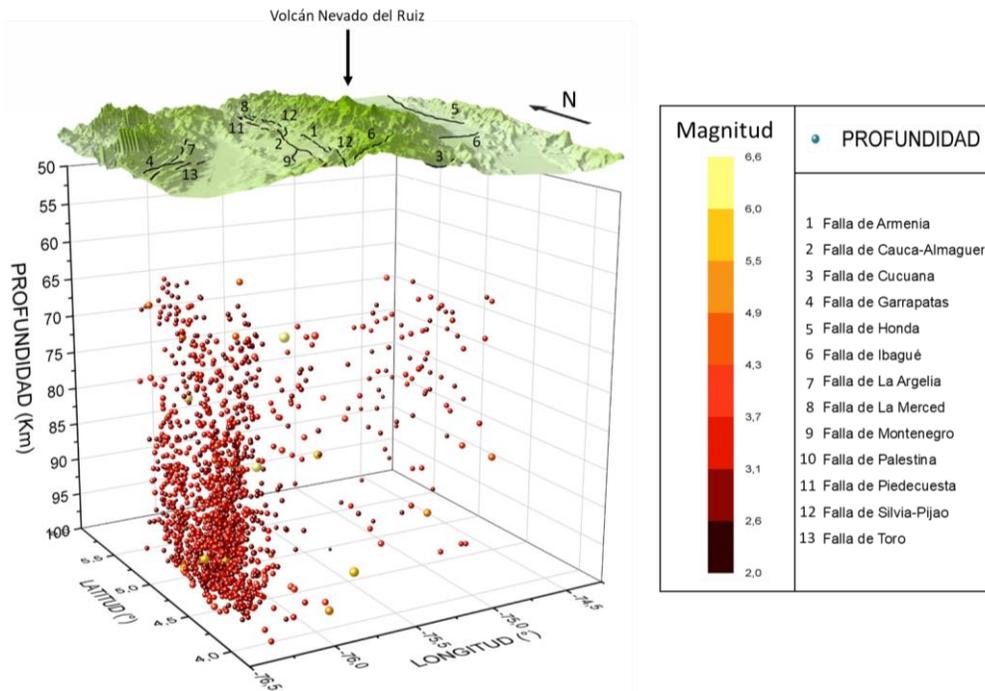
Figura 18: Representación gráfica confeccionada en tercera dimensión (3D) de todos los sismos con profundidades hipocentrales de 30 a 60 kilómetros contenidos en el catálogo, evidenciando las fallas más

importantes (líneas negras) y la magnitud. La vista del cubo es en sentido hacia el noroccidente (A) y hacia el nororiente (B). Para la realización del modelamiento (3D) de la región del Eje Cafetero se empleó información descargada desde la base de datos del Sistema Geológico Colombiano.

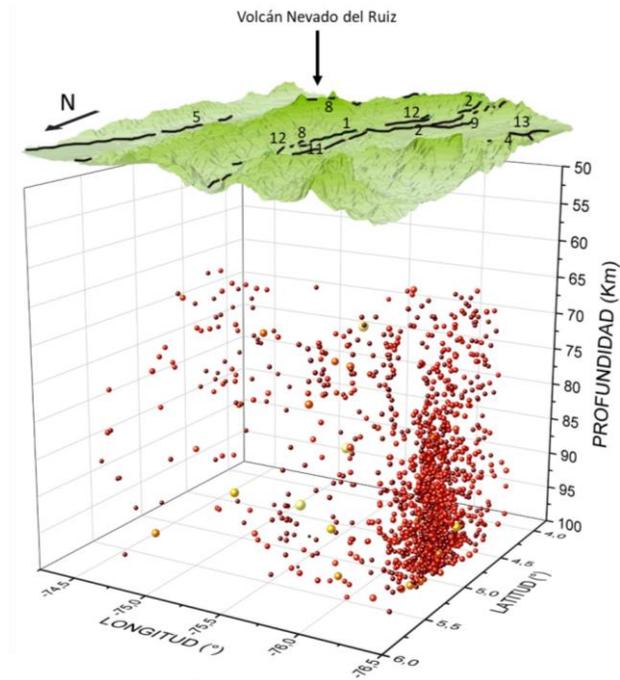
7.1.3 Focos sísmicos con profundidades hipocentrales entre 60 a 100 kilómetros

En el intervalo de 60 a 100 kilómetros se observa que el sector con mayor cantidad de fuentes sísmicas es el oeste del área de estudio, estando asociado posiblemente a la subducción de las placas, asimismo, se resalta el hecho de que, en dirección al sector este hay una disminución de dichos eventos. La Figura 19 representa tres vistas 3D, la primera en sentido nororiental (Figura 19A), la segunda en sentido suroriental (Figura 19B) y la tercera en sentido noroccidental (Figura 19C).

En el sector sur occidental y a profundidades mayores de los 80 kilómetros se observan focos sísmicos del orden de magnitud de 6 a 7 (Figura 19). En el mismo sentido, se hace notorio que en el área en estudio hay sectores con poca ocurrencia de sismos a lo largo del tiempo, lo que potencialmente conlleva a una acumulación de energía, que al ser liberada posiblemente generaría sismos de mayores magnitudes en un futuro. Lo anterior indica una alta probabilidad de que el sismo de magnitud máxima probable determinado por los métodos empleados en este estudio, se genere a esa o mayores profundidades.



A



B

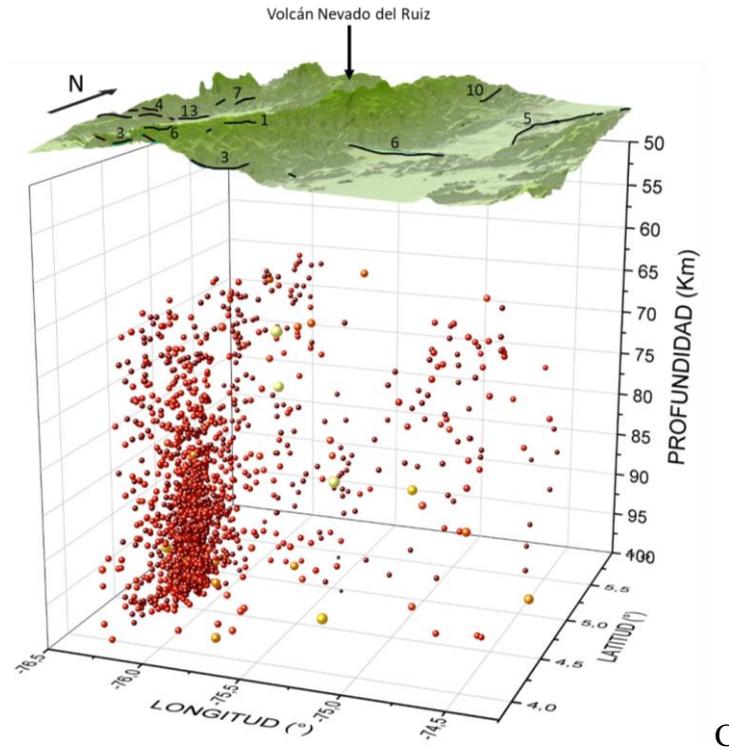


Figura 19: Representación gráfica confeccionada en tercera dimensión (3D) de todos los sismos con profundidades hipocentrales de 60 a 100 kilómetros contenidos en el catálogo, evidenciando las fallas más importantes (líneas negras) y la magnitud. La vista del cubo es en sentido hacia el nororiente (A), suroriente (B) y noroccidente (C). Para la realización del modelamiento (3D) de la región del Eje Cafetero se empleó información descargada desde la base de datos del Sistema Geológico Colombiano

7.2 Resultados al confeccionar y completar el catálogo sísmico

Al confeccionar y organizar el catálogo sísmico como se ha indicado en la metodología, el mismo se encuentra incompleto, con vacíos en los registros de distintas magnitudes ([ver anexo](#)), por lo tanto, se procede a su completitud por medio de regresiones lineales, obteniéndose las siguientes ecuaciones con su respectivo R^2 y sus gráficas (Figura 20):

Mw vs Ms	$M_s = 1,1801 * M_w - 1,7095$	$R^2 = 0,9268$	18
Ml vs Ms	$M_s = 1,1162 * M_l - 1,5582$	$R^2 = 0,5565$	19
Mb vs Ms	$M_s = 1,1427 * M_b - 1,5166$	$R^2 = 0,6974$	20
Ms vs Mb	$M_b = 0,6103 * M_s + 2,2456$	$R^2 = 0,6974$	21
Ml vs Mb	$M_b = 0,419 * M_l + 2,3202$	$R^2 = 0,5279$	22
Mw vs Mb	$M_b = 0,9054 * M_w + 0,1212$	$R^2 = 0,8811$	23

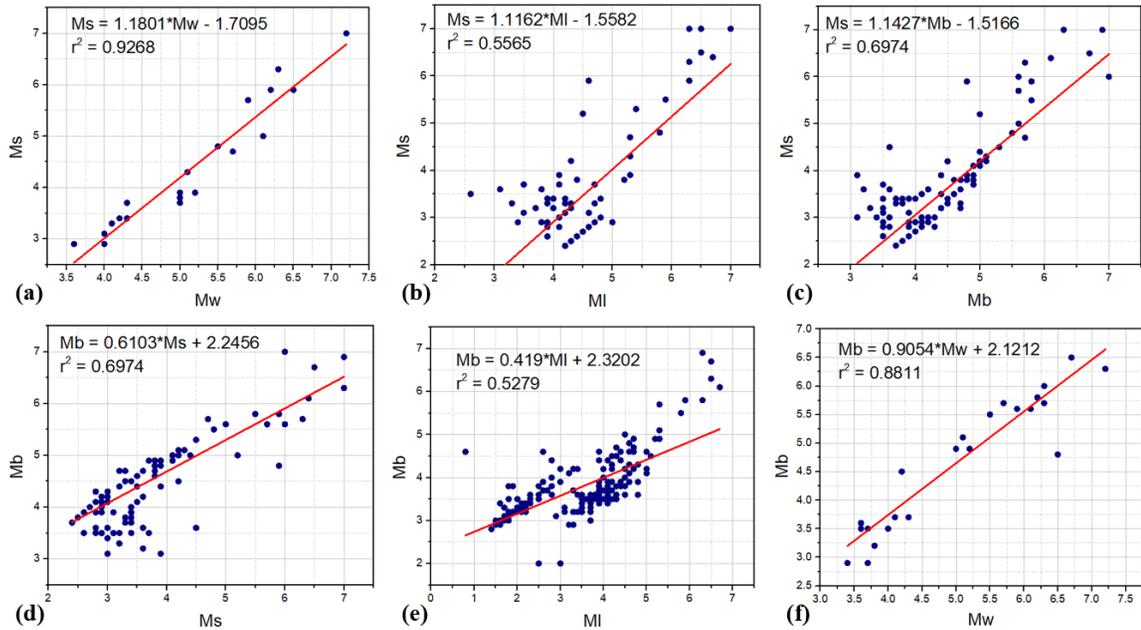


Figura 20. Regresiones lineales para el Eje Cafetero de las ecuaciones 18-23.

Al aplicar el cálculo del error a las ecuaciones 18, 19, 20, 21, 22 y 23, de forma independiente se logra eliminar los puntos más dispersos y de ese modo se obtienen valores más coherentes que han de generar una tendencia confiable al momento de completar los vacíos, como se puede observar en las ecuaciones 24, 25, 26, 27, 28 y 29 y a su vez en la Figura 21. Estas ecuaciones han sido corregidas luego de haber eliminado el 20% de los datos por mayor dispersión. Se comparan los R^2 calculados antes y después de eliminar el 20% de los puntos (Tabla 11), donde evidentemente se logra ver un aumento del coeficiente de correlación.

Mw vs Ms	$M_s = 1,1701 \cdot M_w - 1,6521$	$R^2 = 0,9497$	24
MI vs Ms	$M_s = 1,4125 \cdot M_I - 3,1188$	$R^2 = 0,8037$	25
Mb vs Ms	$M_s = 1,2935 \cdot M_b - 2,3904$	$R^2 = 0,9345$	26
Ms vs Mb	$M_b = 0,6007 \cdot M_s + 2,3975$	$R^2 = 0,9312$	27
MI vs Mb	$M_b = 0,3413 \cdot M_I + 2,5378$	$R^2 = 0,6784$	28
Mw vs Mb	$M_b = 0,9142 \cdot M_w + 0,1684$	$R^2 = 0,9486$	29

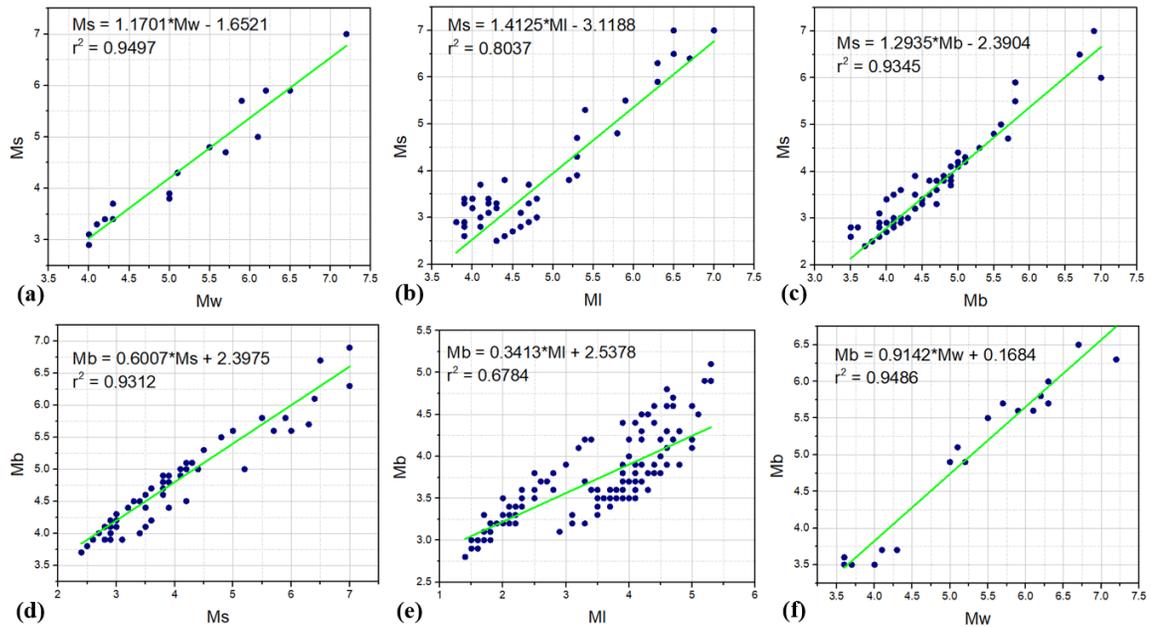


Figura 21. Regresiones lineales para el Eje Cafetero de las ecuaciones 24-29.

Tabla 11. Comparación de los R^2 .

Antes del cálculo del error	Después del cálculo del error
$R^2 = 0,9268$	$R^2 = 0,9497$
$R^2 = 0,5565$	$R^2 = 0,8037$
$R^2 = 0,6974$	$R^2 = 0,9335$
$R^2 = 0,6974$	$R^2 = 0,9312$
$R^2 = 0,5279$	$R^2 = 0,6784$
$R^2 = 0,8811$	$R^2 = 0,9486$

Para ver el catálogo completo [ver anexo](#).

7.3 Umbral mínimo de detección instrumental (M_{\min}) y frecuencia de ocurrencia sísmica calculados para la región del Eje Cafetero

Para el cálculo del umbral mínimo, como anteriormente se ha expuesto en la metodología, se procede en principio a agrupar las magnitudes M_s y M_b que se extraen del catálogo como se puede observar en la Tabla 12 y Tabla 13:

Tabla 12: Magnitud M_s agrupada en intervalos de 0,5.

Clases de magnitud M_s	N	Log N
≥ 0	11932	4,076
$\geq 0,5$	9484	3,976
≥ 1	6463	3,810
$\geq 1,5$	3506	3,544
≥ 2	1786	3,251
$\geq 2,5$	692	2,840
≥ 3	357	2,552
$\geq 3,5$	179	2,252
≥ 4	83	1,919
$\geq 4,5$	49	1,690
≥ 5	38	1,579
$\geq 5,5$	25	1,397
≥ 6	16	1,204
$\geq 6,5$	7	0,845
≥ 7	4	0,602

Tabla 13. Magnitud M_b agrupada en intervalos de 0,5.

Clases de magnitud M_b	N	Log N
≥ 0	12203	4,086
$\geq 0,5$	12203	4,086
≥ 1	12203	4,086
$\geq 1,5$	12203	4,086
≥ 2	12200	4,086
$\geq 2,5$	12155	4,084
≥ 3	8576	3,933
$\geq 3,5$	1016	3,006
≥ 4	259	2,413
$\geq 4,5$	137	2,136
≥ 5	59	1,770
$\geq 5,5$	35	1,544
≥ 6	15	1,176
$\geq 6,5$	6	0,778
≥ 7	1	0

Luego, se grafican los valores de las tablas, como se puede ver en la Figura 22, determinándose el umbral mínimo de detección instrumental (flecha roja). Para la región del Eje Cafetero se determinó el umbral de detección instrumental (M_{\min}), siendo para las magnitudes $M_s=0,5$ y $M_b=3$:

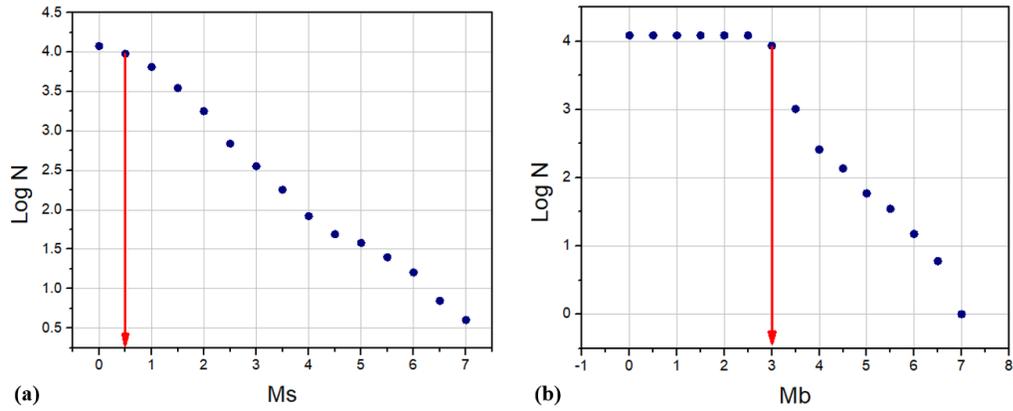


Figura 22. Gráficos provenientes de las Tabla 12 y Tabla 13.

Posteriormente a la determinación del umbral mínimo, se llega a la Tabla 13 y Tabla 14, para la magnitud Ms y Mb correspondientemente. Sus respectivos valores se grafican a partir del M_{\min} , como se puede observar en la Figura 23.

Tabla 14: Magnitud Ms agrupada en intervalos de 0,5 a partir del M_{\min}

Clases de magnitud Ms	N	Log N
$\geq 0,5$	9484	3,976
≥ 1	6463	3,810
$\geq 1,5$	3506	3,544
≥ 2	1786	3,251
$\geq 2,5$	692	2,840
≥ 3	357	2,552
$\geq 3,5$	179	2,252
≥ 4	83	1,919
$\geq 4,5$	49	1,690
≥ 5	38	1,579
$\geq 5,5$	25	1,397
≥ 6	16	1,204
$\geq 6,5$	7	0,845
≥ 7	4	0,602

Tabla 15: Magnitud Mb agrupada en intervalos de 0,5 a partir del M_{\min}

Clases de magnitud Mb	N	Log N
≥ 3	8576	3,933
$\geq 3,5$	1016	3,006
≥ 4	259	2,413
$\geq 4,5$	137	2,136
≥ 5	59	1,770
$\geq 5,5$	35	1,544
≥ 6	15	1,176
$\geq 6,5$	6	0,778
≥ 7	1	0

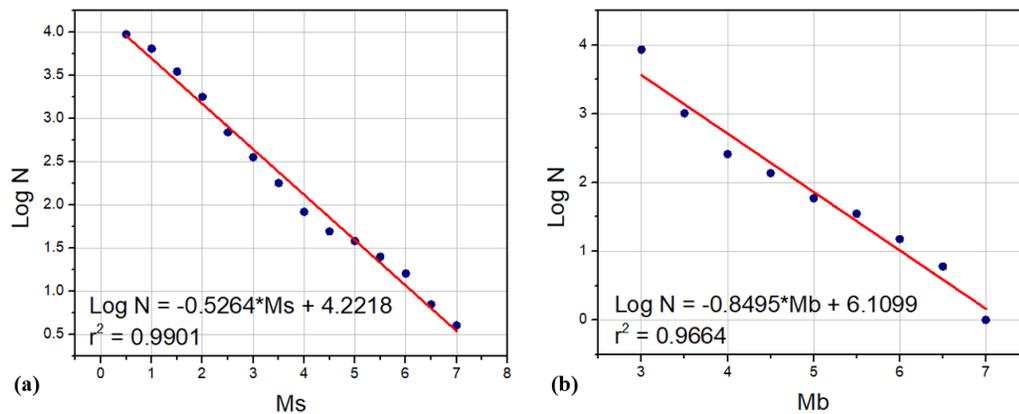


Figura 23. Graficas de correspondientes a las magnitudes Ms (a) y Mb (b).

A partir de los valores de a y b de las ecuaciones calculadas (con la forma dada en la ecuación 9) con base a la Figura 23a y la Figura 23b se logró determinar una magnitud máxima probable para la región del Eje Cafetero, empleando la ecuación 10. Cabe aclarar que estos valores pueden estar subestimados, ya que el procedimiento está desarrollado a partir de un catálogo sísmico real, el cual presenta periodos con pocos o ningún registro. Las magnitudes máximas probables obtenidas son:

- Ms = 8,020136778
- Mb = 7,19234844

7.4 Análisis de completitud probable y resultados de la evaluación de la magnitud máxima probable a partir de la aplicación del método de Stepp

A causa de la poca cantidad de datos registrados en el periodo de 1805 a 1953, se procede a aplicar el método de Stepp en el periodo 1954-2019. Como se observa en la Tabla 16 y Tabla 17. Se obtuvo N (número acumulativo de sismos) tanto para la magnitud Ms como para Mb

Tabla 16. Número acumulativo de sismos para magnitud Ms.

	Número acumulativo de sismos en el intervalo de tiempo (N)														
	Años (T)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	5	5,5	6	7	7,5
2015-2019	5	1738	986	289	133	40	14	7	3	0	1	1	0	0	0
2010-2019	10	2711	1912	608	302	80	30	18	4	0	2	1	0	0	0
2005-2019	15	2885	2267	880	507	122	53	27	6	2	2	1	0	0	0

2000-2019	20	2937	2574	1227	727	176	79	34	10	3	2	1	0	0	0
1995-2019	25	2963	2804	1569	977	255	127	42	12	4	2	4	1	1	0
1990-2019	30	2974	2859	1649	1030	274	142	48	13	4	3	5	1	1	0
1985-2019	35	2974	2859	1649	1036	296	145	52	16	4	3	5	1	1	0
1980-2019	40	2974	2864	1651	1041	302	149	54	18	4	3	5	2	1	0
1975-2019	45	2976	2881	1660	1057	309	154	59	21	5	3	6	2	1	1
1970-2019	50	2979	2899	1689	1072	318	164	71	23	7	4	6	3	1	1
1965-2019	55	3008	2948	1718	1088	330	169	78	26	7	5	6	3	1	1
1960-2019	60	3017	2955	1720	1092	335	170	80	28	8	9	6	3	3	1
1955-2019	65	3021	2957	1720	1094	335	173	83	29	9	9	7	4	3	1

Tabla 17. Número acumulativo de sismos para magnitud Mb.

Periodos	Años (T)	Número acumulativo de sismos en el intervalo de tiempo (N)								
		3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
2015-2019	5	2661	61	7	7	0	1	0	0	0
2010-2019	10	4744	143	11	15	1	1	0	0	0
2005-2019	15	5654	273	19	19	2	2	0	0	0
2000-2019	20	6497	429	27	22	2	2	0	0	0
1995-2019	25	7260	637	37	24	2	4	1	2	0
1990-2019	30	7440	678	49	29	3	6	1	2	0
1985-2019	35	7440	698	58	36	5	6	1	2	0
1980-2019	40	7448	702	65	39	7	7	1	2	0
1975-2019	45	7469	714	72	46	10	9	2	2	0
1970-2019	50	7507	733	82	60	13	11	3	2	0
1965-2019	55	7553	750	95	66	16	12	3	2	0
1960-2019	60	7558	755	101	69	17	16	5	2	0
1955-2019	65	7560	757	104	73	18	17	6	2	0

A partir de la ecuación 11 se calculó la tasa de ocurrencia de sismos λ que superan una magnitud de referencia para cada unidad de magnitud y periodo de tiempo, confeccionándose la Tabla 18. Así mismo, en la Tabla 19 se puede observar claramente que los valores de λ aumentan cuando los sismos son de baja magnitud, evidenciando que la ocurrencia de este tipo de sismos es mucho más frecuente que los sismos de una magnitud elevada. A partir de los datos calculados en la Tabla 18 y la Tabla 19, se procedió a calcular la desviación estándar para cada magnitud, usando la ecuación 12, en consecuencia, se confeccionó la Tabla 20 para la magnitud Ms y la Tabla 21 para la magnitud Mb.

Tabla 18. Número acumulativo de sismos y tasa de ocurrencia de sismos para la magnitud Ms.

Periodos	años	0,5		1		1,5		2		2,5		3		3,5	
		N	λ	N	λ	N	λ	N	λ	N	λ	N	λ	N	λ
2015-2019	5	1738	347,600	986	197,200	289	57,800	133	26,600	40	8,00	14	2,800	7	1,400
2010-2019	10	2711	271,100	1912	191,200	608	60,800	302	30,200	80	8,00	30	3,000	18	1,800
2005-2019	15	2885	192,333	2267	151,133	880	58,666	507	33,800	122	8,133	53	3,533	27	1,800
2000-2019	20	2937	146,850	2574	128,700	1227	61,350	727	36,350	176	8,800	79	3,950	34	1,700
1995-2019	25	2963	118,520	2804	112,160	1569	62,760	977	39,080	255	10,200	127	5,080	42	1,680
1990-2019	30	2974	99,133	2859	95,300	1649	54,966	1030	34,333	274	9,133	142	4,733	48	1,60
1985-2019	35	2974	84,971	2859	81,685	1649	47,114	1036	29,600	296	8,457	145	4,142	52	1,428
1980-2019	40	2974	74,350	2864	71,600	1651	41,275	1041	26,025	302	7,550	149	3,725	54	1,350
1975-2019	45	2976	66,133	2881	64,022	1660	36,888	1057	23,488	309	6,866	154	3,422	59	1,311
1970-2019	50	2979	59,580	2899	57,980	1689	33,780	1072	21,440	318	6,360	164	3,280	71	1,420
1965-2019	55	3008	54,690	2948	53,600	1718	31,236	1088	19,781	330	6,00	169	3,072	78	1,418
1960-2019	60	3017	50,283	2955	49,250	1720	28,666	1092	18,200	335	5,583	170	2,833	80	1,333
1955-2019	65	3021	46,476	2957	45,492	1720	26,461	1094	16,830	335	5,153	173	2,661	83	1,273

Periodos	años (T)	4		4,5		5		5,5		6		6,5		7	
		N	λ	N	λ	N	λ	N	λ	N	λ	N	λ	N	λ
2015-2019	5	3	0,600	0	0	1	0,200	1	0,200	0	0	0	0	0	0
2010-2019	10	4	0,400	0	0	2	0,200	1	0,100	0	0	0	0	0	0
2005-2019	15	6	0,400	2	0,133	2	0,133	1	0,066	0	0	0	0	0	0
2000-2019	20	10	0,500	3	0,150	2	0,100	1	0,050	0	0	0	0	0	0
1995-2019	25	12	0,480	4	0,160	2	0,080	4	0,160	1	0,040	1	0,040	0	0
1990-2019	30	13	0,433	4	0,133	3	0,100	5	0,166	1	0,033	1	0,033	0	0
1985-2019	35	16	0,457	4	0,114	3	0,085	5	0,142	1	0,028	1	0,028	0	0
1980-2019	40	18	0,450	4	0,100	3	0,075	5	0,125	2	0,050	1	0,025	0	0
1975-2019	45	21	0,466	5	0,111	3	0,066	6	0,133	2	0,044	1	0,022	1	0,022
1970-2019	50	23	0,460	7	0,140	4	0,080	6	0,120	3	0,060	1	0,020	1	0,020
1965-2019	55	26	0,472	7	0,127	5	0,090	6	0,109	3	0,054	1	0,018	1	0,018
1960-2019	60	28	0,466	8	0,133	9	0,150	6	0,100	3	0,050	3	0,050	1	0,016
1955-2019	65	29	0,446	9	0,138	9	0,138	7	0,107	4	0,061	3	0,046	1	0,015

Tabla 19. Número acumulativo de sismos y tasa de ocurrencia de sismos para la magnitud Mb.

Periodos	años	3		3,5		4		4,		5		5,5		6		6,5		7	
		N	λ	N	λ	N	Λ	N	λ	N	λ	N	λ	N	λ	N	λ	N	λ
2015-2019	5	2661	532,200	61	12,200	7	1,400	7	1,400	0	0	1	0,200	0	0	0	0	0	0
2010-2019	10	4744	474,400	143	14,300	11	1,100	15	1,500	1	0,100	1	0,100	0	0	0	0	0	0
2005-2019	15	5654	376,933	273	18,200	19	1,266	19	1,266	2	0,133	2	0,133	0	0	0	0	0	0
2000-2019	20	6497	324,850	429	21,450	27	1,350	22	1,100	2	0,100	2	0,100	0	0	0	0	0	0
1995-2019	25	7260	290,400	637	25,480	37	1,480	24	0,960	2	0,080	4	0,160	1	0,040	2	0,080	0	0
1990-2019	30	7440	248	678	22,600	49	1,633	29	0,966	3	0,100	6	0,200	1	0,033	2	0,066	0	0
1985-2019	35	7440	212,571	698	19,942	58	1,657	36	1,028	5	0,142	6	0,171	1	0,028	2	0,057	0	0
1980-2019	40	7448	186,200	702	17,550	65	1,625	39	0,975	7	0,175	7	0,175	1	0,025	2	0,050	0	0
1975-2019	45	7469	165,977	714	15,866	72	1,600	46	1,022	10	0,222	9	0,200	2	0,044	2	0,044	0	0
1970-2019	50	7507	150,140	733	14,660	82	1,640	60	1,200	13	0,260	11	0,220	3	0,060	2	0,040	0	0
1965-2019	55	7553	137,327	750	13,636	95	1,727	66	1,200	16	0,290	12	0,218	3	0,054	2	0,036	0	0
1960-2019	60	7558	125,966	755	12,583	101	1,683	69	1,150	17	0,283	16	0,266	5	0,083	2	0,033	0	0
1955-2019	65	7560	116,307	757	11,646	104	1,600	73	1,123	18	0,276	17	0,261	6	0,092	2	0,030	0	0

Tabla 20. Desviación estándar para cada periodo de tiempo y magnitud Ms.

Periodos	años (T)	1/√T	Magnitud Ms													
			0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
			σλ	σλ	σλ	σλ	σλ	σλ	σλ	σλ	σλ	σλ	σλ	σλ	σλ	σλ
2015-2019	5	0,441	8,337	6,280	3,400	2,306	1,264	0,748	0,529	0,346	0,346	0,200	0,200	0	0	0
2010-2019	10	0,316	5,206	4,372	2,465	1,737	0,894	0,547	0,424	0,200	0,200	0,141	0,100	0	0	0
2005-2019	15	0,258	3,580	3,174	1,977	1,501	0,736	0,485	0,346	0,163	0,163	0,094	0,066	0	0	0
2000-2019	20	0,223	2,709	2,536	1,751	1,348	0,663	0,444	0,291	0,158	0,158	0,070	0,050	0	0	0
1995-2019	25	0,200	2,177	2,118	1,584	1,250	0,638	0,450	0,259	0,138	0,138	0,056	0,080	0,040	0,040	0
1990-2019	30	0,182	1,817	1,782	1,353	1,069	0,551	0,397	0,230	0,120	0,120	0,057	0,074	0,033	0,033	0
1985-2019	35	0,169	1,558	1,527	1,160	0,919	0,491	0,344	0,206	0,114	0,114	0,049	0,063	0,028	0,028	0
1980-2019	40	0,158	1,363	1,337	1,015	0,806	0,434	0,305	0,183	0,106	0,106	0,043	0,055	0,035	0,025	0
1975-2019	45	0,149	1,212	1,192	0,905	0,722	0,390	0,275	0,170	0,101	0,101	0,038	0,054	0,031	0,022	0,022
1970-2019	50	0,141	1,091	1,076	0,821	0,654	0,356	0,256	0,168	0,095	0,095	0,040	0,048	0,034	0,020	0,020
1965-2019	55	0,134	0,997	0,987	0,753	0,599	0,330	0,236	0,160	0,092	0,092	0,040	0,044	0,031	0,018	0,018
1960-2019	60	0,129	0,915	0,905	0,691	0,550	0,305	0,217	0,149	0,088	0,088	0,050	0,040	0,028	0,028	0,016
1955-2019	65	0,124	0,845	0,836	0,638	0,508	0,281	0,202	0,140	0,082	0,082	0,046	0,040	0,030	0,026	0,015

Basándose en los datos registrados en dichas tablas se elaboró un gráfico ‘Periodo de tiempo vs log N para cada magnitud, estos gráficos se plotearon junto con la recta $1/\sqrt{T}$ y en escala bilogarítmica, obteniéndose los gráficos de la Figura 24 y Figura 25.

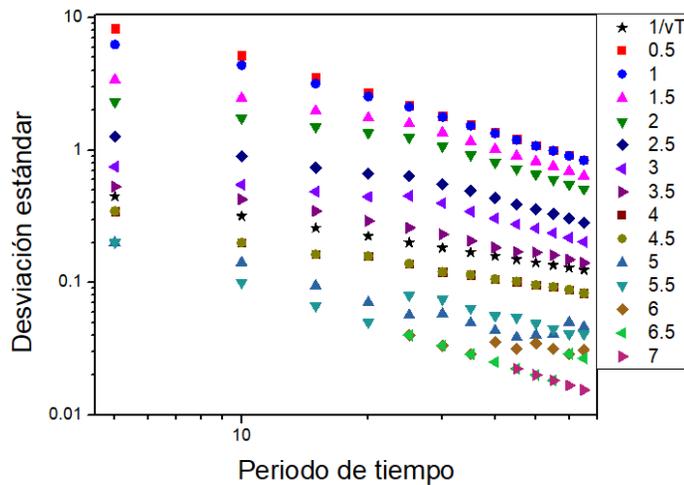


Figura 24. Grafico del periodo de tiempo vs Desviación estándar para Ms.

Tabla 21. Desviación estándar para cada periodo de tiempo y magnitud Mb.

Periodos	años	Magnitud Mb								
		1/√T	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
			$\sigma\lambda$							
2015-2019	5	0,447	10,316	1,562	0,529	0,529	0	0,200	0	0
2010-2019	10	0,316	6,887	1,195	0,331	0,387	0,100	0,100	0	0
2005-2019	15	0,258	5,012	1,101	0,290	0,290	0,094	0,094	0	0
2000-2019	20	0,223	4,030	1,035	0,259	0,234	0,070	0,070	0	0
1995-2019	25	0,200	3,408	1,009	0,243	0,195	0,056	0,080	0,040	0,056
1990-2019	30	0,182	2,875	0,867	0,233	0,179	0,057	0,081	0,033	0,047
1985-2019	35	0,169	2,464	0,754	0,217	0,171	0,063	0,069	0,028	0,040
1980-2019	40	0,158	2,157	0,662	0,201	0,156	0,066	0,066	0,025	0,035
1975-2019	45	0,149	1,920	0,593	0,188	0,150	0,070	0,066	0,031	0,031
1970-2019	50	0,141	1,732	0,541	0,181	0,154	0,072	0,066	0,034	0,028
1965-2019	55	0,134	1,580	0,497	0,177	0,147	0,072	0,062	0,031	0,025
1960-2019	60	0,129	1,448	0,457	0,167	0,138	0,068	0,066	0,037	0,023
1955-2019	65	0,124	1,337	0,423	0,156	0,131	0,065	0,063	0,037	0,021

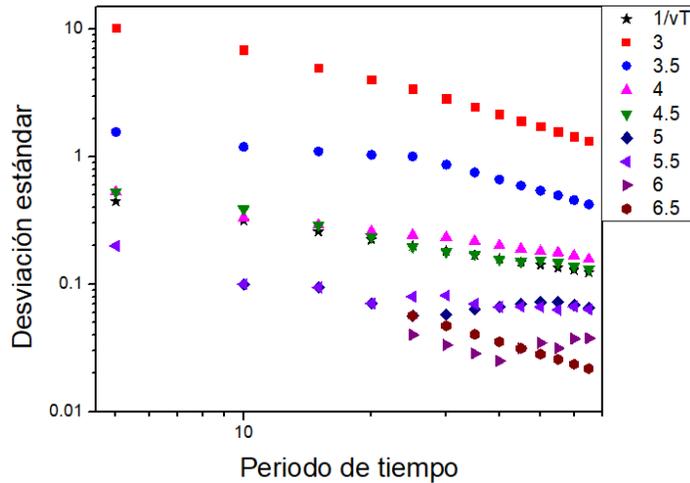


Figura 25. Gráfico del periodo de tiempo vs Desviación estándar para Mb.

Luego, partiendo de la Figura 24 y la Figura 25, se procedió a realizar la comparación visual. Aplicando la metodología propuesta en este trabajo, se establecieron la Tabla 22 y la

Tabla 23, obteniéndose sus respectivos gráficos (Figura 26 y Figura 27), además, se calculó el valor de la tasa media de ocurrencia (λ (promedio)) y el número de eventos en el año (N), aplicando la ley de Gutenberg-Richter.

Para la magnitud $M_s=5,5$ fue necesario realizar un promedio entre las magnitudes $M_s=5$ y $M_s=6$ para hallar el promedio de la desviación estándar, número acumulativo de sismos en un periodo de tiempo N y $\log N$, determinando a esta magnitud con un periodo de completitud incierta, debido a que, la magnitud $M_s=5,5$, no obedece a la lógica que hay en la geología, la cual consiste en que, a mayores magnitudes, menor cantidad de sismos ocurren. Con el restante de las magnitudes y periodos de tiempo, en la Tabla 22 se puede observar el cumplimiento de dicha premisa, por ejemplo, en la magnitud $M_s=0,5$ en un intervalo de tiempo en completitud de 5 años, la tasa media de ocurrencia es mayor que la de la magnitud $M_s=1$, con un intervalo de completitud de 5 años, por lo que consecuentemente el número de eventos también disminuye.

Tabla 22. Intervalos de tiempo que se encuentran en completitud para la magnitud Ms aplicando el método de Stepp.

Clases de magnitud	Intervalo de periodos	Años	λ (promedio)	Número de eventos	Log N
0,5	50-55	5	57,1354	3713,80	3,569
1	50-55	5	55,7900	3626,35	3,559
1,5	40-45	5	39,0819	2540,32	3,404
2	15-20	5	35,0750	2279,87	3,357
2,5	5-15	10	8,0444	522,88	2,718
3	45-50	5	3,3511	217,82	2,338
3,5	10-15	5	1,8000	117	2,068
4	55-60	5	0,4696	30,53	1,484
4,5	20-25	5	0,1550	10,07	1,003
5	60-65	5	0,1442	9,37	0,971
5,5	??	??	0,1007	6,54	0,816
6	50-55	5	0,0572	3,72	0,570
6,5	50-55	5	0,0190	1,24	0,093
7	60-65	5	0,0160	1,04	0,017

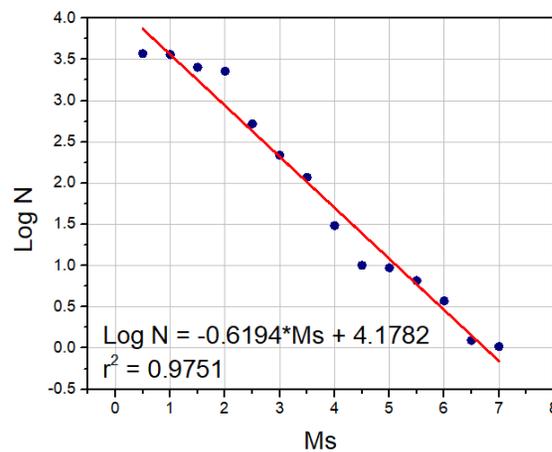


Figura 26. Gráfico de la Magnitud Ms vs Log N.

Tabla 23. Intervalos de tiempo que se encuentran en completitud para la magnitud Mb aplicando el método de Stepp.

Clases de magnitud	Intervalo de periodos	Años	λ (promedio)	Numero de eventos	Log N
3	60-65	5	121,1372	7873,91	3,896
3,5	40-45	5	16,7083	1086,04	3,035
4	40-45	10	1,6125	104,81	2,020
4,5	50-55	5	1,2000	78	1,892
5	60-65	5	0,2801	18,20	1,260
5,5	60-65	5	0,2641	17,16	1,234
6	50-55	5	0,0572	3,72	0,570

6,5	55-60	5	0,0348	2,26	0,355
-----	-------	---	--------	------	-------

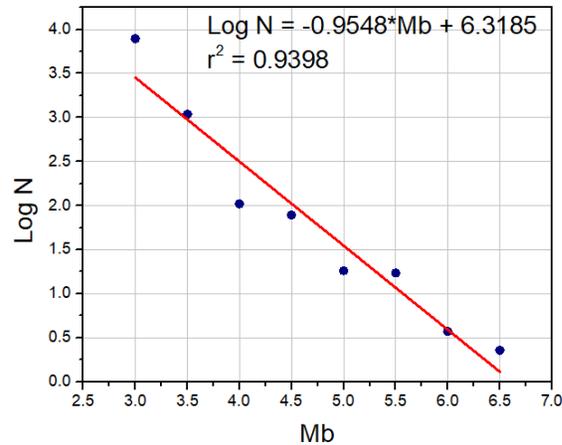


Figura 27. Gráfico de la Magnitud Mb vs Log N.

7.4.1 Periodo de retorno calculado para las magnitudes Mb y Ms para la región del Eje Cafetero

Teniendo las ecuaciones de la Figura 26 y Figura 27, $\text{Log } N = -0,6194M_s + 4,1782$ y $\text{Log } N = -0,9548M_b + 6,3185$ respectivamente, cuyos coeficientes de correlación son muy cercanos a 1, con $R^2 > 0,93$, evidenciando así una alta correlatividad de los datos, se calculó el periodo de retorno (T) para las magnitudes Ms y Mb, empelando la ecuación 13 y 14, llegando a los resultados reportados en la Tabla 24 para Ms y la Tabla 25 para Mb.

Tabla 24. Períodos de retorno para las Magnitudes Ms en la región del Eje Cafetero aplicando el método de Stepp.

Magnitud Ms	$\text{Log } N = a - b * M_s$	N	$T=1/N$	Periodo de retorno (años)	Periodo de retorno (días)
0,5	3,8685	7387,5426	0,0001	0,008	3,21
1	3,5588	3620,7621	0,0002	0,017	6,55
1,5	3,2491	1774,5980	0,0005	0,036	13,36
2	2,9394	869,7611	0,0011	0,074	27,27
2,5	2,6297	426,2849	0,0023	0,152	55,65
3	2,3200	208,9296	0,0047	0,311	113,55
3,5	2,0103	102,4000	0,0097	0,634	231,68
4	1,7006	50,1880	0,0199	1,295	472,72

4,5	1,3909	24,5980	0,0406	2,642	964,50
5	1,0812	12,0559	0,0829	5,391	1967,91
5,5	0,7715	5,9088	0,1692	11,000	4015,19
6	0,4618	2,8960	0,3453	22,444	8192,30
6,5	0,1521	1,4193	0,7045	45,794	16714,99
7	-0,1576	0,6956	1,4374	93,435	34104,07

Tabla 25. Períodos de retorno para las Magnitudes Mb en la región del Eje Cafetero aplicando el método de Stepp.

Magnitud Mb	$\text{Log } N = a - b * Mb$	N	$T=1/N$	Periodo de retorno (años)	Periodo de retorno (días)
3	3,4541	2845,1161	0,0003	0,022	8,33
3,5	2,9767	947,7635	0,0010	0,068	25,03
4	2,4993	315,7184	0,0031	0,205	75,14
4,5	2,0219	105,1719	0,0095	0,618	225,58
5	1,5445	35,0348	0,0285	1,855	677,18
5,5	1,0671	11,6707	0,0856	5,569	2032,85
6	0,5897	3,8877	0,2572	16,719	6102,47
6,5	0,1123	1,2950	0,7721	50,189	18319,18
7	-0,3651	0,4314	2,3179	150,665	54992,84

A partir de los registros en la Tabla 24 y la Tabla 25 se puede notar la diferencia en los periodos de retorno que hay entre los sismos de baja magnitud y alta magnitud. Por ejemplo, un sismo de magnitud $M_s=0,5$ ocurre, según los cálculos, cada 3,2 días aproximadamente, y un sismo de magnitud $M_s=7$ sucede cada 93,4 años aproximadamente, siendo muy poco probable la ocurrencia de estos durante un periodo de tiempo menor.

Haciendo uso de los valores de a y b (según la forma dada en la ecuación 9) de las ecuaciones de los gráficos de la Figura 26 y la Figura 27, se calculó la Magnitud máxima probable M_{\max} , empleando la ecuación 10, de modo que para la región del Eje Cafetero se determinó una $M_{\max}=6,7456$ para la magnitud M_s y $M_{\max}=6,6176$ para la magnitud M_b .

7.5 Resultados al aplicar el método de Stepp mediante el ajuste potencial

Continuando con la aplicación de la metodología, con los datos registrados en la Tabla 20 y en la Tabla 21, se confeccionó un gráfico ‘Años vs Desviación estándar’ para las magnitudes M_s (Figura 28) y M_b (Figura 29), calculando el valor de R^2 para cada intervalo de tiempo y magnitud correspondiente, registrando dichos resultados en la Tabla 26 y la Tabla 27.

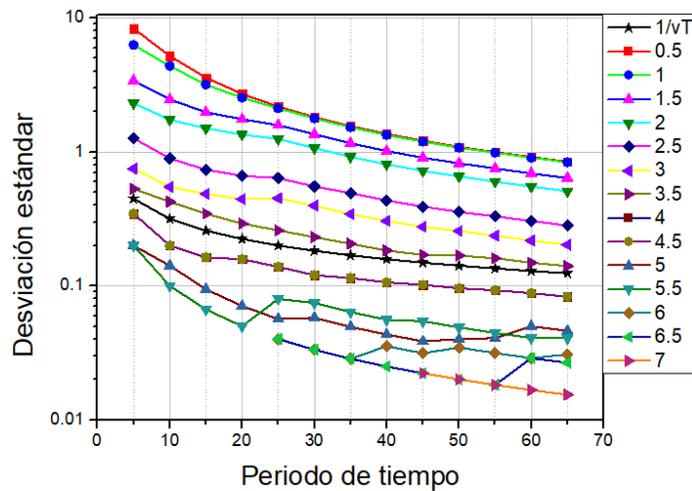


Figura 28. Gráfico de Años vs Desviación estándar para las magnitudes M_s antes del ajuste potencial.

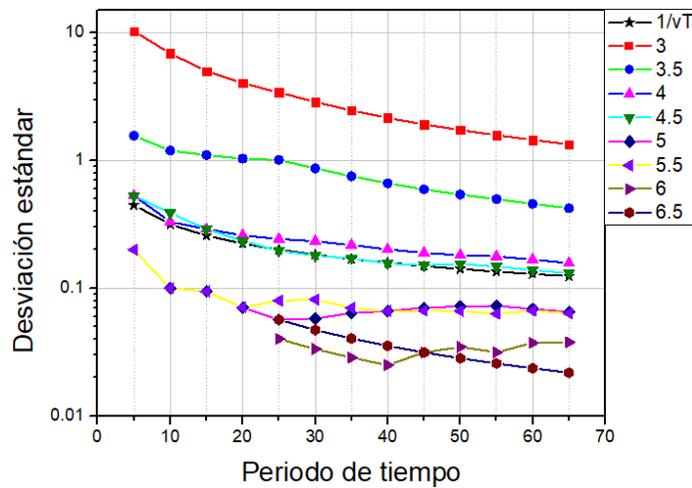


Figura 29. Gráfico de Años vs Desviación estándar para las magnitudes M_b antes del ajuste potencial.

Tabla 26. R^2 para los intervalos de magnitudes Ms sin el ajuste potencial.

Intervalo Ms	R^2
$1/\sqrt{T}$	1
0,5	0,9958
1	0,9882
1,5	0,9667
2	0,9448
2,5	0,9664
3	0,9345
3,5	0,9856
4	0,9851
4,5	0,9851
5	0,9182
5,5	0,8185
6	0,3498
6,5	0,4491
7	1

Tabla 27. R^2 para los intervalos de magnitudes Mb sin el ajuste potencial.

Intervalo Mb	R^2
$1/\sqrt{T}$	
3	0,9902
3,5	0,9063
4	0,9844
4,5	0,9820
5	0,3312
5,5	0,7267
6	0,0065
6,5	1

Los R^2 reportados en la Tabla 26 y Tabla 27, son valores lejanos a 1, siendo el propósito de aplicar el ajuste potencial, corregirlos de tal manera que sean mayores o iguales a 0,99. Por lo tanto, se procede a la aplicación del método eliminando puntos, como anteriormente se expuso. En la Figura 30 y la Figura 31 se puede apreciar el resultado posterior al proceso de eliminación para la magnitud Mb y Ms respectivamente, así mismo, en la Tabla 28 y Tabla 29 se consignan los valores de R^2 recalculados.

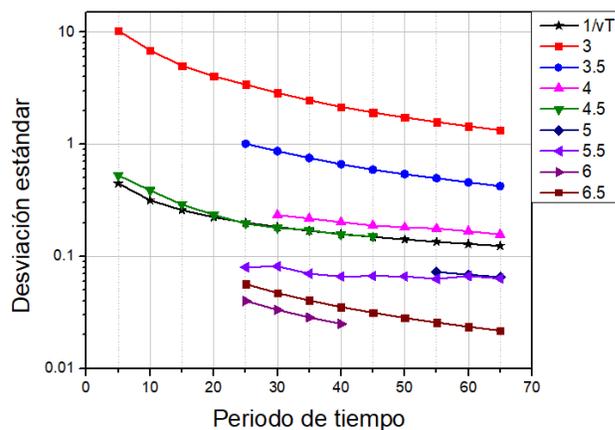


Figura 30. Gráfico de Años vs Desviación estándar para las magnitudes Mb después de aplicar el ajuste potencial.

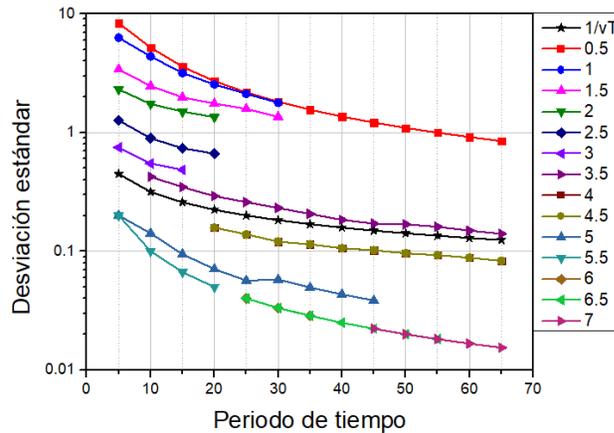


Figura 31. Gráfico de Años vs Desviación estándar para las magnitudes Ms después de aplicar el ajuste potencial.

Tabla 28. R² para los intervalos de magnitudes Ms con el ajuste potencial.

Intervalo Ms	R ²	R ² corregidos
1/√T	1	n.a
0,5	0,9958	n.a
1	0,9882	0,9888
1,5	0,9667	0,9948
2	0,9448	0,9991
2,5	0,9664	0,9972
3	0,9345	0,9901
3,5	0,9856	0,9958
4	0,9851	0,9919
4,5	0,9851	0,9919
5	0,9182	0,9855
5,5	0,8185	1,0000
6	0,3498	1
6,5	0,4491	1,0000
7	1	1

Tabla 29. R² para los intervalos de magnitudes Ms con el ajuste potencial.

Intervalo Mb	R ²	R ² corregidos
1/√T		
3	0,9902	0,9902
3,5	0,9063	0,9997
4	0,9844	0,9907
4,5	0,9820	0,9914
5	0,3312	1
5,5	0,7267	0,7843
6	0,0065	1
6,5	1	1

Al momento de eliminar los puntos de las de las Figura 28 y Figura 29, los intervalos de magnitud Mb igual a 3,5, 4,5 y 5,5 y los intervalos de magnitud Ms 3,5, 4 y 4,5 no se pueden eliminar siguiendo el sentido propuesto en la metodología, por lo tanto, estos se eliminan en el sentido contrario, desde lo más reciente a lo más antiguo, debido a que de esta forma se logra el mínimo alejamiento de un R² ideal. Luego de eliminar y ajustar los valores de R²,

se obtuvo los años de completitud para todos los intervalos de magnitud Ms (Tabla 30) y magnitud Mb (Tabla 31).

Tabla 30. Intervalos de completitud determinados para la magnitud Ms.

Intervalos de Magnitud Ms	Años de Completitud
0,5	1954-2019
1	1990-2019
1,5	1990-2019
2	2000-2019
2,5	2000-2019
3	2005-2019
3,5	1954-2015
4	1954-2005
4,5	1954-2005
5	1975-2019
5,5	2000-2019
6	1985-2019
6,5	1965-2019
7	1954-2019

Tabla 31. Intervalos de completitud determinados para la magnitud Mb.

Intervalos de Magnitud Mb	Años de Completitud
3	1954-2019
3,5	1954-1995
4	1954-1990
4,5	1975-2019
5	1954-1965
5,5	1954-1995
6	1980-2019
6,5	1954-2019

Posteriormente, se procede al cálculo del valor de la tasa media de ocurrencia (λ (promedio)) y el número de eventos en el año N, esto aplicando la ley de Gutenberg-Richter, siguiendo la metodología que se enuncia en el método de Stepp, obteniéndose los valores de la Tabla 32 y la Figura 32 para todas las clases de magnitud Ms y la Tabla 33 y Figura 33 para todas las clases de magnitud Mb.

Tabla 32. Cálculo del promedio de la tasa media de ocurrencia, numero de eventos y Log N para el ajuste potencial al método de Stepp correspondiente a la magnitud Ms.

Clases de magnitud Ms	Intervalo de periodos	λ (promedio)	Numero de eventos	Log N
0,5	5,0-65	123,459	8024,88	3,904
1	5,0-30	146,071	9494,62	3,977
1,5	5,0-30	68,136	4428,84	3,646
2	5,0-20	22,562	1466,56	3,166
2,5	5,0-20	8,983	583,91	2,766

3	5,0-20	3,016	196,08	2,292
3,5	10,0-65	1,679	109,15	2,038
4	20-65	0,538	35,02	1,544
4,5	20-65	0,211	13,77	1,138
5	20-45	0,090	5,86	0,768
5,5	5,0-20	0,104	6,77	0,830
6	5,0-35	0,014	0,94	-
6,5	5,0-55	0,017	1,10	0,044
7	5,0-65	0,007	0,46	-

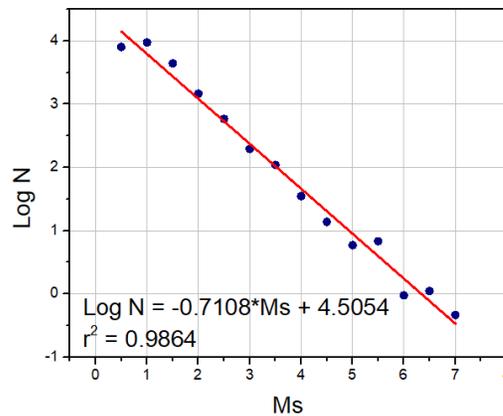


Figura 32. Gráfico Ms vs Log N para el ajuste potencial al método de Stepp correspondiente a la magnitud Ms.

Tabla 33. Cálculo del promedio de la tasa media de ocurrencia, número de eventos y Log N para el ajuste potencial al método de Stepp correspondiente a la magnitud Mb.

Clases de magnitud Mb	Intervalo de periodos	λ (promedio)	Numero de eventos	Log N
3	5,0-65	163,845	10649,96	4,027
3,5	25-65	18,691	1214,94	3,084
4	30-65	1,668	108,43	2,035
4,5	5,0-45	1,072	69,71	1,843
5	55-65	0,283	18,44	1,265
5,5	25-65	0,183	11,94	1,077
6	5,0-40	0,015	1,03	0,013
6,5	5,0-65	0,038	2,51	0,400

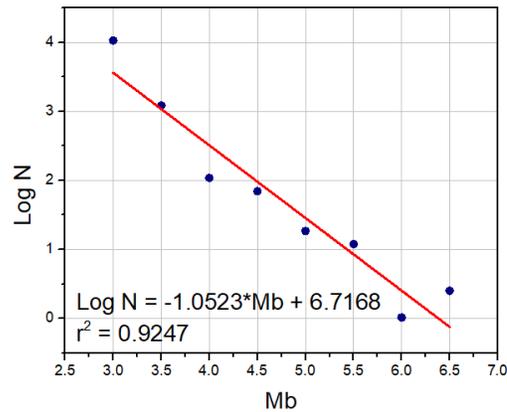


Figura 33. Gráfico Mb vs Log N para el ajuste potencial al método de Stepp correspondiente a la magnitud Mb.

Con base a la ecuación $Log N = -0,7108Ms + 4,5054$, proveniente de la Figura 32 y la ecuación $Log N = -1,0523Mb + 6,7168$ de la Figura 33, se realizó el cálculo del periodo de retorno para el Eje Cafetero mediante el ajuste potencial al método de Stepp, como puede observarse en la Tabla 34 y Tabla 35.

Tabla 34. Períodos de retorno para las Magnitudes Ms calculadas a partir del ajuste potencial al método de Stepp en la región del Eje Cafetero.

Magnitud Ms	log N= a-b*Ms	N	T=1/N	Periodo de retorno (años)	Periodo de retorno (días)
0,5	4,15	14125,375	7,07946E-05	0,0046	109,17
1	3,79	6231,606	0,0001	0,01	247,46
1,5	3,43	2749,159	0,0003	0,02	560,94
2	3,08	1212,830	0,0008	0,05	1271,50
2,5	2,72	535,056	0,0018	0,12	2882,16
3	2,37	236,047	0,0042	0,27	6533,10
3,5	2,01	104,135	0,0096	0,62	14808,79
4	1,66	45,940	0,0217	1,41	33567,54
4,5	1,30	20,267	0,0493	3,20	76088,59
5	0,95	8,941	0,1118	7,26	172472,38
5,5	0,59	3,944	0,2535	16,47	390948,52
6	0,24	1,740	0,5746	37,35	886175,17
6,5	-0,11	0,767	1,3025	84,66	2008720,81
7	-0,47	0,338	2,9525	191,91	4553229,89

Tabla 35. Períodos de retorno para las Magnitudes Mb calculadas a partir del ajuste potencial al método de Stepp en la región del Eje Cafetero.

Magnitud Mb	$\log N = a - b \cdot M_s$	N	$T = 1/N$	Periodo de retorno (años)	Periodo de retorno (días)
3	3,55	3629,944	0,0002	0,01	6,53
3,5	3,03	1080,811	0,0009	0,06	21,95
4	2,50	321,810	0,0031	0,20	73,72
4,5	1,98	95,818	0,0104	0,67	247,60
5	1,45	28,529	0,0350	2,27	831,58
5,5	0,92	8,494	0,1177	7,65	2792,90
6	0,40	2,529	0,3953	25,69	9380,07
6,5	-0,12	0,753	1,3278	86,31	31503,31

Al emplear la ecuación 10, la magnitud máxima probable obtenida por el ajuste potencial, para el área en estudio es $M_{\max} = 6,3385$ para la magnitud Ms y $M_{\max} = 6,3830$ para la magnitud Mb.

En resumen, se procede a elaborar la Tabla 36 recopilando los distintos resultados obtenidos para la magnitud máxima probable por medio de los métodos empleados, esto para contar con una mejor visualización y compresión.

Tabla 36: tabla que resume los resultados obtenidos para la magnitud máxima probable empleando los métodos propuestos en el actual trabajo

	M_{\max}	
	Ms	Mb
Relación de Gutenberg-Richter	8,0201	7,1923
Método de Stepp	6,7456	6,6176
Método del ajuste potencial al método de Stepp	6,3385	6,3830

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

- Es evidente, cómo al aplicar la ley de Gutenberg-Richter dan valores más elevados, con diferencias de hasta 1 unidad, por lo que el empleo de los métodos se vuelve necesario para obtener resultados más reales y confiables. Nótese la poca diferencia que hay entre los resultados obtenidos por el método de Stepp y el ajuste potencial.
- La magnitud máxima contemplada en $M_s=7$ en el ajuste potencial del método de Stepp tienen un periodo de retorno de 191 años y para $M_b=6,5$ tienen un periodo de retorno de 86,3 años, siendo poco probable eventos sísmicos de estas magnitudes durante periodos de tiempo más cortos y con mayor periodicidad.
- Al analizar el catálogo sísmico completo se puede definir un aumento de los sismos reportados por las distintas agencias y esto se debe a distintos factores como el avance de la tecnología que permite mayor sensibilidad, las nuevas instalaciones de estaciones y la instauración de la RSNC. Se puede apreciar que, desde el 2010 al 2019 casi todos los sismos son reportados por la RSNC.
- Los resultados obtenidos por el método de Stepp están sujetos a la interpretación y subjetividad del investigador, por eso resulta más conveniente emplear un ajuste potencial que ayude a que los resultados se acerquen un poco más a la realidad, notándose la diferencia en los distintos cálculos realizados a partir de los dos métodos mencionados anteriormente.
- Al comparar los periodos tomados en completitud por el método de Stepp y por los del ajuste potencial, se puede notar una diferencia en tiempo, debido a que al aplicarle el ajuste potencial al método abarca mayores periodos de tiempo, por lo tanto, se puede concluir que el método original excluye ciertos periodos de tiempo, dejando por fuera de los posteriores cálculos datos de importancia o relevancia.

- Como se puede observar en el análisis de la sismicidad histórica, la región del Eje Cafetero está influenciada por la dinámica de placas y consecuentemente la subducción cuyos sismos presentan epicentros mayoritariamente al occidente y los sismos asociados a fallas se presentan a nivel más general. A partir de esto se puede concluir que esta región en estudio tiene distintas características geoestructurales y geodinámicas.
- Se puede concluir al observar el mapa de distribución de epicentros, 4 zonas que presentan una mayor densidad, las cuales están asociadas a grandes juegos de fallas que afectan a la región y en menor parte (mayoritariamente al occidente) a la subducción. Este dato es de suma importancia para realizar una zonificación de riesgos sísmicos en la región.
- A partir de los mapas en tercera dimensión, donde se presenta la distribución de los focos sísmicos en profundidad, se logra visualizar cierta alineación de los hipocentros según el sentido de las distintas fallas importantes, y así mismo, se establece su relación con el tren tectónico de la región.
- Con base en los mapas representados en tercera dimensión y a partir de su respectivo análisis, es posible deducir que los sectores que no presentan gran actividad sísmica a lo largo del periodo de tiempo que ha sido comprendido en el presente estudio, pueden considerarse como sectores en los cuales podría ocurrir un sismo con la magnitud máxima probable obtenida por los métodos empleados, lo cual se debe a la posible gran acumulación de energía y así mismo, a su probable liberación.
- La incertidumbre y heterogeneidad que poseen los catálogos sísmicos se deben a distintos factores, y entre ellos, uno importante es el comportamiento de las redes sísmicas que aportan los datos. Por ello, y a través de los procedimientos presentados en el presente trabajo, se puede generar una relativa homogeneidad a la caracterización sísmica del Eje Cafetero.

8.2 Recomendaciones

- Debido a que el actual trabajo tiene aplicaciones no solo en el campo científico sino también en lo social, con las importantes implicancias que ello conlleva, sería útil e

interesante, mantener actualizados los datos permanentemente, y así disponer de una base de información ajustada a la realidad.

- Se recomienda al campo de la geotecnia, ingeniería, y demás ramas asociadas a la planificación y construcción de obras, tomar en cuenta los periodos de retorno, tasa de ocurrencia, ubicación de los sectores con mayor densidad de epicentros, magnitudes máximas probables, etc., de las distintas magnitudes calculadas.
- Las metodologías propuestas en esta investigación pueden ser replicadas en otros lugares de interés con la consecuente aplicación al marco geológico de dichas áreas.
- A partir de los resultados y posterior análisis del presente trabajo, sería sugerible utilizarlos como una base destinada a una zonificación de riesgos sísmicos, para su aplicación en todos los ámbitos y aspectos que resultaran de interés.

Bibliografía

- Aki, K., & Richards, P. G. (1980). *Quantitative seismology: Vol. II* (E. Jane (ed.); 2nd ed.). university science books.
- Arroyo, M., Godínez, K., & Linkimer, L. (2017). Completitud del catálogo de la red sismológica nacional de Costa Rica durante 1975-2014. *Boletín de Geología*, 39(3), 87–98.
- Bacchini, R. D., Vázquez, L. V., Bianco, M. J., & García Fronti, J. I. (2018). *Introducción a la probabilidad y a la estadística*. Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Buenos Aires.
- Balanta, R., Medina, E., Medina, M., Ibañez, D., Castro, E., Carrillo, E., Cuellar, M., Leyva, O., Perez, R., & Ortegón, C. (2008). Prevención de desastres glacio-volcánicos e hidrometeorológicos en las cuencas de los ríos Combeima y Páez, Cordillera Central, Colombia (Departamentos de Tolima, Cauca y Huila). *Ingeominas*, 50.
- Ben-Menahem, A. (2009). *Historical encyclopedia of natural and mathematical sciences* (C. Witschel (ed.); 1st ed.). Springer Books.
- Bolt, B. ., Macdonald, G. ., Scott, R. ., & Horn, W. . (1975). *Geological Hazards*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Caballero, H., & Zapata, G. (1984). Geología y geoquímica de la plancha 224 Pereira. *Ingeominas*.
- Calle, B., & González, H. (1982). Geología y Geoquímica de la Plancha 186 Riosucio. *Ingeominas Informe 1878. Medellín., I*, 119.
- Caneva, A., Salcedo Hurtado, J., Van Hissenhoven, R., & Alfaro Castillo, A. J. (2004).

- Estudio De Sisimicidad Regional Para El Analisis De La Amenaza Sismica Para Bogota. *Estudio De Sisimicidad Regional Para El Analisis De La Amenaza Sismica Para Bogota*, 26.
- Court, W. J. M., Mosquera, D., Nivia, A., & Nuñez, A. (1985). Reseña explicativa del mapa geológico preliminar Plancha 243 Armenia. *Ingeominas*, 16.
- DeMets, C. (2001). A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implications for slip along the Central American volcanic arc. *Geophysical Research Letters*, 28(21), 4043–4046.
- Duque-Escobar, G. (2019). *Manual de geología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia.
- Estrada, J. J., Viana, R., & González, H. (2001). Geología de la Plancha 205 Chinchiná, Escala 1:100000, Memoria Explicativa. *Ingeominas*, 90.
- Ferreira, P., Núñez, A., & Rodríguez, M. Á. (2002). Levantamiento geológico de la plancha 323, Neiva. *Ingeominas*, 100.
- Fisher, R. (1971). The design of experiments. *Hafner Publishing Company*.
- Galeano, A. F., & Ramirez, M. C. (2015). *Compleitud catálogo sísmico y evaluación de la magnitud máxima probable de sismos para el área del Eje Cafetero, periodo 1805-2013*. Universidad de Caldas.
- Giner-Robles, J. ., Peres-Lopez, R., Marinez-Diaz, J. ., Rodriguez-Pacua, M. ., & Gonzales-Casado, J. . (2008). Modelo cinemático actual de la Placa Caribe en la confluencia con la Placa Norteamericana y la Placa de Cocos . *Geo-Temas*, 10, 349–352.
- Gonzales, H. (1989). *Analisis de la nomenclatura estátigráfica de las rocas metamórficas (Litodema A), al este del limite oriental de la zona de la Falla Romeral, Cordillera Central, Colombia*. 21.
- González, H. (2001). Geología de las Planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruíz Escala 1:100.000 Memoria Explicativa. *Ingeominas*, 93.

- Guerrero-Peña, A., & Díaz-Londoño, G. M. (2007). *Introducción de errores en la medición* (Instituto).
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1956). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration: (Second paper). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46(2), 105–145.
- Hammen, T. V. (1960). Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano Continentales y Tectogénesis de los Andes Colombianos. *Boletín Geológico - SGC*, VI(1–3), 67–128.
- Kammer, A. (1993). *Las Fallas de Romeral y su Relación con la Tectónica de la Cordillera Central*. 18.
- Kanamori, H. (1983). *Magnitude scale and quantification of earthquakes* (pp. 185–199). Elsevier Scientific Publishing Company.
- Kellogg, J. N., & Bonini, W. E. (1982). Subduction of the Caribbean Plate and basement uplifts in the overriding South American Plate. *Tectonics*, 1(3), 251–276.
- Lonsdale, P., & Klitgord, K. D. (1978). Structure and tectonic history of the eastern Panama Basin. *Bulletin of the Geological Society of America*, 89(7), 981–999.
- López, C., & Muñoz, D. (2003). Fórmulas de magnitud en los boletines y catálogos españoles. *Física de La Tierra*, 15, 49–71.
- Lopez, J., & Zuluaga, C. (2012). Nis de Macuira: Evolución tectónica de las rocas metamórficas paleozoicas de la Alta Guajira, Colombia. *Boletín de Geología - UIS*, 34(45), 15–36.
- Manrique Escobar, J. C. (2019). *Análisis de completitud sísmica y magnitud máxima probable para el Departamento de Caldas y zonas aledañas entre el periodo 1824-2018*. Universidad de Caldas.
- Mc Court, W. ., & Feininger, T. (1984). High pressure metamorphic rocks in the Central Cordillera of Colombia. *British Geological Survey*, 84, 28–35.

- Molina, S., Giner, J., & Jáuregui, P. (2004). El tamaño de los terremotos. Intensidad y magnitud. *Sismología e Ingeniería Sísmica. Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 12, 99–107.
- Monsalve, H., & Mora, H. (2005). Esquema geodinámico regional para el noroccidente de sudamérica (modelo de subducción y desplazamientos relativos). *Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander*, 27(1), 25–35.
- Montes, C., Guzman, G., Bayona, G., Cardona, A., Valencia, V., & Jaramillo, C. (2010). Clockwise rotation of the Santa Marta massif and simultaneous Paleogene to Neogene deformation of the Plato-San Jorge and Cesar-Ranchería basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(4), 832–848.
- Mosquera, D. (1978). Geología del Cuadrángulo K-8. *Ingeominas*, 63.
- Orrego, A., Espinosa, A., Vergara, H., & Cepeda, H. (1989). Boletín geológico. *Ingeominas*, 30(1), 113.
- Paris, G., & Romero Leon, J. (1994). Fallas activas en Colombia. *Boletín Geológico Ingeominas*, 34(2–3), 3–25.
- Parra, E. (1983). *Geología de la Plancha 223 El Cairo*. 138.
- Parra, E., & Salazar, G. (1999). *Geología de la Plancha 185 Bagadó. Memoria Explicativa*. 53.
- Pelaez, J. A. (2011). Fundamentos Conceptuales y Didácticos Sobre las escalas de magnitud. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 2011, 39–47.
- Ramírez, J. E. (1975). Historia de los terremotos en Colombia. In *Igac* (2nd ed.). Instituto Geografico Agustín Codazzi.
- Robles Avalos, J. C. (2017). *Desplazamiento permanente y dinámico generado por el temblor El Mayor-Cucapah Mw 7.2, utilizando GPS*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

-
- Sáez Ruiz, S., & Font Avila, L. (2001). Incertidumbre de la Medición: Teoría y Práctica. *L&S Consultores CA, 1*, 88.
- Sanchez, F. (2001). *Los Terremotos Y Sus Causas* (p. 38). Instituto Andaaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos.
- Stepp, J. C. (1972). Analysis of Completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area and Its Effect on Statistical Estimates of Earthquake Hazard. *International Conference on Microzonification, 1*, 897–910.
- Tapias, J. G., Emma, N., & Ramírez, M. (2015). Mapa geológico de Colombia. *Servicio Geológico Colombiano, 2*.
- Tusell, F. (2011). *Análisis de Regresión. Introducción Teórica y Práctica basada en R* (1st ed.).
- Zapata, G. (2001). Geología y Geoquímica de la Plancha 204 Pueblo Rico. Memoria Explicativa. *Servicio Geológico Colombiano, 63*.