

Caracterización de los umbrales de lluvia y sismo que detonan movimientos en masa para los sectores hidrográficos, quebradas Panamá y el León, pertenecientes al municipio de San Joaquín, Santander.

**Laura Juliana Cristancho Hernández
Valentina Galvis Cobos**

Trabajo de grado para optar por el título de geólogas

Director

**Joaquín Andrés Valencia Ortiz
PhD. en Geología**

Codirector

**Leonardo Palmera Sánchez
Ms. C. en Geociencias**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga
2025**

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi mamá, la persona que siempre estuvo a mi lado dándome su apoyo incondicional, escuchándome y aguatándome en cada etapa de este proceso. Durante todos estos años ha estado a mi lado bríndame su consejo y haciéndome saber que siempre podría contar con ella sin importar lo que pase. Su amor, paciencia y dedicación han sido mi mayor impulso para llegar hasta aquí y a ser quien soy hoy.

Gracias a mis tres amores perrunos (Puppy, Dante y Chispita) y a su cariño incondicional nunca me he sentido sola. Gracias por acompañarme en cada noche de desvelo, por escucharme y siempre haberme hecho sentir querida. Entre ellos quisiera agradecer especialmente a Puppy quien me ha acompañado durante 15 años en cada momento de tristeza y alegría.

Quiero agradecer de corazón a mi tita, por su cuidado incondicional, por acompañarme y guiarme en cada etapa de mi vida académica. Su paciencia, amor y compañía han sido un apoyo invaluable en este camino.

Además, quiero agradecer a mi padre, quien en estos últimos años ha buscado acercarse a mí, brindándome su apoyo y demostrando su interés en estar presente mi vida.

Laura Cristancho

A mi amor de cuatro patas, mi Manchitas, mi pequeña compañera incondicional, cuyos ojitos negros me brindaron la fortaleza necesaria para avanzar.

A mis padres y a mi hermana, por estar siempre conmigo, por su amor infinito y creer siempre en mí.

A mis queridos abuelos, que siempre velaron y cuidaron de mí. Por apoyarme en cada una de las etapas de mi vida y recordarme mi valor como persona.

A mis primas, quienes siempre fueron mis amigas y confidentes, por ser un refugio y brindarme compañía.

Valentina Galvis

Este proyecto también se los dedicamos a nuestros directores, Joaquín y Leonardo, quienes nos guiaron en cada parte del trabajo y nos aconsejaron. Su constante paciencia fue fundamental para alcanzar nuestros objetivos.

Laura Cristancho & Valentina Galvis

Agradecimientos

Agradecemos profundamente a los compañeros de la asignatura de Campo III por el apoyo brindado en cada uno de los días de campo, en la toma de datos, por lo insumos y la ayuda prestada, sus esfuerzos en conjunto hicieron posible la culminación de este trabajo de grado. Por el tiempo compartido y las noches de películas de terror después de una larga jornada de toma de datos.

A la escuela de Geología por la apertura de la asignatura de Campo III, cuyo desarrollo constituyó un enriquecimiento en temas que nos ayudaron a comprender de manera más acorde el contexto de las amenazas geológicas en compañía de los profesores Joaquín Valencia y Leonardo Palmera.

A nuestro director, el profesor Joaquín Valencia, por su guía, orientación, confianza y tiempo dedicado, por compartirnos su experiencia y apoyarnos en todo momento que necesitábamos su orientación.

A Leonardo Palmera, nuestro codirector de tesis, por su asesoramiento y ayuda constante, por sus recomendaciones y compañía durante el trabajo de campo.

A la alcaldía de San Joaquín y a la comunidad por compartirnos su conocimiento acerca del territorio y darnos una calurosa acogida.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	10
1 Planteamiento del problema.....	11
2 Justificación	13
3 Objetivos	14
3.1 Objetivo General.....	14
3.2 Objetivos Específicos	14
4 Marco de referencia	15
4.1 Localización	15
4.2 Contexto Geológico.....	16
4.2.1 Geología Regional	17
4.2.2 Geología Estructural	20
5 Estado del Arte	21
6 Metodología	23
6.1 Fase pre-campo.....	23
6.2 Fase de campo.....	23
6.3 Fase post-campo	24
7 Resultados	28
7.1 Base de datos recolectada.....	28
7.1.1 Inventario de movimientos en masa	28
7.1.2 Registro de lluvias.....	29
7.1.3 Catalogo Sísmico	30
7.2 Caracterización del detonante lluvia.....	30
7.3 Caracterización Del Detonante Sismo.....	40
8 Discusión	45
9 Conclusiones	48
10 Recomendaciones	50
11 Referencias Bibliográficas	52

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Estaciones de Lluvia utilizadas para el relleno de datos _____	31
Tabla 2. Variación porcentual para lluvias mayores o iguales a 5mm en cada estación meteorológica. _____	32
Tabla 3. Variación porcentual para lluvia total de cada estación meteorológica. ____	32
Tabla 4. Variación porcentual para lluvia máxima de cada estación meteorológica. __	32
Tabla 5. Ajuste Chi cuadrado para las estaciones analizadas en el estudio. _____	35
Tabla 6. Precipitación máxima por LogNormal para Tr equivalentes a 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años. _____	39
Tabla 7. Cálculo de Tr para diferentes magnitudes de sismos. _____	41

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. _____	16
Figura 2. Mapa geológico adaptado al área de estudio. _____	17
Figura 3. Métodos estadísticos implementados en el proyecto _____	26
Figura 4. Esquema de metodología aplicada para el presente proyecto de investigación. _____	27
Figura 5. Clasificación de los MM registrados en campo. _____	29
Figura 6. Gráfica de variabilidad anual respecto a las parejas entre ambos periodos. _	33
Figura 7. Curva doble masa de la estación de San Joaquín. _____	34
Figura 8. Comportamiento de la lluvia máxima en 24 horas. _____	37
Figura 9. Gráfica de umbrales en relación con 2 y 15 días previos al evento. _____	39
Figura 10. Productividad sísmica. _____	40
Figura 11. Probabilidad de ocurrencia de sismos en años. _____	42
Figura 12. Distribución de Poisson. _____	43
Figura 13. Espectro de amenaza uniforme para el municipio de San Joaquín, Santander. _____	43
Figura 14. Mapa de amenaza de roca. _____	44
Figura 15. Temperatura promedio y percentiles de precipitación _____	46

Lista de Apéndices

	Pág.
<i>Apéndice A. Curvas doble masa</i> _____	56
<i>Apéndice B. Datos dudosos de la serie de lluvia.</i> _____	57
<i>Apéndice C. Mapas de Tr</i> _____	58
<i>Apéndice D. Análisis climático</i> _____	59
<i>Apéndice E. Pruebas de homogeneidad</i> _____	61
<i>Apéndice F. Prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado</i> _____	62
<i>Apéndice G. Recopilación de valores de Chi Cuadrado.</i> _____	69
<i>Apéndice H. Periodos de retorno.</i> _____	70

Resumen

Título: Caracterización de los umbrales de lluvia y sismo que detonan movimientos en masa para los sectores hidrográficos, quebradas Panamá y el León, pertenecientes al municipio de San Joaquín, Santander

Autor: Laura Juliana Cristancho Hernández, Valentina Galvis Cobos**

Palabras Clave: Umbrales de lluvia y sismo, detonantes, movimientos en masa, métodos paramétricos y no paramétricos, Ciudades y comunidades sostenibles y Acción por el Clima

Descripción: Los movimientos en masa (MM) constituyen una de las amenazas naturales más recurrentes a nivel global, capaces de generar pérdidas humanas, económicas y cambios en el entorno físico natural y/o antrópico. Los principales factores desencadenantes de origen natural de estos fenómenos son las lluvias y la actividad sísmica, lo que los convierte en un punto importante de análisis para determinar la ocurrencia espacio temporal de los MM, además de proporcionar un parámetro base en los planes de administración del territorio. Por ello, en el presente estudio, se caracterizan estos factores detonantes en dos sectores hidrográficos (La Quebrada Panamá y El León), ubicados al SE del departamento de Santander, en el municipio de San Joaquín. Para esta región se realiza un análisis y tratamiento estadístico mediante métodos paramétricos y no paramétricos a las series de tiempo de lluvias y registro de sismos, se correlaciona con el inventario de MM para cuantificar los umbrales de probabilidad de ocurrencia de un MM. Esta integración de datos permite establecer un umbral definido de 40.53 mm para lluvias acumuladas de 2 días previos al evento y de 205.72 mm para 15 días antecedentes, siendo los meses de abril y mayo los más propensos a superar este umbral, y se establece un tiempo de retorno (T_r) de 25 años para las lluvias máximas de 24 horas. Para el detonante de sismos, no se demuestra una influencia significativa entre los MM y los sismos ocurridos en el área de estudio, en el proyecto se determina que el periodo de tiempo más cercano entre un evento sísmico y un MM es de 59 días.

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Joaquín Andrés Valencia Ortiz PhD en Geología. Codirector: Leonardo Palmera Sánchez. Ms. C. en Geociencias.

Abstract

Title: Characterization of rainfall and earthquake thresholds that trigger mass movements for the hydrographic sectors, Panama and El León streams, belonging to the municipality of San Joaquín, Santander

Author: Laura Juliana Cristancho Hernández, Valentina Galvis Cobos

Key Words: Rainfall and earthquake thresholds, triggers, mass movements, parametric and non-parametric methods, Sustainable Cities and Communities and Climate Action.

Description: Mass movements (MM) are one of the most recurrent natural hazards globally, capable of causing human and economic losses, and changes in the natural and/or anthropogenic physical environment. The main natural triggers of these phenomena are rainfall and seismic activity, which makes them an important point of analysis for determining the spatial temporal occurrence of MM, as well as providing a baseline parameter for land management plans. Therefore, in this study, these triggering factors are characterized in two hydrographic sectors (*La Quebrada Panamá and El León*), located in the southeast of the department of Santander, in the municipality of San Joaquín. For this region, an analysis and statistical treatment is performed using parametric and non-parametric methods on the rainfall time series and earthquake records, which are correlated with the MM catalog to quantify the probability thresholds for the occurrence of an MM. This data integration allows a defined threshold of 40.53 mm to be established for accumulated rainfall in the two days prior to the event and 205.72 mm for the 15 days prior to the event, with April and May being the months most likely to exceed this threshold, and a return period (T_r) of 25 years is established for maximum 24-hour rainfall. For earthquake triggers, no significant influence between MM and earthquakes occurring in the study area has been demonstrated. The project determines that the closest time period between a seismic event and an MM is 59 days.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: Joaquín Andrés Valencia Ortiz PhD in Geology. Co-director: Leonardo Palmera Sánchez. Ms. C. in Geosciences.

Introducción

Los movimientos en masa (MM) constituyen una de las amenazas naturales más comunes y peligrosas, siendo capaces de causar un número considerable de muertes y pérdidas económicas significativas en todo el mundo. Estos fenómenos naturales, consisten en el desplazamiento de material (roca, detritos y lodo) a diferentes velocidades dependiendo de factores como litología, pendiente, cobertura vegetal, propiedades del suelo y geomorfología (Corominas, y otros, 2014). Para Colombia, específicamente en el caso de San Joaquín en el municipio de Santander, los MM han demostrado ser una amenaza latente para la seguridad y el bienestar de sus pobladores. Esto se ha evidenciado en la clasificación de amenaza para el área de Mogotes y San Joaquín donde se asignaron las categorías de amenaza alta y muy alta, donde los procesos morfodinámicos predominantes se asocian a deslizamientos y flujos (Castro & Ibañez, 2024). Estos procesos pueden ser desencadenados por lluvias y sismos, los cuales desestabilizan la capa superficial del suelo pudiendo crear afectaciones sobre entornos naturales y/o antrópicos (Keefer, 1984; Reichenbach, 1998).

Dentro de la planificación del territorio siempre existirán sectores expuestos a condiciones naturales que pueden afectar en mayores o menor medida los entornos antrópicos, por lo que es necesario tener en cuenta los factores desencadenantes de los MM como lo son la lluvia y los sismos. De esta manera es posible la definición de umbrales de probabilidad, en los que la lluvia y los sismos contribuyan a la ocurrencia de MM, y la construcción de planes de mitigación (Valencia Ortiz & Martínez Graña, 2023). Es así como el uso de umbrales se ha vuelto una herramienta clave para la reducción del riesgo, permitiendo responder a la pregunta de cuando ocurrirán los movimientos en masa, lo cual permitiría la toma de acciones preventivas y de mitigación con antelación que logren minimizar los impactos de estos eventos (Aristizábal, y otros, 2011). En este trabajo se busca cuantificar los umbrales de lluvia y sismo mediante métodos estadísticos paramétricos y no paramétricos, así como establecer las condiciones críticas relacionadas con los factores de lluvia y sismo y los periodos de retorno. Los resultados constituirán un insumo técnico de alto valor para las autoridades y organismos de gestión del riesgo, apoyando la toma de decisiones y facilitando la implementación de sistemas de alerta temprana y medidas de mitigación. De esta forma

la investigación no solo contribuye a conocimiento científico local, sino que reduce la exposición de la población.

1 Planteamiento del problema

A nivel global las amenazas geológicas consisten en una problemática primordial gracias a su capacidad para generar afectaciones en la calidad de vida de las personas e influir, usualmente, de forma negativa en la economía de un país. Ejemplo de ello es que entre los años 2000 y 2019, se reportaron 13,329 desastres, los cuales provocaron la pérdida de más de 1.5 millones de vidas humanas y 4000 millones de afectados, según las cifras recopiladas por EM DAT (2025). Además, según datos reportados por Aon plc (NYSE: AON) (2025), empresa de servicios profesionales especializada en gestión del riesgo, en su informe '*Q1 Global Catastrophe Recap*' el cual abarca los primeros tres meses del año, se llega a estimar que las pérdidas económicas ocasionadas por desastres naturales alcanzan los \$83,000 millones de dólares a nivel mundial, cifra que supera el promedio del siglo XXI, valorado en \$61,000 millones de dólares.

América Latina, es una región fuertemente influenciada por la actividad de las placas tectónicas, tal como se evidencia con la presencia del cinturón de fuego del pacífico, en donde se registra cerca del 90% de la actividad sísmica del planeta (United States Geological Survey, 2025). Además, de contar con la zona de interconvergencia tropical (ZCIT) encargada de provocar altos regímenes lluviosos, los cuales propician un ambiente hidrometeorológico favorable para la generación de desastres naturales. Para el 2024 se registraron 12 eventos climáticos, en los que se destacan las inundaciones, sequías, deslizamientos e incendios forestales, los cuales representaron un total de \$8280 millones de dólares en pérdidas.

Colombia, al ser un país ubicado en América Latina, está expuesto a todos estos factores mencionados anteriormente (cinturón de fuego del pacífico y ZCIT), además de las propias características geográficas del país. Por ejemplo, las zonas altas del país presentan una alta amenaza por movimientos en masa, mientras que las zonas bajas y planas son las inundaciones las principales causantes de los estragos (Ayala García & Dall'Erba, 2022). A todos estos factores geográficos se le suma la situación sociopolítica del país, influyendo factores como la pobreza y las consecuencias del conflicto armado interno, el desplazamiento de millones de personas del campo a las ciudades sin

posibilidades de adquirir vivienda en zonas seguras y que optan por ubicarse en terrenos vulnerables a los estragos de los desastres naturales ([Banco Mundial, 2010](#)).

Debido a ello, se hace primordial generar estudios que profundicen en el conocimiento de las geoamenazas, además de caracterizar y cuantificar aquellos factores capaces de detonarlos. Se hace especial énfasis en el municipio de San Joaquín debido a que los movimientos en masa constituyen un fenómeno recurrente en la zona, representando una amenaza constante para la infraestructura, la economía, la seguridad física y psicológica de la población. Algunas de las afectaciones generadas por los movimientos en masa en el municipio de San Joaquín son informadas por Alguero, (2023), quien habla sobre el impacto significativo provocado por estos fenómenos naturales a la infraestructura vial, lo que conlleva a perjudicar la conectividad con municipios aledaños como Mogotes y Onzaga. Describiendo que, para este último, las fuertes lluvias que se generaron en el mes de junio del 2023 dejaron a miles de personas incomunicadas debido a un deslizamiento generado en el kilómetro 76. De manera similar, en 2022 se presentó una creciente en la quebrada Santa Clara, la cual ocasionó graves daños en la infraestructura vial y provocó el desabastecimiento de alimentos, medicamentos y otros insumos básicos, además de limitar la atención de emergencias. Este evento impactó a cerca de 10,000 habitantes y ocasionó la pérdida de aproximadamente 200 hectáreas de cultivo, generando consecuencias negativas sobre la economía municipal ([Bautista, 2022](#)).

A esta problemática se suma la limitada capacidad de atención de emergencias en salud, dado que el municipio solo cuenta con un hospital de primer nivel. Esto obliga a remitir a los pacientes de mayor complejidad al hospital Regional de San Gil, el más cercano en la zona con servicios de segundo nivel. No obstante, esta vía para llegar a San Gil corresponde al mismo corredor vial que conecta al municipio de Mogotes con el de San Joaquín, que tal y como se mencionó previamente, ha sido afectado de manera recurrente por movimientos en masa. Esta situación incrementa la vulnerabilidad de la población al comprometer tanto la movilidad como la atención oportuna de emergencias médicas.

2 Justificación

Los movimientos en masa son uno de los tipos de desastres naturales más representativos en el mundo, con un 6% de todos los fenómenos naturales registrados entre 1900 al año 2024 (EM DAT, 2025). Según Corominas et al., (2014) sus efectos pueden variar dependiendo de múltiples factores, como el tipo de litología, las propiedades del suelo, la pendiente, la vegetación, y la geomorfología, entre otros. Además, estos eventos pueden ser desencadenados por lluvias y sismos, lo que provoca problemas de desestabilización de la capa superficial del suelo (Corominas, y otros, 2014)

En Colombia, los movimientos en masa representan una amenaza latente que afecta la calidad de vida de numerosas comunidades. Esta problemática es especialmente relevante en el departamento de Santander, donde se ha generado una zonificación de amenazas que indica niveles de amenaza media a muy alta (SGC - SIMMA, 2025). Entre los años 1939 y 2017, en Santander se han registrado 188 muertes asociadas a movimientos en masa, evidenciando gravedad y persistencia de este riesgo (SGC - SIMMA, 2025). Dentro de esta región, el municipio de San Joaquín presenta sectores con una caracterización en amenaza alta por movimientos en masa, y en mayor medida, debido a la saturación del suelo durante periodos de intensas lluvias (SGC - SIMMA, 2025). Diversos estudios han recomendado que las decisiones preventivas y correctivas para contrarrestar la amenaza se deben basar en análisis detallados de la amenaza existente en la zona, aunque para la fecha en la zona no existen estudios con el suficiente nivel de detalle cartográfico para adoptar las posibles medidas de mitigación (Castro & Ibañez, 2024).

Lo anterior se relaciona con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), formulados para el 25 de septiembre del 2015, donde se incluyen metas clave para la reducción del riesgo de desastres, entre estos los objetivos de Ciudades y comunidades sostenibles (ODS 11) y Acción por el clima (ODS 13). Estos objetivos buscan contrarrestar los efectos en las comunidades generados por los desastres naturales (ONU, 2015). Bajo este contexto, una forma de contribuir con el cumplimiento de estos objetivos, como a su vez, mejorar las condiciones de las comunidades, esta investigación se basa en una caracterización los umbrales de lluvia y sismo que pueden detonar movimientos en masa en los sectores hidrográficos de la quebrada Panamá y El León, en el municipio de San Joaquín, Santander. El análisis de estos umbrales, por medio de series de tiempo y

métodos estadísticos, es fundamental para comprender como influyen los factores de lluvia y sismo en la inestabilidad del terreno. Esta información permite la generación de modelos predictivos, los cuales contribuyen a la formulación de estrategias enfocadas en fortalecer la resiliencia de la comunidad. De esta forma, se contribuye a la construcción de comunidades más seguras y sostenibles y se promueve la capacidad para adaptarse a los efectos del cambio climático por acción de las lluvias al comprender y estudiar los patrones de lluvia y su impacto en el terreno.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Caracterizar los umbrales de lluvia y sismo que desencadenan movimientos en masa en los sectores hidrográficos de la quebrada Panamá y El León pertenecientes al municipio de San Joaquín, Santander, empleando el análisis de series de tiempo y métodos estadísticos, como apoyo a la resiliencia de la comunidad.

3.2 Objetivos Específicos

Analizar las series de tiempo de las estaciones meteorológicas presentes en la región del municipio de San Joaquín y municipios aledaños.

Establecer la relación espaciotemporal entre los movimientos en masa y las lluvias usando los datos de las estaciones meteorológicas circundantes presentes en la región de estudio.

Analizar la relación espaciotemporal entre los movimientos en masa y los sismos mediante el uso de bases de datos del Servicio Geológico Colombiano (SGC), con el fin de determinar posibles patrones de correlación.

Caracterizar los sismos de la región de estudio analizando los parámetros de magnitud, profundidad hipocentral, frecuencia, cercanía y aceleración máxima del suelo (PGA) para determinar su influencia como detonante de movimientos en masa.

Generar un modelo de recurrencia que permitan estimar el tiempo de retorno de eventos de lluvia máxima y sismos que tienen el potencial para inducir un movimiento en masa.

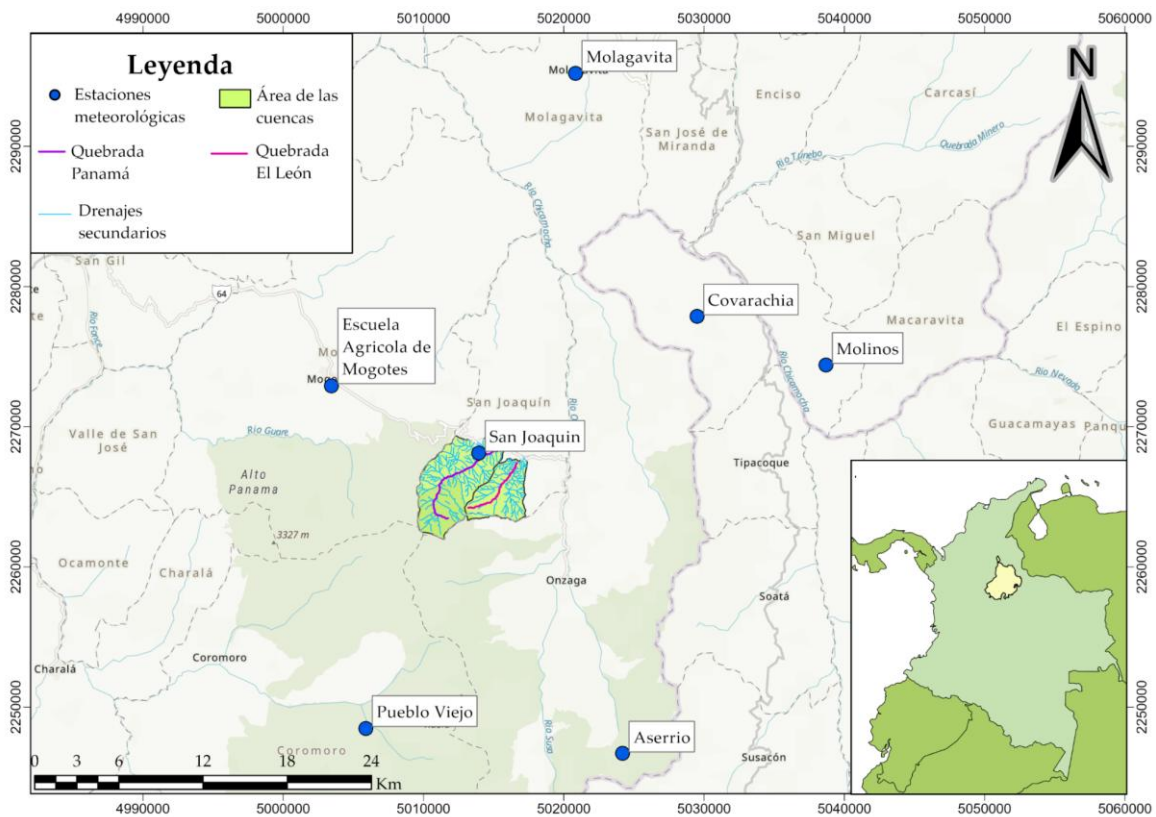
4 Marco de referencia

4.1 Localización

La zona de estudio corresponde a un área de aproximadamente 40 Km^2 y se ubica en el sector SW del Macizo de Santander, en las periferias del municipio de San Joaquín, perteneciente a la provincia de Guantán. La cartografía base de la zona de estudio se encuentra en las planchas 1:25,000 136IIIC, 136IIID, 152IA Y 152IB, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi ([Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, 2025](#)). La región se caracteriza por presentar una diversidad de climas y suelos debido a su topografía montañosa. La temperatura media oscila entre los 16 a 18° C . La hidrografía de la zona de estudio pertenece a la cuenca del río Chicamocha, subcuenca del Río Onzaga la cual cubre en su totalidad al municipio de San Joaquín y finalmente, presenta las microcuencas de la quebrada Panamá y El León. En la [Figura 1](#). se presenta una representación espacial de la zona de estudio.

Figura 1.

Mapa de localización del área de estudio.



Nota. En el mapa se observa la localización de las estaciones meteorológicas usadas para el trabajo, así como las zonas hidrográficas de la Quebrada Panamá y El León. El mapa se encuentra en el sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS Origen Nacional, EPSG: 9377.

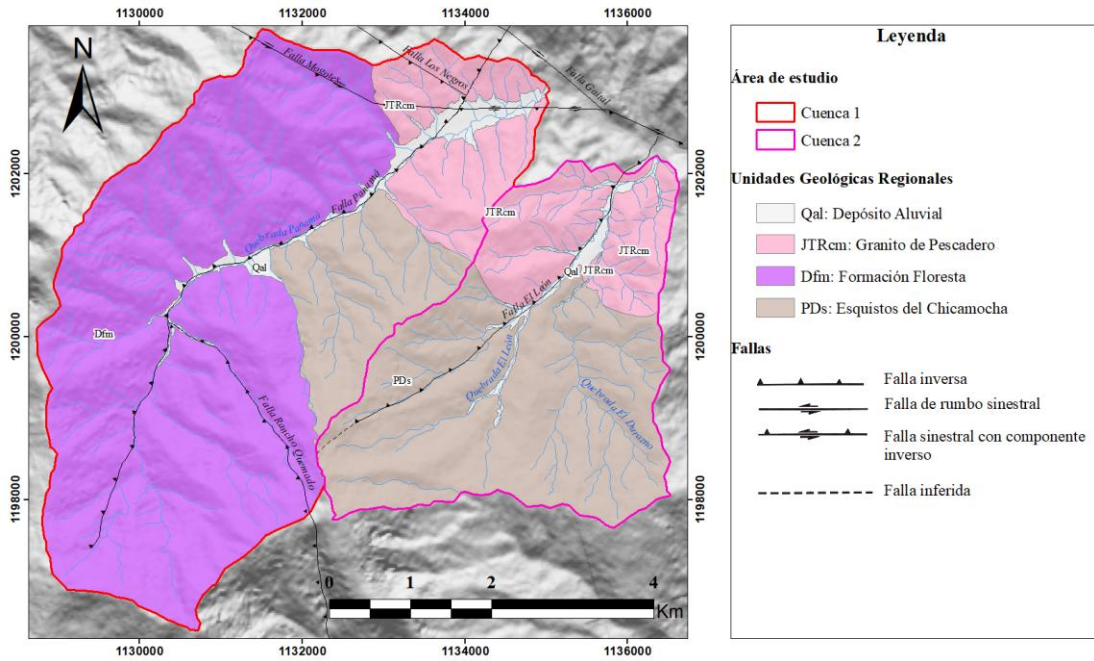
4.2 Contexto Geológico

El conocimiento del contexto geológico y geomorfológico de área de estudio es clave para analizar la susceptibilidad y la ocurrencia de MM. Por lo tanto, se hace necesario considerar características litológicas y estructurales las cuales influyen en la estabilidad del terreno y su respuesta frente a los detonantes de lluvia y sismo [Figura 2](#). En este capítulo se presenta una síntesis de la geología y geomorfología del municipio de San Joaquín, Santander.

Figura

2.

Mapa geológico adaptado al área de estudio.



Nota. Elaborado Navas & Grimaldos (2025).

4.2.1 Geología Regional

La geología regional del área de estudio está conformada principalmente por el Neis de Bucaramanga, La Formación Silgara, el miembro metamorfoseado de Floresta, el Granito de Pescadero y depósitos aluviales, Estas unidades definen el marco geológico del área e influyen en la inestabilidad del terreno.

4.2.1.1 Neis de Bucaramanga. La unidad está compuesta por rocas metasedimentarias de alto grado metamórfico, correspondientes a la facies anfibolita, alcanzando hasta la isógrada de sillimanita. Predominan paragneises pelíticos, gneises hornbléndicos y anfibolitas, con la presencia de migmatitas en algunas zonas (Vargas, Arias, Jaramillo, & Téllez, 1981). La ausencia de cianita y granate en la asociación mineralógica sugiere un metamorfismo tipo Barroviano débil, específicamente del tipo Bosanquet (similar al tipo Abukuma), caracterizado por condiciones de alta temperatura y baja presión. Estudios geocronológicos han determinado que el protolito de esta formación presenta una edad máxima de depositación correspondiente al Mesoproterozoico, con valores entre 1.200 y 1300 millones de años, según dataciones U-Pb en circones (Mantilla, García, & Valencia, 2016).

4.2.1.2 Formación Silgara o Esquistos del Chicamocha. Según Ward, esta formación presenta un grado de metamorfismo de bajo a medio, específicamente, en la faja San Joaquín–Onzaga–Páramo de Canutos, limitada al este por el Batolito de Mogotes y las Riolitas de Onzaga, y al oeste por las rocas del Miembro Floresta metamorfoseado (Vargas, Arias, Jaramillo, & Téllez, 1981). Hacia el sur de San Joaquín y Onzaga, los esquistos de cuarzo se alternan con arcosas y subgrauvacas metamorfoseadas, compuestas principalmente por cuarzo, plagioclasa, ortoclasa y, en menor proporción, muscovita y clorita. En el tope de la secuencia afloran filitas lustrosas compuestas por cuarzo, sericita y magnetita, cuya identificación se dificulta debido a su similitud con las filitas suprayacentes del Miembro Floresta metamorfoseado. Por esta razón, el contacto entre ambas formaciones ha sido delimitado, en algunos casos, de manera arbitraria (Vargas, Arias, Jaramillo, & Téllez, 1981).

La unidad ha sido afectada por diversos eventos metamórficos, siendo el más significativo el Evento Orogénico Famatiniano Principal, también conocido como Evento Quetame–Caparonensis. Estudios geocronológicos han establecido que la edad de depositación máxima de esta unidad corresponde al Neoproterozoico temprano, aproximadamente hace 900 millones de años (Mantilla, García, & Valencia, 2016). Para este trabajo a la unidad se le referirá como Esquistos del Chicamocha, de acuerdo con la denominación propuesta por Mantilla et al. (2016).

4.2.1.2.1 *Esquistos del Silgará.* Compuesta principalmente por pelitas y semipelitas. Está relacionada composicionalmente por lo reportado para la localidad tipo de la Formación Silgará. Su máxima edad estratigráfica data del neoproterozoico (Mantilla, García, & Valencia, 2016).

4.2.1.2.2 *Esquistos del Chicamocha.* Compuestos por metapsamitas, metapelitas metabasitas; y algunas litologías calcosilicatadas. Su edad estratigráfica corresponde al Cámbrico medio-temprano (Mantilla, García, & Valencia, 2016)

4.2.1.2.3 *Filitas de San Pedro.* Unidad compuesta fundamentalmente de metapsamitas, metapelitas; y localmente muy posiblemente litologías metavolcanoclásticas con una edad estratigráfica del ordovicio medio. Se sugiere que esta unidad fue afectada por eventos tectono-termales más recientes que el evento orogenico principal Fammatiniano (Mantilla, García, & Valencia, 2016)

4.2.1.3 Miembro Floresta metamorfoseado. La Formación se encuentra levemente metamorfoseada en la zona de Mogotes y San Joaquín. En la formación presenta fósiles Devónicos en un mármol gris oscuro, por encima de la arenisca y el conglomerado, a una distancia que varía entre los 250 y 300 m. Es así como debido sus similitudes litológicas y en el grado de metamorfismo con la Formación Floresta el contacto Floresta-Silgara se ha dibujado de manera aproximada (Vargas, Arias, Jaramillo, & Téllez, 1981). En estudios más recientes desarrollados por Mantilla Figueroa & García Ramírez (2018) se reconocen tres diferentes miembros composicionales de la Formación Floresta, diferenciados a partir de su composición y la presencia o ausencia de planos de anisotropía. Estos miembros son los siguientes

4.2.1.3.1 *Miembro Basal.* Caracterizado por estar compuesto por rocas con componentes siliciclásticos con textura predominantemente arenoso – conglomerático, las cuales fueron alteradas por eventos supérgenos por lo que adquieren tonalidades anaranjadas. Adicionalmente, presentan una reorientación preferente relacionada con procesos dinamo-térmicos (Mantilla Figueroa & García Ramírez, 2018).

4.2.1.3.2 Miembro Medio de la Formación Floresta. Caracterizado por presentar un aspecto sedimentario, compuesto por capas de areniscas y lodilitas con variación de espesores. Este miembro es distintivo por las intercalaciones de capas con espesores <10 cm, compuestos por areniscas de tamaño de grano medio a muy fino de composición cuarzosa y capas de lodolitas de tamaño limo, de color negro con alto contenido de materia orgánica. Localmente presentan venas de cuarzo-clorita (Mantilla Figueroa & García Ramírez, 2018).

4.2.1.3.3 Miembro Superior de la Formación Floresta. Caracterizado por presentar rocas lodolitas que varían de los colores grises a negros, además de presentar un evidente desarrollo de planos de clivaje de carga y localmente clivaje de tipo pencil (Mantilla Figueroa & García Ramírez, 2018)

4.2.1.4 Granito de Pescadero. El granito de Pescadero se trata de un granito rosado, de grano fino y carácter leucocrático, que presenta variaciones hacia facies porfíricas. Su composición mineralógica incluye albita, ortoclasa, micropertita y cuarzo, presentes en proporciones similares, con una relación aproximada de 40:25 entre feldespato potásico y albita-oligoclasa. La edad del granito fue determinada mediante el método K-Ar en biotita, arrojando un valor de 194 ± 7 millones de años, edad que es comparable con la de la cuarzomonzonita de Santa Bárbara y el Batolito de Mogotes (Vargas, Arias, Jaramillo, & Téllez, 1981).

4.2.1.5 Depósitos aluviales. Corresponden a materiales depositados en los valles actuales de los ríos y quebradas mayores. Pueden presentarse como cuerpos amplios que constituyen una llanura aluvial del río (Vargas, Arias, Jaramillo, & Téllez, 1981).

4.2.2 Geología Estructural

La zona de trabajo se encuentra influenciada por la sección sur de la Falla de Bucaramanga y una extensión de la Falla Lebrija. La terminación sur de la Falla de Bucaramanga se presentan fallas sinestrales y subparalelas con un sistema transpresivo en patrón dominó con comportamiento fractal (Velandia & Bermúdez, 2018). Por otro lado, la Falla de Lebrija se considera una estructura paralela al oeste de la Falla Bucaramanga (Velandia, 2017). Es así como específicamente en la zona de trabajo se encuentran las siguientes fallas:

4.2.2.1 Falla Gaital. La falla Gaital presenta una orientación noroeste sureste con componente de rumbo sinistral. Esta estructura es la que marca el contacto entre el Monzogranito del Batolito de Mogotes y los Esquistos del Chicamocha (Beltrán & Ballesteros, 2025)

4.2.2.2 Falla Los Negros. Esta estructura es el contacto fallado presente entre los Esquistos del Chicamocha, del Ordovícico, y el Leucogranito del Batolito de Mogotes, del Jurásico – Triásico, evidenciando así una cinemática inversa. La dirección de la falla es noroeste sureste y se encuentra ubicada principalmente entre las veredas Gaital y Cabecera (Beltrán & Ballesteros, 2025).

4.2.2.3 Falla Panamá. La falla Panamá o Pueblo viejo constituye una estructura de retrocabalgamiento inverso de la Falla de Boyacá, definiendo ambas fallas el sector más meridional del basamento de la Cordillera Oriental en el Macizo de Floresta. Actualmente la falla ha sido capturada por la Falla de Chagua entre los municipios de San Joaquín y Ricaurte, durante la inversión tectónica acelerada por la actividad de la Falla de Bucaramanga (Velandia & Bermúdez, 2018).

4.2.2.4 Falla Mogotes. La falla de dirección noroeste sureste fue definida por Velandia (2017) como la proyección más sur de la Falla de Lebrija. La falla se encuentra muy próxima al Abanico de Mogotes, el cual forma un extenso valle sobre el municipio de Mogotes, se ensancha hacia el noroeste. Se cree que la falla pudo haber controlado la evolución del abanico (Mantilla Figueroa & García Ramírez, 2018).

5 Estado del Arte

Los MM son fenómenos que han causado catástrofes a nivel mundial. Dichos fenómenos han sido estudiados teniendo en cuenta factores como los sismos y las lluvias. Desde el punto de vista de la actividad sísmica, los MM han sido estudiados Keefer, (1984; 2002) donde se evidencia que, inicialmente los registros de episodios eran incompletos usualmente, antes del final del siglo XVIII, y no fue sino hasta 1783 en Calibra, Italia, que se realizaron registros más precisos. De esta manera desde 1783 hasta la primera aplicación de la fotografía aérea se identificaron una muestra más amplia de

MM producidos como efectos de un sismo, además de describir los MM a detalle. El estudio de estos fenómenos avanzó hasta el punto en que a mediados del siglo XX se estudiaron los sismos mediante análisis retrospectivos donde se infirieron MM asociados en años o décadas. Para lograrlo con el tiempo se mejoraron los inventarios de MM, ejemplo que se vio a partir de 1980 tras terremotos en California, El Salvador, Japón, Italia y Taiwan.

En el análisis del factor hidrológico asociado a los MM uno de los trabajos más destacados es el de Reichenbach (1998), desarrollado en la cuenca del río Tíber, en Italia central. En el estudio se recopilaron información histórica de MM e inundaciones ocurridas entre 1918 y 1990, con el objetivo de establecer relaciones entre la ocurrencia de estos eventos y variables hidrometeorológicas. Para ello mediante parámetros hidrológicos y métodos estadísticos se definieron umbrales regionales para la ocurrencia de MM e inundaciones, siendo un método útil como herramienta de alerta regional y puede ser usado en la planificación de protección civil. Adicionalmente se menciona que a pesar de las ventajas del método este se encuentra limitado por la disponibilidad, calidad y precisión de los registros históricos, así como las limitaciones geomorfológicas y fisiográficas del área. Finalmente se resaltó la aplicabilidad de umbrales para zonas específicas, aunque los resultados del estudio en una zona no pueden ser exportados a una zona vecina ya que carecerían de fiabilidad y precisión (Reichenbach, 1998).

En Colombia, estudios como el de Aristizábal et al (2011; 2022) se han enfocado en el análisis de los umbrales de lluvia para MM aplicando métodos empíricos para el valle de Aburra, Antioquía, y la región del piedemonte de la cordillera central. Sin embargo, el autor se ha limitado exclusivamente al análisis del factor de lluvia. Otros autores como Valencia Ortiz & Martínez Graña (2023) y González Yaruro & Padilla Gutiérrez (2023) además de la caracterización del factor de lluvias, realizan la caracterización del factor sismo. González Yaruro & Padilla Gutiérrez (2023) cuantificaron el umbral de sismos para el municipio de Herveo, Tolima, a partir de un enfoque probabilístico implementando un modelo de Poisson con el objetivo de identificar la relación espaciotemporal entre los sismos y los MM, donde determinaron un umbral de magnitud aproximado de $M_w = 4.7$ para la ocurrencia del evento. Por otro lado, Valencia Ortiz & Martínez Graña (2023) realizaron un estudio en la región de Bucaramanga, Santander, en el cual se correlacionó el detonante de sismos a través de una metodología basada en el

registro histórico de los MM para establecer los umbrales de probabilidad, en donde establecieron umbrales de magnitudes de $M_w = 4$.

Localmente, el SGC ha hecho presencia en el municipio, por medio de estudios en la quebrada el León, la cual los habitantes conocen como la Leona, en donde evaluaron la afectación producida sobre terrenos, viviendas y puentes por la ocurrencia de avenidas torrenciales. En este estudio la organización reporta la presencia de un deslizamiento de gran magnitud que influye en la generación de eventos torrenciales. ([Servicio Geológico Colombiano, 2024](#))

6 Metodología

El desarrollo del proyecto se estructuró en tres fases principales que permitieron alcanzar los objetivos propuestos: (6.1) fase de pre-campo, (6.2) fase de campo y (6.3) fase post-campo, estas fases se explicaran de forma más detallada a continuación.

6.1 Fase pre-campo

Para analizar la relación espaciotemporal entre los MM y sus detonantes (lluvia y sismos), se consultaron diversas fuentes de información, tales como artículos científicos, tesis de pregrado y posgrado, informes técnicos del SGC, así como bases de datos nacionales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y del propio SGC, como el catálogo de sismicidad y el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA). A partir de estas fuentes, se descargó la información relacionada con el registro pluviométrico diario, los eventos sísmicos históricos y los MM inventariados en el municipio de San Joaquín y sus alrededores. Adicionalmente, en esta etapa se llevó a cabo la elaboración de un catálogo de MM a través de un proceso de fotointerpretación mediante el uso de software SIG, enfocado específicamente en el área del municipio de San Joaquín.

6.2 Fase de campo

El trabajo de campo tuvo una duración de diez días y consistió en la revisión y análisis morfoodinámico de los MM presentes en los sectores hidrográficos de la quebrada Panamá y el León catalogados durante la fase pre-campo. Para su correcta caracterización en se usó el formato adoptado por el Proyecto Multinacional Andino Geociencias para

las Comunidades Andinas (PMA-GCA) (2007) y ajustado por el SGC para el catálogo e inventario de movimientos en masa siguiendo las pautas establecidas en la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25,000 del Servicio Geológico Colombiano (2016). A través de estos se registró y catalogó cada MM identificado en el área de estudio, integrando información que incluía su ubicación geográfica (coordenadas), el impacto, la fecha de ocurrencia (cuando esté disponible), así como el tipo y el subtipo del evento. Sin embargo, únicamente se incluyeron en el inventario aquellos MM con un área mayor o igual a $10,000 m^2$ y que presentarán conexión con algún tipo de vía. Los formatos de inventario a diferencia de los de catálogo son más detallados incorporando la información sobre el material desplazado, los factores detonantes y las dimensiones del MM.

6.3 Fase post-campo

Para la fase post-campo se tomó como referente la metodología de Valencia Ortiz & Martínez Graña (2023), por ello se usaron los datos recolectados durante la fase pre-campo, revisando la información disponible con el fin de verificar su completitud. Se identificaron los registros faltantes o inconsistencias, los cuales no debían ser superior el 90%, (De Silva, Dayawansa, & M. D., 2007) y se procedió a su tratamiento mediante un método de rellenado de datos (Caldera, Piyathisse, & Nandalal, 2016). Para el caso de los registros sísmicos se seleccionaron aquellos eventos registrados en un radio de 200 km y profundidades en el rango de 0 a 50 km. Una vez finalizada la subfase de preprocesamiento se contrastaron los MM identificados mediante fotointerpretación en la fase de pre-campo y los descritos a detalle mediante los formatos adaptados del SGC (2016), con el fin de corroborar la existencia de estos MM y sus características en el área de estudio.

Posteriormente se determinaron los umbrales para cada uno de los detonantes, iniciando con el detonante de lluvias. Para ello se revisó la distribución espacial de las estaciones meteorológicas mediante la creación de polígonos de Thiessen, donde cada estación meteorológica es el centro de cada un polígono (Han & Bray, 2006). Es así como fue posible delimitar unidades discretas donde cada MM estaba asociado a una condición espacial y temporal. A continuación, se aplicó una prueba de homogeneidad para evaluar la consistencia del registro (Thorn, 1966). Por otro lado, se llevó a cabo un análisis estadístico mediante diagramas de cajas y bigotes para describir las características

temporales, de dispersión y de simetría del número de días con lluvia, la lluvia mensual, plurianual y la lluvia máxima de 24 horas. Lo anterior incluyó un análisis temporal de lluvia realizado mediante modelos de frecuencia y periodos de retorno de lluvia máxima anual en los periodos de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, considerando el ajuste de los datos a las distribuciones Normal, Log-Normal y Gumbel (Vogel, 1986; Thorn, 1966; Chow, Maidment, & Mays, 1988; Montealegre, 2009).

En el caso del detonante de sismos se cruzó la información de MM con las fechas eventos sísmicos, recolectadas en el catálogo sísmico unificada. Inicialmente se calculó la productividad sísmica mediante la ecuación de Gutenberg & Richter (1956), Ec. 1:

$$\log(N) = a - b \quad (1)$$

N= Número de sismos mayores o iguales a una magnitud M

a = Actividad sísmica

b = proporción de ocurrencia entre sismos grandes y pequeños

Después, para evaluar la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos se empleó el método de distribución de Poisson, ajustado de acuerdo con los parámetros obtenidos en la ley de Gutenberg & Richter (1956). Ec. 2:

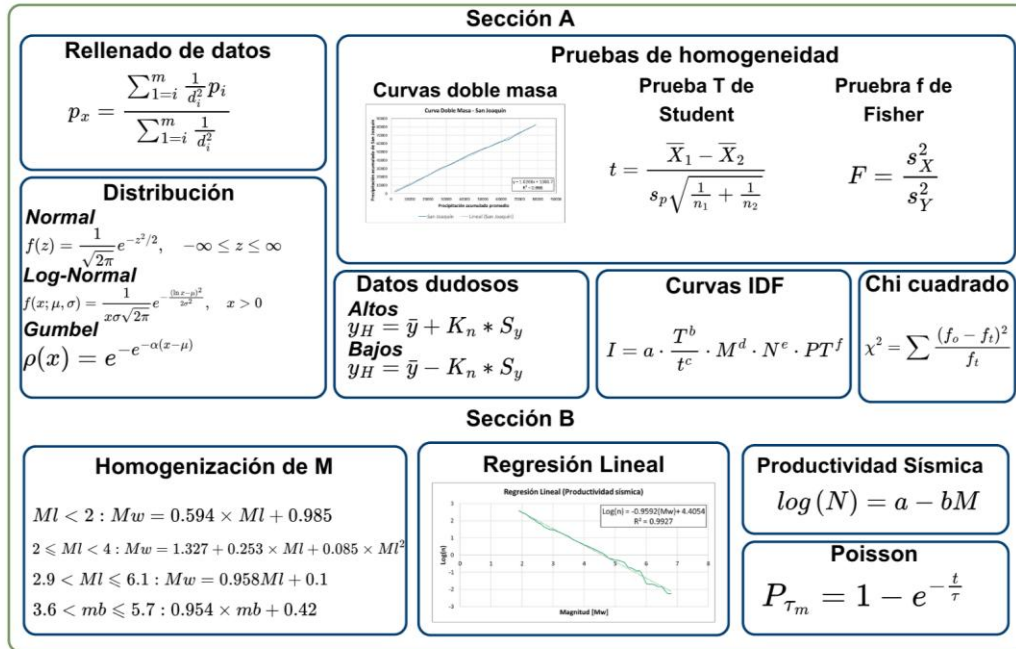
$$P_{\tau_m} = 1 - e^{-t/\tau} \quad (2)$$

P_{τ_m} = Probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico con magnitud m en un periodo

τ = El tiempo de retorno estimado

A ello se incorporó el análisis de la máxima aceleración superficial (Peak Ground Acceleration, PGA), como parámetro crítico para evaluar la intensidad de un evento sísmico. Finalmente se realizó el cruce de registros de MM con los eventos sísmicos ocurridos en los treinta días anteriores. Para ello se tuvieron en cuenta la magnitud, profundidad y distancia epicentral de los sismos. Esto se unió a los valores de PGA para establecer si el sismo fue un potencial detonante. La metodología propuesta para el desarrollo del proyecto se resume en el diagrama de flujo presentado en la Figura 4, dicha figura fue elaborada por las autoras con base en la revisión bibliográfica.

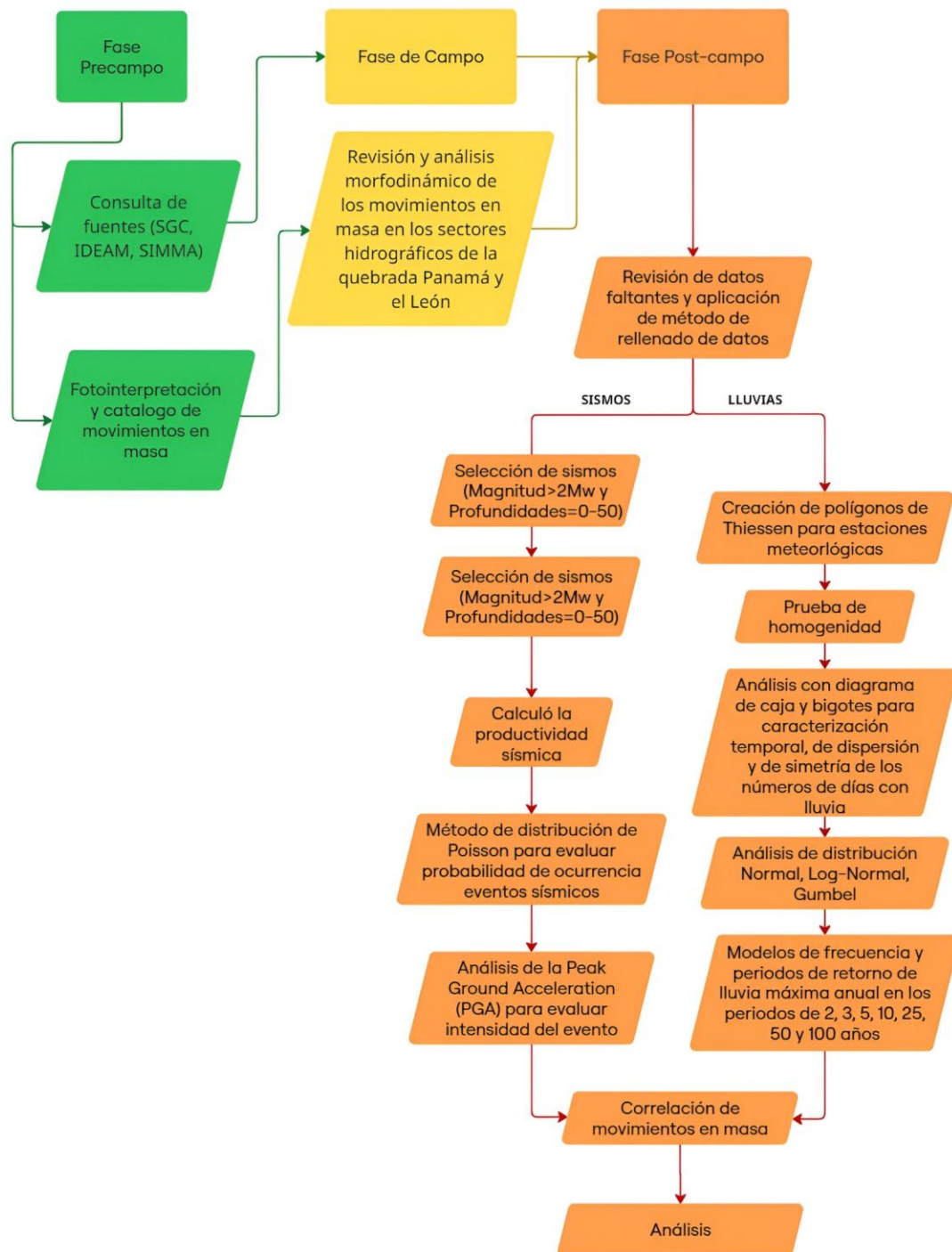
Figura 3.
Métodos estadísticos implementados en el proyecto



Nota. La sección A corresponde a los métodos usados para la serie de datos de lluvia mientras que la sección B corresponde a los métodos empleados para el factor de actividad sísmica.

Figura 4.

Esquema de metodología aplicada para el presente proyecto de investigación.



7 Resultados

7.1 Base de datos recolectada

7.1.1 *Inventario de movimientos en masa*

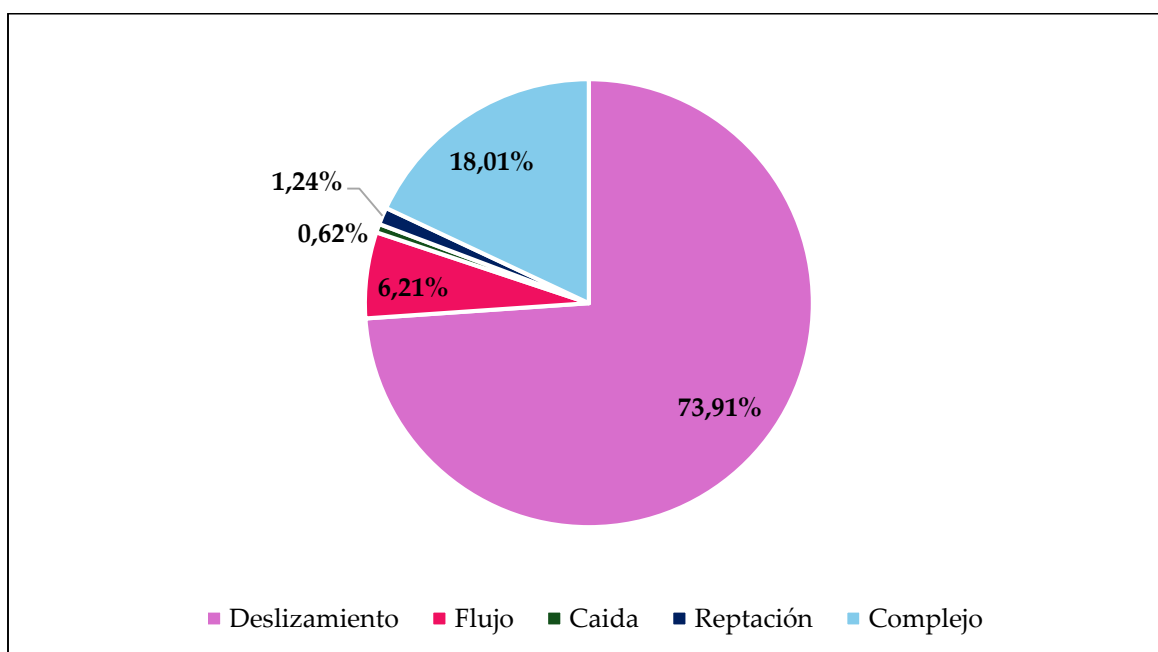
El inventario de MM usado en este trabajo fue el resultado de la recopilación de los datos obtenidos del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), el proceso de fotointerpretación realizado en la fase precampo y la verificación de MM realizada en la fase de campo. Del SIMMA se extrajeron siete registros de “deslizamientos” en San Joaquín, Santander, todos con precisión día, de los cuales cinco eventos correspondían a catálogo y dos a inventario. Como proceso paralelo se realizó una ampliación de la base de datos mediante un proceso de fotointerpretación usando la plataforma de Google Earth en donde se puede consultar una secuencia de imágenes satelitales entre los años 1969 y 2025, en él se señaló la geometría máxima de cada evento. El proceso de fotointerpretación fue realizado con el apoyo del grupo de trabajo del proyecto “Evaluación de los procesos de inestabilidad de laderas en las cuencas hidrográficas Panamá y El León en el municipio de San Joaquín, Santander, mediante la relación con parámetros morfométricos y morfoestructurales” (Quiroga, 2025), quienes se encargaron de organizar la base de datos con los MM identificados mediante estas imágenes satelitales. Este proceso permitió obtener de manera preliminar un total de 281 MM que no habían sido reportados, aunque solo fue posible obtener precisión mes/año.

Posteriormente, en campo se tuvieron en cuentas los formatos de la Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa a escala 1:25,000 (SGC, 2016), los cuales fueron adoptados del Proyecto Multinacional Andino Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA-GCA) (2007), donde se usaron los formatos para catálogo de MM e inventario de MM. Durante el trabajo de campo se llenaron un total de 161 formatos, entre los que se encontraban 156 de MM de catálogo y 5 de MM de inventario, dentro de los formatos se realizó la clasificación relacionada al tipo de MM de acuerdo con la clasificaron de Cruden y Varnes (1996) (Figura 5). Finalmente se realizó el cruce de la información del proceso de fotointerpretación con la información recolectada en campo, con el fin de caracterizar de manera precisa la mayor cantidad de eventos posibles. De esta forma, se sumó a esta base de datos algunos reportes de eventos hallados en noticias para alimentar al inventario de MM, dicha información fue indagada por Jácome & Quiroga (2025). Este equipo asignó a cada uno de los eventos del inventario un grado de precisión temporal según la

información disponible. Se determinó precisión día si la información indicaba la fecha exacta del evento; precisión mes cuando se reportaba su ocurrencia dentro de un rango de aproximadamente 30 días o existían inconsistencias entre fuentes; y precisión año cuando no fue posible correlacionar el evento con las fuentes disponible, pero fue identificado en campo o mediante fotointerpretación.

Figura 5.

Clasificación de los MM registrados en campo.



Nota. La clasificación de los MM fue realizada de acuerdo con la clasificación de Cruden y Varnes (1996).

7.1.2 Registro de lluvias

El registro pluviométrico fue adquirido de siete estaciones meteorológicas (Aserrio, Escuela Agrícola Mogotes, San Joaquín, Pueblo Viejo, Molagavita, Molinos y Covarachia) disponibles en el portal Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos (DHIME) del IDEAM (2025). Dichas estaciones fueron seleccionadas de acuerdo con su cercanía al municipio de San Joaquín y la disponibilidad de sus datos. Es así como para cada una de las siete estaciones se descargaron los datos de día pluviométrico para el máximo periodo de tiempo disponible y se construyeron series de tiempo para

determinar la ventana de tiempo que se usaría en el estudio. De esta manera a partir de la información obtenida se definió una ventana de tiempo de 46 años (1979 – 2024).

7.1.3 *Catálogo Sísmico*

En el catálogo sísmico se recopilaron registros de sismos presentes en las bases de datos del SGC y United States Geological Survey (USGS), considerando un radio máximo de 200 Km del área de estudio, junto a un rango de profundidad epicentral de 0 a 50 Km. Los parámetros mencionados anteriormente fueron definidos teniendo en cuenta su influencia en la ocurrencia de MM (Rodríguez, Bommer, & Richard, 1999; Keefer, 2002). El registro obtenido del SGC contaba con 13 datos del catálogo histórico de Colombia del periodo 1644 a 1981, con magnitudes Mw; 9542 del catálogo continuo 1993 – 2018, con magnitudes MI; y 9075 datos del catálogo continuo 2018 – 2025, con magnitudes MI y Mw. Por otro lado, el registro obtenido del USGS constaba de 476 datos con magnitudes Mb, Ms y Mw. Es importante resaltar que de la USGS solo se adquirieron datos para el catálogo de sismos históricos debido a que los sismos registrados por el SGC son más precisos al contar con los sismógrafos dentro del territorio. Con los registros de la USGS y el SGC se construyó un catálogo unificado donde se homogenizaron las magnitudes de los sismos a Mw mediante las ecuaciones del Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia (Arcila, y otros, 2020) y de Calculation of Moment Magnitudes for the German Earthquake Catalogue (Schmitt & Leydecker, 2015).

7.2 **Caracterización del detonante lluvia**

Para la cuantificación de la probabilidad asociada al factor de lluvia, el primer paso consistió en verificar la completitud de los registros de días pluviométricos correspondientes a siete (7) estaciones del IDEAM (Tabla 1), en una serie temporal comprendida entre 1979 al 2024, equivalente a un periodo de 46 años. Con el fin de garantizar la confiabilidad del análisis, se estableció como criterio que los datos faltantes no superaran el 10% del total del registro (De Silva, Dayawansa, & M. D., 2007). Cabe señalar que la estación MOLINOS [24030740] presentó aproximadamente un 50% de vacíos en la serie; no obstante, esta limitación no afectó el estudio, dado que dicha estación no ejerce influencia en las zonas hidrográficas de interés (Quebrada Panamá y El León). En estas áreas, la única estación con representatividad es SAN JOAQUÍN [24030200], la cual fue considerada como referencia principal para el análisis.

Tabla 1.*Estaciones de Lluvia*

Estación	Código
ASERRIO	[24030850]
ESCUELA AGRICOLA MOGOTES	[24025040]
SAN JOAQUIN	[24030200]
MOLAGAVITA	[24030340]
MOLINOS	[24030740]
PUEBLO VIEJO	[24020230]
COVARACHIA	[24030700]

Nota. Estas estaciones de lluvia fueron utilizadas para el proceso de rellenado de datos.

De las siete (7) estaciones analizadas se identificó que ninguna contaba con un registro continuo; por lo tanto, se procedió a realizar un proceso de completado de datos mediante el uso de un método de regresión lineal ponderada, en el cual se considera la distancia entre la estación objetivo y las estaciones con registros disponibles (Caldera, Piyathisse, & Nandalal, 2016) siguiendo la ecuación presentada en la [Figura 3, Sección A.](#)

Con el relleno de datos para las siete estaciones se procedió a realizar un análisis del cambio climático en el área de estudio, para lo cual se dividió la serie de tiempo en dos periodos donde el periodo 1 comprendía del año 1979 al 2001 y el periodo 2 del año 2001 al 2024 ([Ver Apéndice D; Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#)). Es así como se compararon las siete estaciones en ambos periodos usando la variación porcentual con respecto a los días que reportaran lluvias mayores o iguales a 5 mm ([Tabla 2](#)), la lluvia total ([Tabla 3](#)) y la lluvia máxima de cada estación meteorológica (

[Tabla 4](#)), tal y como se puede observar en las siguientes tablas. Posteriormente se analizó la variación anual de ambos periodos haciendo una comparación año a año con el fin de ver la tendencia de las lluvias a lo largo del tiempo, lo anterior dio como resultado la gráfica de variación que se muestra en [Figura 6](#).

Tabla 2.

Variación porcentual para lluvias mayores o iguales a 5 mm.

Lluvia \geq a 5 mm	Aserrio	Escuela agrícola Mogotes	San Joaquín	Molagavita	Molinos	Pueblo viejo	Covarachia
Periodo 1	2418	3052	2543	2581	1264	2391	1845
Periodo 2	2320	3157	2392	2355	2072	2967	1742
Variación porcentual	-4.05	3.44	-5.94	-8.76	63.92	24.09	-5.58

Nota. Variación porcentual para lluvias mayores o iguales a 5 mm registradas en cada estación meteorológica.

Tabla 3.

Variación porcentual para lluvia total.

Lluvia total	Aserrio	Escuela agrícola Mogotes	San Joaquín	Molagavita	Molinos	Pueblo viejo	Covarachia
Periodo 1	38248.61	61558.69	42214.08	41801.65	18655.63	36296.57	31229.69
Periodo 2	36438.71	64378.67	40536.29	40082.71	32738.48	39607.87	28328.41
Variación porcentual	-4.73	4.58	-3.97	-4.11	75.49	9.12	-9.29

Nota. Variación porcentual de la lluvia total registrada en cada estación meteorológica.

Tabla 4.

Variación porcentual para lluvia máxima de cada estación meteorológica.

Lluvia máxima	Aserrio	Escuela agrícola Mogotes	San Joaquín	Molagavita	Molinos	Pueblo viejo	Covarachia
Periodo 1	87.50	114.80	98	83	70	100	100
Periodo 2	116.30	93.50	82.70	90.20	104.56	88	136

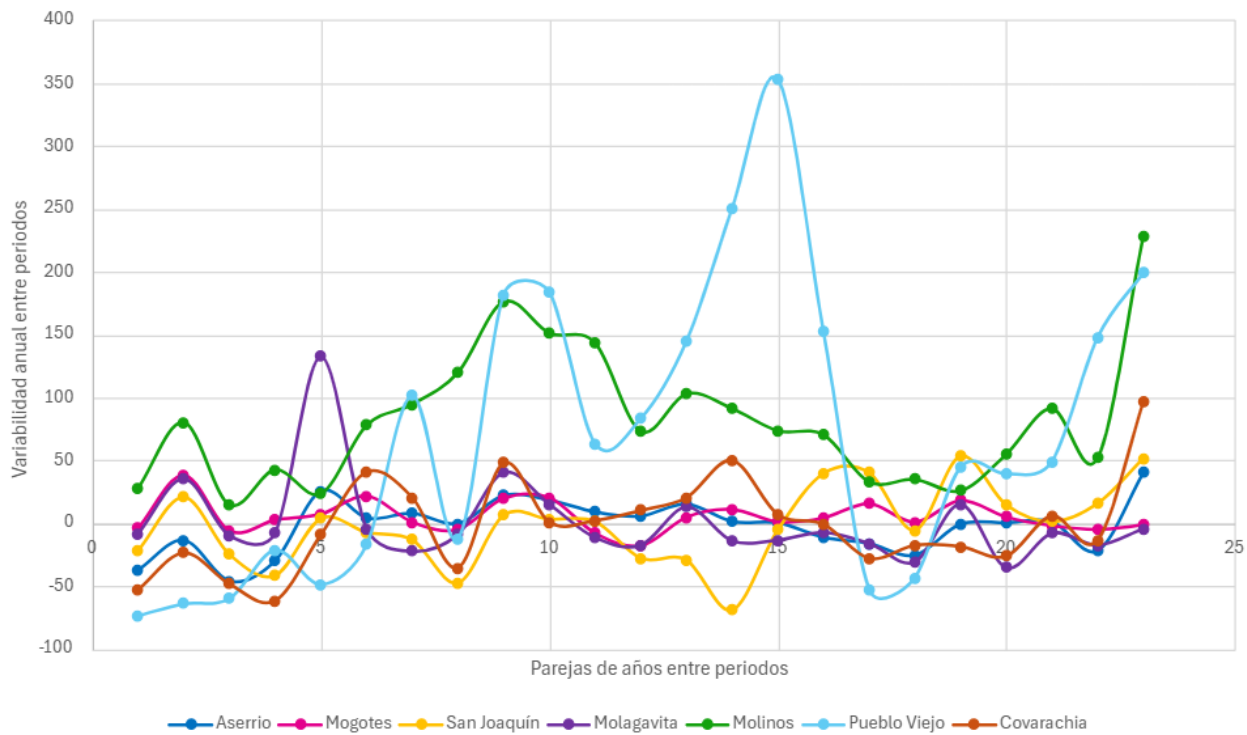
Variación porcentual	32.91	-18.55	-15.61	8.67	49.38	-12	36
-----------------------------	-------	--------	--------	------	-------	-----	----

Nota. Variación porcentual de la lluvia máxima registrada en cada estación meteorológica.

Figura

6.

Gráfica de variabilidad anual respecto a las parejas entre ambos periodos.

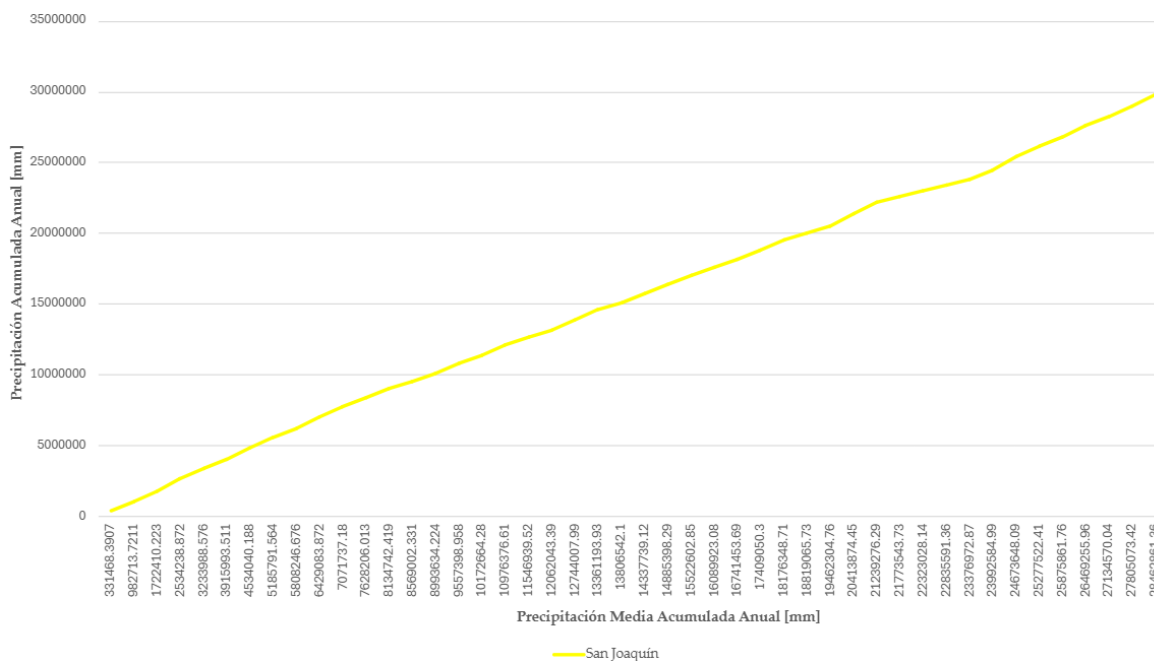


Nota. El eje y representa la variación porcentual del grupo de años y el eje x representa los años agrupados.

Con el registro de lluvias completo, se aplicaron pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas con el fin de evaluar la homogeneidad y consistencia de la serie en cada estación. Una estación se clasifica como homogénea únicamente cuando no se detectan variaciones estadísticamente significativas en la media de la serie (Thorn, 1966). Para el caso de este trabajo de investigación, la homogeneidad de la serie de lluvias se verificó a partir del registro completo mediante la aplicación de las pruebas estadísticas F de Fisher, T de Student (Figura 3, sección A) y el análisis de curvas de doble masa (Figura 7) Respecto a la consistencia de una estación, esta se considera consistente cuando sus registros no presentan anomalías sistemáticas que comprometan la representatividad de la serie en el tiempo. De tal forma, para el proyecto la consistencia se verificó mediante una prueba de datos dudosos para valores de lluvia, desarrollada por Chow et al (1988).

Figura 7.

Curva doble masa de la estación de San Joaquín.



Nota. La curva doble masa hace la comparación de la precipitación acumulada anual registrada en San Joaquín con la media de las estaciones meteorológicas trabajadas.

En los análisis realizados con la prueba T de Student, todas las estaciones resultaron homogéneas, con excepción de la estación MOLINOS (Ver Apéndice E). Por su parte, la aplicación de la prueba F de Fisher evidenció falta de homogeneidad en las estaciones MOLINOS y PUEBLO VIEJO (Ver Apéndice E). En cuanto al análisis mediante curvas de doble masa, los resultados fueron consistentes con los obtenidos a partir de la prueba F de Fisher. En la estación MOLINOS se identificó una variación en la pendiente de la curva alrededor del año 2001, lo que evidencia una ruptura en la homogeneidad de la serie. Por su parte, la estación PUEBLO VIEJO presentó, en general, un comportamiento marcadamente heterogéneo a lo largo de su registro (Ver Apéndice A).

La prueba de datos dudosos mostró que las estaciones son consistentes, presentándose datos atípicos en un solo año para algunas estaciones (**San Joaquín: 2015; Molagavita: 1983; Molinos: 2010; Covarachía: 1982**) No se efectuó un ajuste de los datos

debido a que, en su mayoría, carecían de representatividad en la zona. La única excepción correspondió a la estación SAN JOAQUÍN; sin embargo, tampoco fue objeto de modificación, dado que, tras la revisión, se confirmó que sus registros coincidían con la información original descargada del IDEAM (Ver Apéndice B)

Para el análisis de los tiempos de retorno (Tr) de eventos extremos, se calculó una proyección de cada estación por medio de distribuciones estadísticas como la distribución Normal, LogNormal y Gumbel (Thorn, 1966; Montealegre, 2009; Chow, Maidment, & Mays, 1988) para determinar valores de lluvia máxima anual para Tr equivalente a 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Se comprobó la bondad de ajuste de las distribuciones mediante la prueba Chi cuadrado (Ver Apéndice F y Apéndice G), utilizada para determinar qué frecuencias observadas son significativamente diferentes de las frecuencias esperadas. Como resultado, se obtuvo que la distribución LogNormal muestra el mejor ajuste a los Tr para la estación con influencia en el área de estudio. Adicionalmente, esta distribución fue la que presento mejor ajuste para las estaciones ESCUELA AGRICOLA DE MOGOTES y COVARACHÍA mientras que PUEBLO VIEJO mostró solo ajustarse a la distribución Gumbel. Las estaciones ASERRIO, MOLAGAVITA y MOLINOS no se ajustaron a ninguna de las distribuciones usadas en el estudio, sin embargo, se optó por tomar la distribución que arrojó el valor más cercano al chi cuadrado crítico, siendo así la distribución Gumbel la que mostraba mayor aproximación para las tres estaciones (Tabla 5).

Tabla 5.

Ajuste Chi cuadrado para las estaciones analizadas en el estudio.

Estación	Valor de Chi Cuadrado		
	función normal	función LogNormal	gumbell
ASERRIO [24030850]	Rechazado	Rechazado	Rechazado
ESCUELA AGRICOLA MOGOTES [24025040]	Rechazado	8.92	8.93
SAN JOAQUIN [24030200]	2.58	2.03	3.24
MOLAGAVITA [24030340]	Rechazado	Rechazado	Rechazado
MOLINOS [24030740]	Rechazado	Rechazado	Rechazado

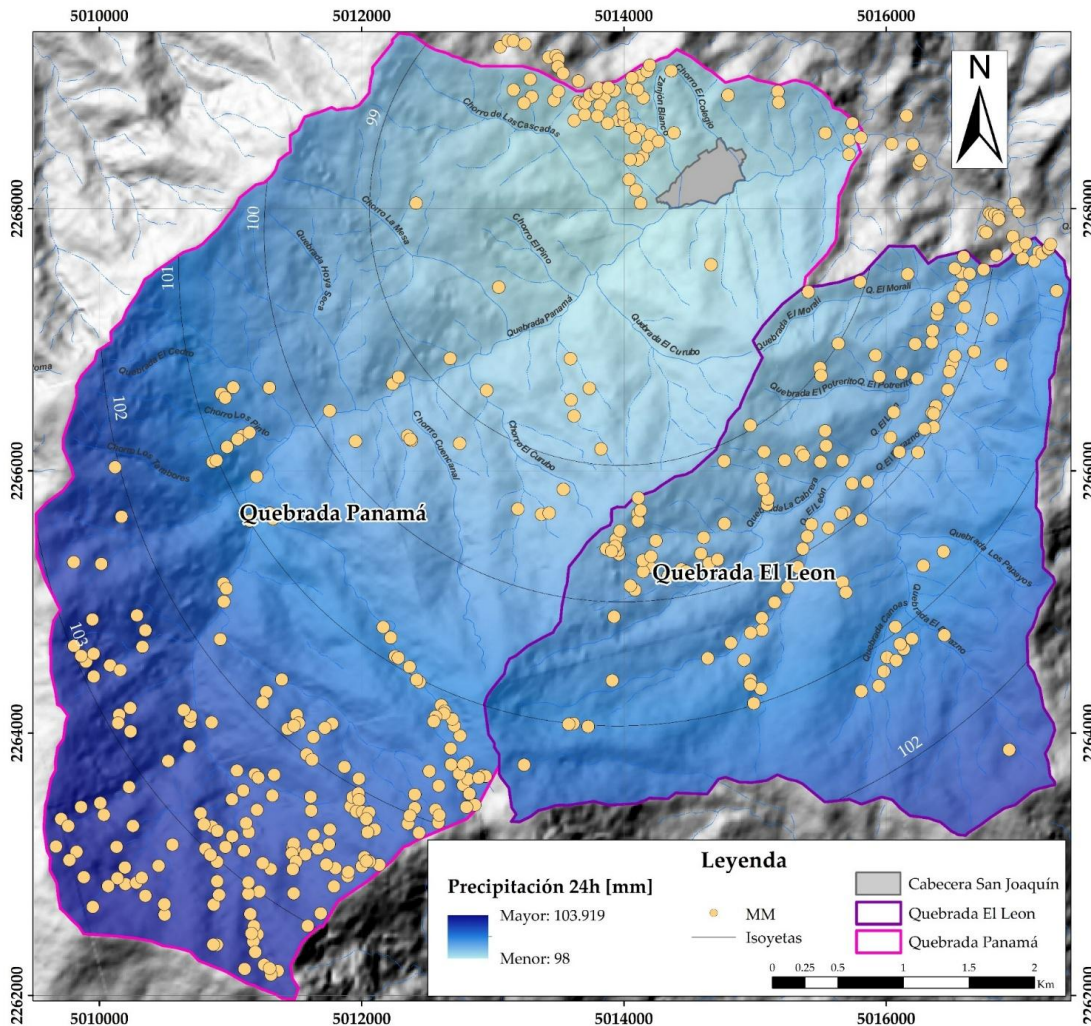
PUEBLO VIEJO [24020230]	Rechazado	Rechazado	9.28
COVARACHIA [24030700]	Rechazado	5.81	6.14

Nota. La ecuación utilizada para calcular los valores presentados en la tabla se encuentra en la *Figura 3*.

Para la evaluación de la lluvia máxima en 24 horas se realiza una interpolación Inversa de la Distancia Ponderada (IDW) con el valor máximo encontrado en la serie temporal para la lluvia 24 horas de cada una de las estaciones. El comportamiento general para la zona de estudio demuestra valores oscilantes entre 98 mm y 103.92 mm, notándose un aumento en el valor de lluvia máxima hacía el SW de las zonas hidrográficas, alejándose de la estación de SAN JOAQUÍN (*Figura 8*).

Figura 8.

Comportamiento de la lluvia máxima en 24 horas.



Nota. Los datos son interpolados mediante la técnica IDW y recortados para la zona de estudio.

Con base en los resultados obtenidos a partir de la interpolación mediante la técnica IDW, contrastándolo con los datos estadísticos obtenidos para la proyección de lluvia tomado de la distribución aplicada (LogNormal), se evidencia que los valores de lluvia máxima se ajustan a un Tr equivalente a 25 años, como factor detonante de los MM (

Tabla 6).

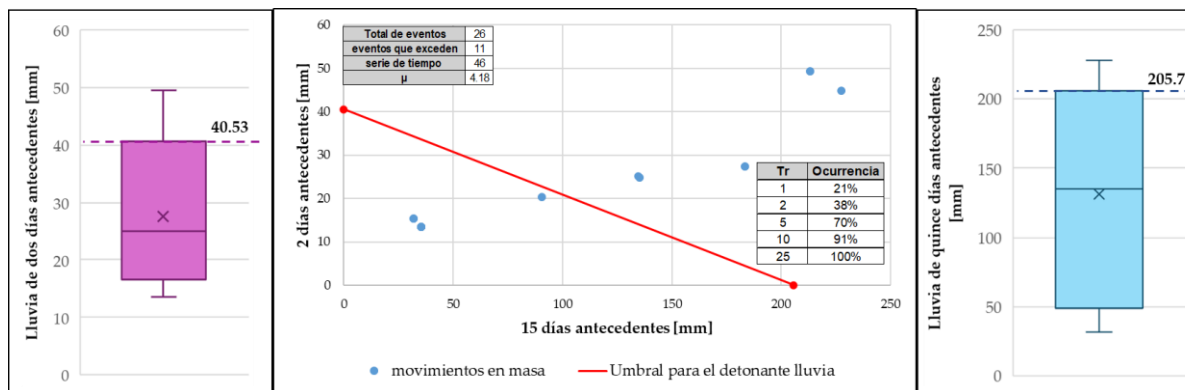
Se analizan las lluvias 24 horas y 15 días antecedentes para cada uno de los MM que cuenta con fecha en orden de día. Esto permite establecer una correlación entre los eventos con el inventario de MM, logrando estimar los umbrales y su recurrencia temporal. De los 434 MM catalogados solo se determinó la fecha exacta del movimiento para 26 MM situados en la ventana de tiempo, esto debido a una serie de factores como la ausencia de un cuerpo de bomberos que pueda atender estos fenómenos, la poca cantidad de imágenes satélites y un limitado registro llevado hasta el momento por parte de periódicos o por medio de redes sociales, entre otros. A partir de estos 26 MM se determina la lluvia 24 horas y la de 15 días antecedentes, ya que esta condición define de manera acorde la lluvia detonante (Valencia Ortiz & Martínez Graña, 2023). Se construyó un diagrama de cajas y bigotes para visualizar la distribución estadística con el fin de determinar el umbral. Con el procedimiento se obtuvo que no fue posible establecer un umbral de lluvia de 24 horas a partir de la correlación con los eventos de movimientos en masa, debido a la baja densidad de registros con resolución diaria. En consecuencia, se adoptó como referencia un umbral de 40.53 mm para lluvias acumuladas en los 2 días previos al evento. Por otra parte, el umbral de lluvia de 15 días antecedentes se estableció en 205.72 mm. Con la relación entre los dos umbrales se estimó los eventos que superan el umbral, obteniéndose un total de 11 eventos. Con esta relación, y siguiendo lo estipulado por (Rodríguez Castiblanco, y otros, 2017) se procedió a calcular la probabilidad anual de excedencia se determinó usando un modelo de probabilidad de Poisson (Ec. 3) para la ventana de 46 años, con ello se definió que para un Tr de 25 años hay una probabilidad del 100% de superar el umbral (Figura 9).

$$P(N \geq 1; t) = 1 - (e^{-\mu}) \quad (3)$$

Donde, N es el número de deslizamientos que ocurren durante la ventana de tiempo (t) y μ es el intervalo promedio de ocurrencia.

Figura 9.

Gráfica de umbrales en relación con 2 y 15 días previos al evento.



Nota. Los Tr calculados se realizaron por medio del modelo de probabilidad de excedencia de Poisson (Ec. 3).

Con base en las distribuciones se determinó un Tr para los umbrales estimativos para las lluvias acumuladas durante los dos días previos al evento. De tal forma, se obtiene que lluvias de 40.53 mm, que son estimativamente las causantes de detonar MM se podrían estar presentando cada 2 años (

Tabla 6). Los valores de lluvia extremos también fueron calculados para las demás estaciones y se pueden ver en el Apéndice H, con base en estos resultados se generaron los mapas del Apéndice C implementando la técnica de IDW.

Tabla 6.

Precipitación máxima por LogNormal para Tr equivalentes a 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Valor extremo para un Tr SAN JOAQUÍN		
Tr	Xt	mm
2	4.13	62.21
3	4.23	68.76
5	4.33	75.65
10	4.43	83.79
25	4.54	93.45
50	4.61	100.27
100	4.67	106.82

Nota. Variación porcentual de la lluvia total registrada en cada estación meteorológica.

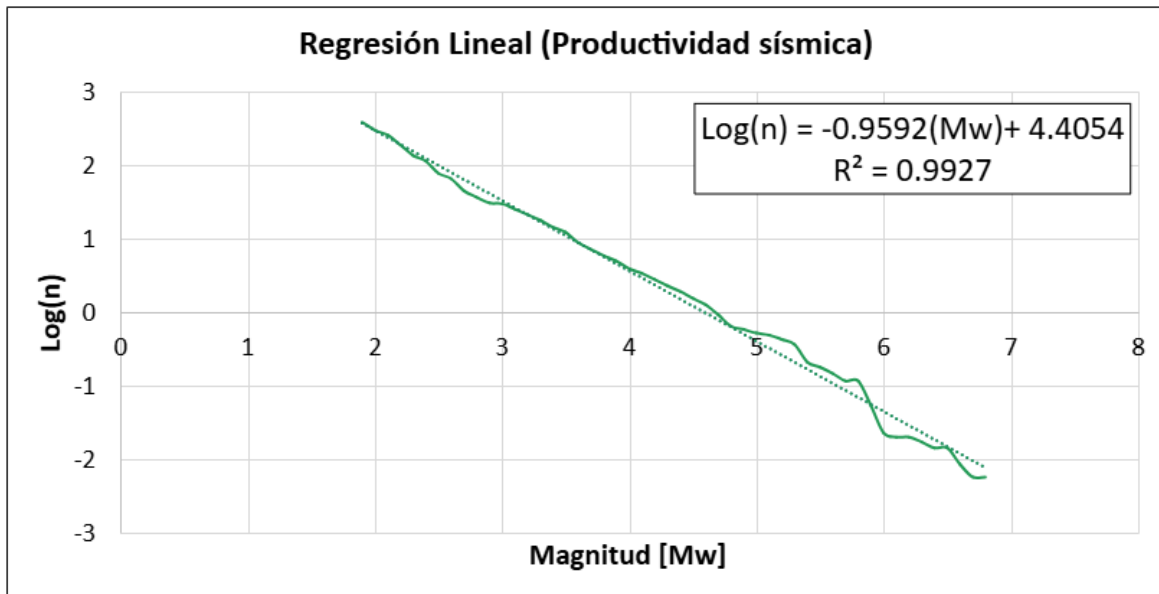
7.3 Caracterización Del Detonante Sismo

Con el fin de caracterizar la influencia de los sismos como detonantes de MM, se realizó un análisis detallado del catálogo sísmico. Para ello se aplicó el método de Gutenberg & Richter usando la totalidad de catálogo construido, compuesto de sismos con magnitudes de 0.7 a 6.7 Mw. De esta manera se contabilizó el número de eventos ocurridos para cada una de las magnitudes reportadas para obtener su distribución, las cuales fueron divididas en la duración del catálogo sísmico (32 años) para obtener la tasa anual de ocurrencia para cada magnitud. Con base en la distribución de eventos por magnitud se calculó la frecuencia acumulada de ocurrencia de eventos, a la cual se le aplicó el logaritmo decimal con el fin de derivar la expresión de la ley de Gutenberg y Richter (1956), construyendo así la gráfica de productividad sísmica. En dicha gráfica se aplicó la regresión final para obtener la siguiente expresión: $\log(N) = 4.4054 - 0.9592M_w$ la ecuación de la productividad sísmica para el municipio de San Joaquín, tal y como se muestra en la

Figura 10.

Figura 10.

Productividad sísmica.



Nota. A partir de esta grafica se deriva la expresión de la ley de Gutenberg y Richter (1956).

Mediante la ecuación de la productividad sísmica fue posible determinar en años la probabilidad de ocurrencia de sismos de diferentes magnitudes en el municipio de San Joaquín. Para ello se aplicó la formula a magnitudes 1 a 9 Mw y se calculó el Tr de cada una de ellas. Los resultados de este proceso se pueden observar en la

Tabla 7 y

Nota. La ecuación utilizada para calcular los Tr fue obtenida en la [Figura 10.Figura 10.](#)

Figura 11.

Tabla 7.

Cálculo de Tr para diferentes magnitudes de sismos.

Formula, Log (N)=4.4054-0.9592x	Magnitud	Años, uno en
0	9	16811
0	8	1848
0	7	203
0	6	22
0	5	2
4	4	0
34	3	0
307	2	0

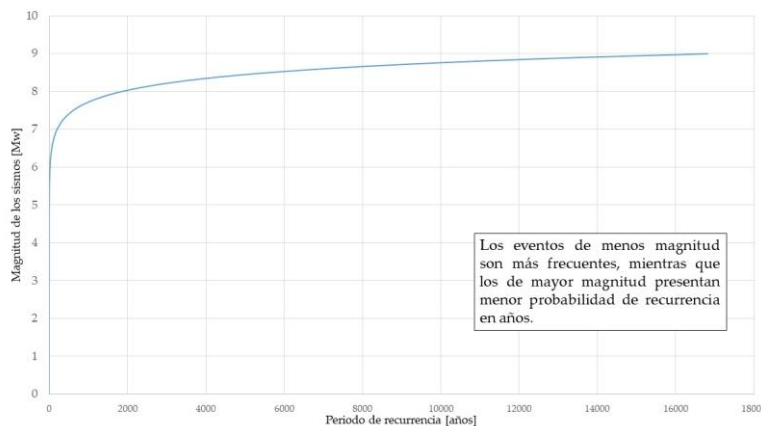
2795	1	0
------	---	---

Nota. La ecuación utilizada para calcular los T_r fue obtenida en la [Figura 10](#).

[Figura 10](#).

Figura 11.

Probabilidad de ocurrencia de sismos en años.



Nota. La gráfica muestra que una relación proporcional entre la magnitud del sismo y el periodo de ocurrencia

A partir de la productividad sísmica se determinó la probabilidad de ocurrencia sismos detonantes de MM, usando para ellos sismos con magnitudes $M_w \geq 4$ (Keefer, 2002), mediante el modelo de distribución de Poisson (Ec 3). Es así como para el modelo de distribución de Poisson se usaron sismos con $4 \leq M_w \leq 9$ en un periodo de recurrencia de cien años, tal y como se observa en la

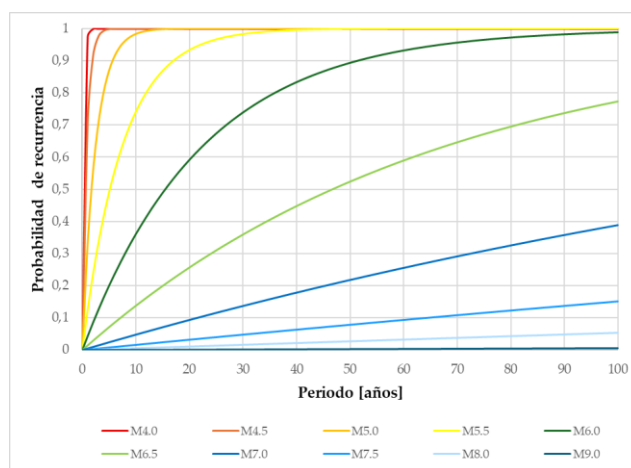
[Figura 12](#). A su vez se correlacionaron los MM con precisión día con el catálogo sísmico para aquellos eventos con magnitud $M_w \geq 4$, siendo el periodo de tiempo más corto entre un evento sísmico y el MM de una duración de 59 días. Tal y como se observó en la

[Figura 12](#), el modelo de distribución de Poisson evidencia un comportamiento claramente diferenciado según la magnitud del sismo. En otras palabras, mientras menor

sea la magnitud del sismo el Tr será menor. Aquellos sismos con magnitud de Mw 4 y Mw 5 tendrán una probabilidad de ocurrencia de 100% en un tiempo menor a 10 años mientras que los sismos de magnitud intermedia de Mw 5.5 requieren de un Tr de 40 años para tener una probabilidad del 100% de ocurrir. En contraste, los eventos sísmicos de gran magnitud Mw superiores a 7 se caracterizan por su baja probabilidad de ocurrencia en los Tr analizados. Los sismos de Mw equivalente a 7 apenas alcanzan valores cercanos al 45% en un periodo de 100 años, en tanto que Mw 7.5 no supera el 25% y Mw 8.0 permanece por debajo del 15% en el mismo intervalo. Estos resultados evidencian que, aunque posibles, los sismos de gran magnitud representan escenarios poco frecuentes.

Figura 12.

Distribución de Poisson.



Nota. La gráfica recopila la probabilidad de recurrencia de los sismos con el potencial de detonar MM.

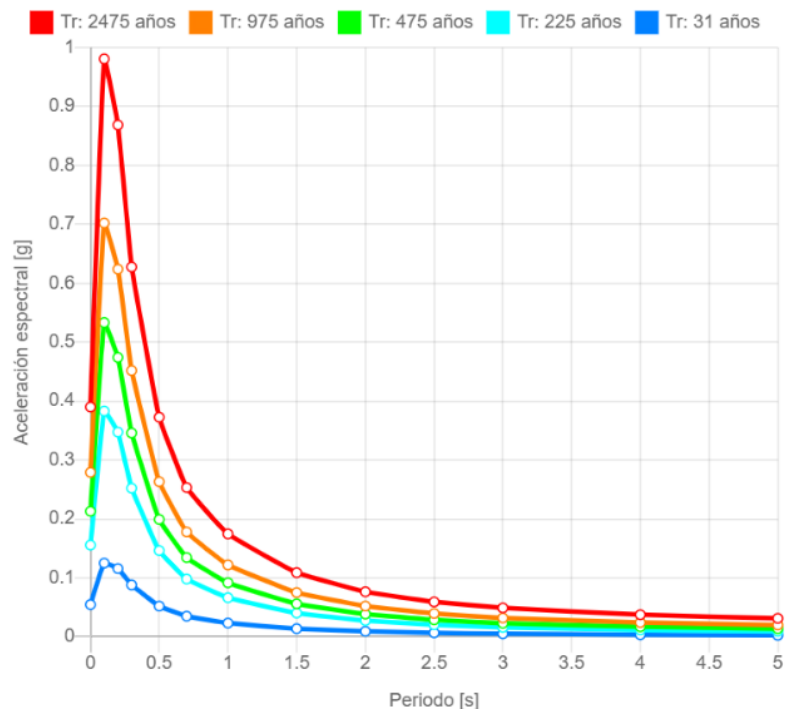
Resultados similares se obtienen en el espectro de amenaza uniforme para el municipio de San Joaquín

Figura 13 el cual indica que en el municipio se presenta una amenaza sísmica moderada a alta en eventos de baja probabilidad. Adicionalmente el espectro muestra una tendencia decreciente de la aceleración espectro con el aumento del periodo, indicando que aceleraciones mayores se concentran en periodos inferiores a 0.5 [s]. Para el caso de los valores de PGA se observó que para las zonas hidrográficas estudiadas se presentan valores de dentro del rango de 0.20 a 0.25, lo que lo clasifica en una amenaza intermedia

Figura

13.

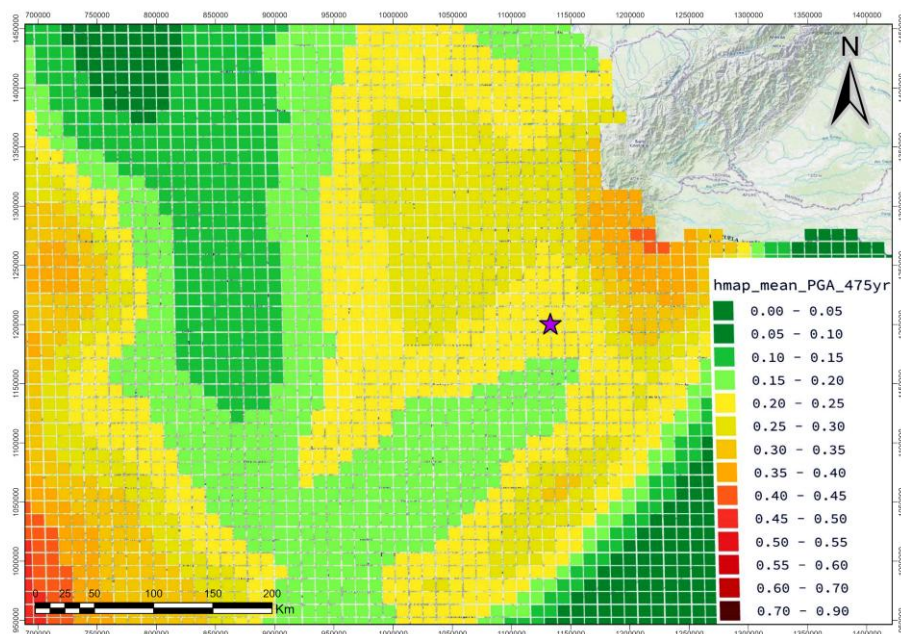
Espectro de amenaza uniforme para el municipio de San Joaquín, Santander.



Nota. Información tomada del SGC (2025).

Figura 14.

Mapa de amenaza de roca.



Nota. Figura adaptada del SGC (2025). La escala de colores de verde a rojo representa los valores de PGA para un periodo de 475 años, y la estrella morada representa el municipio de San Joaquín.

8 Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten establecer y caracterizar los umbrales de lluvia y sismo en la ocurrencia de MM para el municipio de San Joaquín, Santander. El análisis evidencia que la ocurrencia de estos fenómenos se encuentra influenciada de manera predominante por la precipitación, lo cual se refleja en la determinación de un umbral estimativo para lluvias acumuladas en los 2 días previos al evento. La elección de este intervalo, en lugar del umbral de 24 horas comúnmente utilizado en este tipo de estudios (Valencia Ortiz & Martínez Graña, 2023), obedece a que el cálculo de lluvias acumuladas a 24 horas arrojó un valor de apenas 8 mm para la activación de MM. Dicho valor sugiere que prácticamente cualquier precipitación tendría la capacidad de detonar un evento, este tipo de resultado se da por la baja densidad de registros diarios de movimientos en masa en el área de estudio.

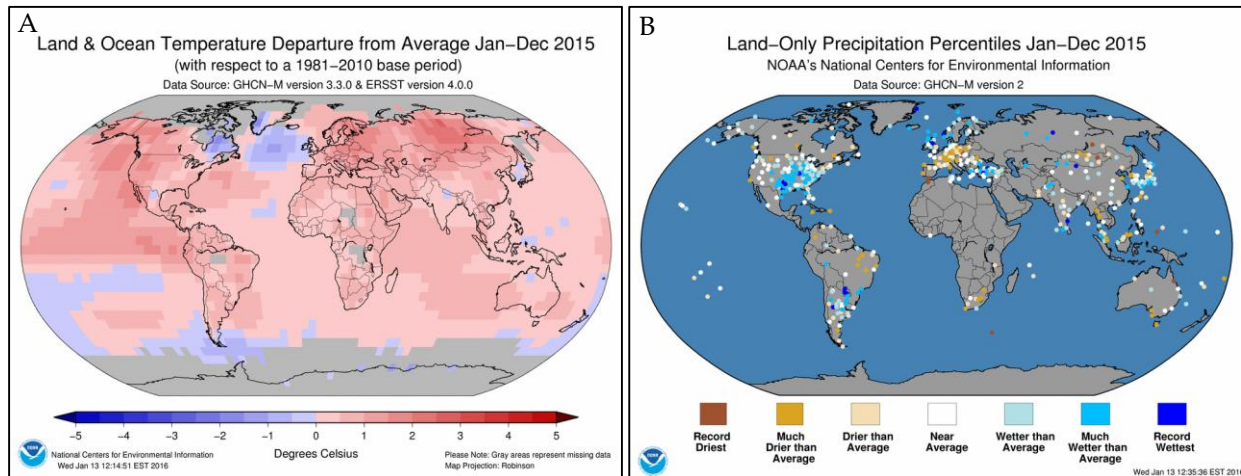
Bajo este contexto, se estableció un umbral estimado de 40.54 mm para lluvias acumuladas en dos días previos al evento, y de 205.72 mm para quince días antecedentes. Dichos umbrales difieren de los resultados establecidos por Valencia Ortiz & Martínez-Graña (2023), para Bucaramanga, donde el umbral de quince días antecedentes fue de

158 mm, lo cual se debe a que a pesar de usar metodologías similares las áreas de trabajo son diferentes. La comparación sugiere que en San Joaquín el umbral de saturación se alcanza tras una acumulación pluviométrica más prolongada, lo cual puede explicarse por la interacción de factores geológicos diferenciales y por las variaciones de la cobertura vegetal.

En lo referente al análisis climático, la gráfica de variabilidad anual muestra que, para los periodos agrupados analizados, los valores de precipitación presentan un comportamiento oscilante pero homogéneo, manteniéndose dentro de un rango definido. No obstante, a partir de 2019 se observa una variabilidad porcentual positiva, lo cual significa un incremento en la cantidad de precipitación acumulada anual, lo cual podría tomarse como una señal de alerta por parte de las autoridades locales competentes en la Gestión del Riesgo del municipio debido que al aumentar las precipitaciones se estaría presentando una mayor susceptibilidad del terreno a MM. Al momento realizar la comparativa entre ambos periodos, se encuentra una variabilidad negativa para el periodo comprendido entre 2002 al 2024, este resultado se debe al valor obtenido de lluvia acumulada anual para el 2015 fue de 427.8 mm representando así un valor anómalo negativo en la serie de tiempo. Este valor podría relacionarse con el evento climático a nivel global reportado por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, Sigla en inglés) quienes reportan un aumento en la temperatura a nivel global, siendo que, para ese entonces Colombia presentó datos de temperatura mayores en comparación al periodo comprendido entre 1981 al 2010 ([National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA, 2016](#)).

Figura 15.

Temperatura promedio y percentiles de precipitación



Nota. (A) Gráfico de temperatura terrestre y marina promedio para el 2015 con respecto al periodo de 1981 – 2010 (B) Gráfico de percentiles de precipitación para el año. Figuras tomadas de la NOAA (2016).

Adicionalmente, para ese mismo año la NOAA informa que las lluvias anuales estuvieron 22.5 mm por debajo del promedio de 1961-1990. A través de la

Figura 15, sección B se muestra época de sequía para el este de Brasil, Colombia, Europa central, Sudáfrica, Mongolia y partes del sudeste asiático (National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA, 2016). Este tipo de sequias para el país es relacionada con el fenómeno ENSO del Niño.

Para el caso de la caracterización sísmica la ausencia de correlación estadísticas directa entre la sismicidad y la ocurrencia de MM no implica que los sismos no influyen los eventos. De acuerdo con lo establecido por Keefer (2002) los MM inducidos por sismos requieren magnitudes iguales o superiores a 4 Mw. Según la distribución de Poisson (

Figura 12) la probabilidad de que se presenten sismos de esta magnitud en el municipio de San Joaquín es significativa en una ventana de tiempo de aproximadamente 5 años, indicando que su ocurrencia es estadísticamente posible y debe considerarse el aspecto sísmico como un detonante potencial. Es probable que estos ocurran en una ventana de tiempo de aproximadamente 5 años, sin embargo, los sismos de esta magnitud no suelen ser comunes. Es por ello por lo que, coincidiendo con Valencia Ortiz & Martínez Graña (2023), la condición del detonante sísmico puede estar asociada a la acción combinada de la actividad sísmica y la pluvial. De esta manera, coincidiendo con Valencia Ortiz & Martínez Graña (2023), la condición del detonante sísmico puede estar asociada a la acción combinada de la actividad sísmica y la pluvial.

Los resultados obtenidos en el estudio adquieren una relevancia práctica en el ámbito de la gestión del riesgo, donde los umbrales caracterizados constituyen insumos de técnicos para el ordenamiento territorial. Estos resultados muestran un estimativo de lluvias con potencial de generar MM, la influencia del factor sísmico como detonante de MM y la probabilidad de la ocurrencia de lluvias en periodos de 25 años. Dicha información es útil en la implementación de sistemas de alerta temprana para protocolos de prevención y evacuación en caso de detectarse valores superiores a los umbrales establecidos, y priorizar intervenciones en infraestructura crítica.

9 Conclusiones

La presente investigación permitió caracterizar, por primera vez en el municipio de San Joaquín, umbrales cuantitativos de los factores de lluvia y sismo como factores detonantes de MM, aportando insumos técnicos de gran relevancia para la gestión de riesgo del municipio relacionándose con el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), al generar una línea base para estudios que permitan construir y diseñar entornos más seguros y resilientes ante la amenaza de los MM para el municipio de San Joaquín.

El análisis de las series meteorológicas del IDEAM evidenció que, si bien las lluvias en San Joaquín han mostrado históricamente un comportamiento estable

oscilante, a partir de 2019 se registra un incremento sostenido en la precipitación acumulada anual, que aumenta la susceptibilidad del terreno frente a procesos de inestabilidad, dado que las acumulaciones prolongadas de precipitación pueden conducir a condiciones críticas de saturación favorables a los movimientos en masa. A su vez, se resalta que las anomalías observadas en el registro meteorológico coinciden con las tendencias climáticas globales reportadas por el NOAA, lo que sitúa el fenómeno local dentro de un marco más amplio de variabilidad climática. En este contexto, los resultados se articulan con el ODS 13: (Acción por el Clima), al proveer evidencia científica que subraya la urgencia de fortalecer la resiliencia territorial y de promover estrategias de adaptación frente a los efectos del cambio climático.

A partir del análisis de los datos de las estaciones meteorológicas y la implementación de diferentes métodos estadísticos, se logró establecer que el factor lluvia constituye el principal detonante de MM, causando inestabilidad en el área de estudio, con un umbral de 40.54 mm para lluvias acumuladas en dos días previos al evento y de 205.72 mm para quince días antecedentes.

En cuanto a los sismos en el municipio de San Joaquín los eventos registrados y los resultados en el estudio muestran una tendencia a sismos de magnitudes bajas a moderadas (M0.7-M6.7). Mediante la distribución de Poisson se demostró que las magnitudes de 4.0 a 6.0 presentan altas probabilidades de recurrencia, en periodos de tiempo relativamente cortos, mientras que eventos de mayor magnitud son menos frecuentes. Al relacionar estos resultados con el PGA se determinó que San Joaquín se encuentra en la zona de amenaza sísmica intermedia, con valores de 0.20-0.25 g para un periodo de retorno de 475 años. La combinación de ambos factores, alta probabilidad de recurrencia de eventos de baja a moderada magnitud y niveles moderados de PGA representan un potencial detonante para MM, especialmente sumado a la saturación del suelo generado por eventos de lluvias.

En contraste con las lluvias la sismicidad no tiene una influencia directa en la ocurrencia MM en San Joaquín, sino que desempeña un papel indirecto en conjunto con lluvias intensas o prolongadas. Esto demuestra la importancia de abordar la caracterización de la amenaza mediante el análisis de diferentes factores y reconociendo sus interacciones.

Se estableció un Tr de 25 años para eventos de lluvia máxima en las zonas hidrográficas de la quebrada Panamá y El León. Mientras que para el factor sismo se estarían presentando eventos con potencial desencadenante cada 5 años, No obstante, debido a la baja densidad de registros con precisión a nivel de día, lo que imposibilitó establecer una relación directa entre sismos y MM. Esta ausencia de información detallada constituyó una de las principales limitantes del trabajo, pues, de haberse contado con dichos registros, hubiera sido factible alcanzar una mayor exactitud en la definición de umbrales de recurrencia. Esto se destaca, pues, pese a los esfuerzos y estrategias realizadas para mitigar esta limitante como la fotointerpretación a verificación en campo y la recopilación de información proveniente de distintas fuentes secundarias la carencia de datos redujo la posibilidad de obtener estimaciones de Tr más precisas.

10 Recomendaciones

Se recomienda a las entidades competentes fortalecer los mecanismos de seguimiento y control frente a la ocurrencia de MM en el municipio de San Joaquín, Santander. Para ello, resulta indispensable que se implemente un sistema de registro sistemático y estandarizado que contemple la ubicación, fecha de generación del evento y tipo de movimiento. Este formato ya ha sido creado por el SGC y se pueden encontrar en la *“Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa 1:25,000”*. La implementación de estos formatos ayudaría a consolidar una base de datos más robusta sobre este tipo de fenómenos tan recurrentes en el municipio de San Joaquín, lo que contribuiría de manera significativa a la obtención de resultados más sólidos que permitan la perfección de los modelos de recurrencia.

Se invita a realizar trabajos de control y un continuo mantenimiento a la estación meteorológica de San Joaquín, así como de aquellas localizadas en municipios aledaños. El aseguramiento de su operatividad continua evitaría que los datos meteorológicos presenten datos faltantes, lo que aseguraría poder trabajar con los datos originales y tener una visión más real del comportamiento de las lluvias en el territorio. Adicionalmente, se sugiere instalar más estaciones meteorológicas por la zona, preferiblemente, que estas cuenten con sensores milimétricos en los canales de los afluentes principales y en las partes altas de estos como una estrategia para tener control del caudal. Por otro lado, se propone la instalación de estaciones acelerométricas con el fin de registrar la aceleración

del suelo durante los sismos en tiempo real y así poder realizar una evaluación de amenaza sísmica mas detallada.

Se sugiere que los resultados de este estudio se integren dentro del Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de San Joaquín. Esta integración representa una herramienta estratégica para la gestión territorial, ya que, facilita la identificación de zonas críticas, promueve la delimitación de áreas de amenaza y permite orientar procesos de ocupación y uso del suelo de manera informada y responsable, además de ser insumo que permita sentar las bases para el desarrollo de un sistema de alertas tempranas (SAT). El incluir esta información en el EOT fortalece la capacidad institucional en la toma de decisiones, al dotar a las autoridades locales de criterios técnicos sólidos para la planificación del desarrollo sostenible, creando un entorno más seguro y resiliente ante la amenaza de MM, alineándose así con el ODS 11.

Se aconseja replicar este tipo de estudios, ya que se caracterizan por tener una rigurosa base científica y la solidez de sus bases de análisis, esto permite generar estudios de confianza que puedan ser utilizados como insumos técnicos para la toma de decisiones. Adicionalmente, se destaca que la metodología implementada no requiere de grandes costos, sino que se realiza a través de la implementación de bases de datos libres.

11 Referencias Bibliográficas

- Alguero, M. O. (11 de Junio de 2023). Invías comenzó la instalación de un nuevo paso en el corredor Onzaga – San Joaquín, Santander, por cuenta de un nuevo derrumbe. *Vanguardia*.
- Aon plc (NYSE: AON). (2025). *Q1 Global Catastrophe Recap*. Londres: Aon plc. Recuperado el Junio de 2025
- Arcila, M., García, J., Montejó, J., Eraso, J., Valcárcel, J., Mora, M., . . . Díaz, F. (2020). *Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia*. Servicio Geológico Colombiano.
- Aristizábal, E., González, T., Montoya, J. D., Vélez, J. I., Martínez, H., & Guerra, A. (2011). Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia. *Revista EIA*, 95–111. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372011000100009&lng=en&tlng=es.
- Aristizábal, E., Riaño, F., & Julián, J.-O. (2022). Umbrales de lluvia como detonante de movimientos. *Boletín de Geología*, 44(2), 183–197. doi:10.18273/revbol.v44n2-2022009
- Ayala García, J., & Dall'Erba, S. (2022). The impact of preemptive investment on natural disasters. *Papers in Regional Science*, 101(5), 1087-1103. doi:10.1111/pirs.12700
- Banco Mundial. (2010). *Repositorio: Banco Mundial*. Obtenido de Banco mundial: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/2512/578600SPANI>
- Bautista, E. P. (29 de Junio de 2022). En jaque habitantes de dos municipios de Santander por desbordamiento de quebrada. *Alerta Santanderes*.
- Beltrán, P., & Ballesteros, G. (2025). *Análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa entre los municipios de Mogotes y San Joaquín, Santander escala 1:25,000 aplicando la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano (2017)*. Tesis de pregrado. Obtenido de <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/45442>
- Caldera, H., Piyathise, V., & Nandalal, K. (2016). A Comparison of Methods of Estimating Missing Daily Rainfall Data. *Engineer Journal of the Institution of Engineers Sri Lanka*, 49(4), 1. doi:10.4038/engineer.v49i4.7232
- Castro, E., & Ibañez, D. (2024). *Avenidas Torrenciales y Flujos De Detritos En La Cuenca De La Quebrada La Leona, Municipio De San Joaquin*. Servicio Geológico Colombiano.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. Obtenido de https://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. -P., Fotopoulou, S., . . . Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide

- risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 209-263. doi:10.1007/s10064-013-0538-8
- Cruden, D., & Varnes, D. (1996). Landslide Types and Processes. In Special Report 247 Landslides Investigation and Mitigation. *Transportation Research Board, National Academy Press*, 39 - 75.
- De Silva, R., Dayawansa, N., & M. D., R. (1 de Mayo de 2007). A comparison of methods used in estimating missing rainfall data. *Journal of Agricultural Sciences*, 3(2), 101-108. doi:10.4038/jas.v3i2.8107
- DesInventar. (s.f.). <https://www.desinventar.org>. Obtenido de DesInventar.
- EM DAT. (12 de 03 de 2025). *Emergency Events Database (EM-DAT)*. Recuperado el 22 de Febrero de 2025, de <https://public.emdat.be/data>
- Gonzalez Yaruro, A. G., & Padilla Gutierrez, A. F. (2023). *Cálculo de la probabilidad temporal de las precipitaciones y relación temporal-espacial de la actividad sísmica como detonantes de movimientos en masa en el municipio de Herveo, Tolima*. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Obtenido de Repositorio Noesis: <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/15387>
- Gutenberg, B., & Richter, C. (1 de Abril de 1956). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration: (Second paper). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105-145. doi:10.1785/BSSA0460020105
- Han, D., & Bray, M. (2006). *Generación automatizada de polígonos de Thiessen*. Recursos hídricos.
- IDEAM. (2025). *Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos*. Obtenido de <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Jácome, D., & Quiroga, D. (2025). *Evaluación de los procesos de inestabilidad de laderas en las cuencas hidrográficas Panamá y El León en el municipio de San Joaquín, Santander, mediante la relación con parámetros morfométricos y morfoestructurales*.
- Keefer, D. (1984). *Landslides caused by earthquakes*.
- Keefer, D. (2002). *Investigating landslides caused by earthquakes - A historical review*.
- Mantilla Figueroa, L., & García Ramírez, C. (2018). Geología y geocronología de las litologías aflorantes en el tramo Mogotes-San Joaquín (sector SW del Macizo de Santander). *Boletín de Geología*, 38(1), 33-50. doi:10.18273/revbol.v38n1-2016002
- Mantilla, L. C., García, C. A., & Valencia, V. A. (2016). *Nuevas evidencias que soportan la escisión de la formación Silgará y propuesta de un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander (Cordillera Oriental de Colombia)*. Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Montealegre, J. (2009). *Técnicas estadísticas y aplicadas en el manejo de datos hidrológicos y meteorológicos*. Obtenido de ideam: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/009198/009198.pdf>

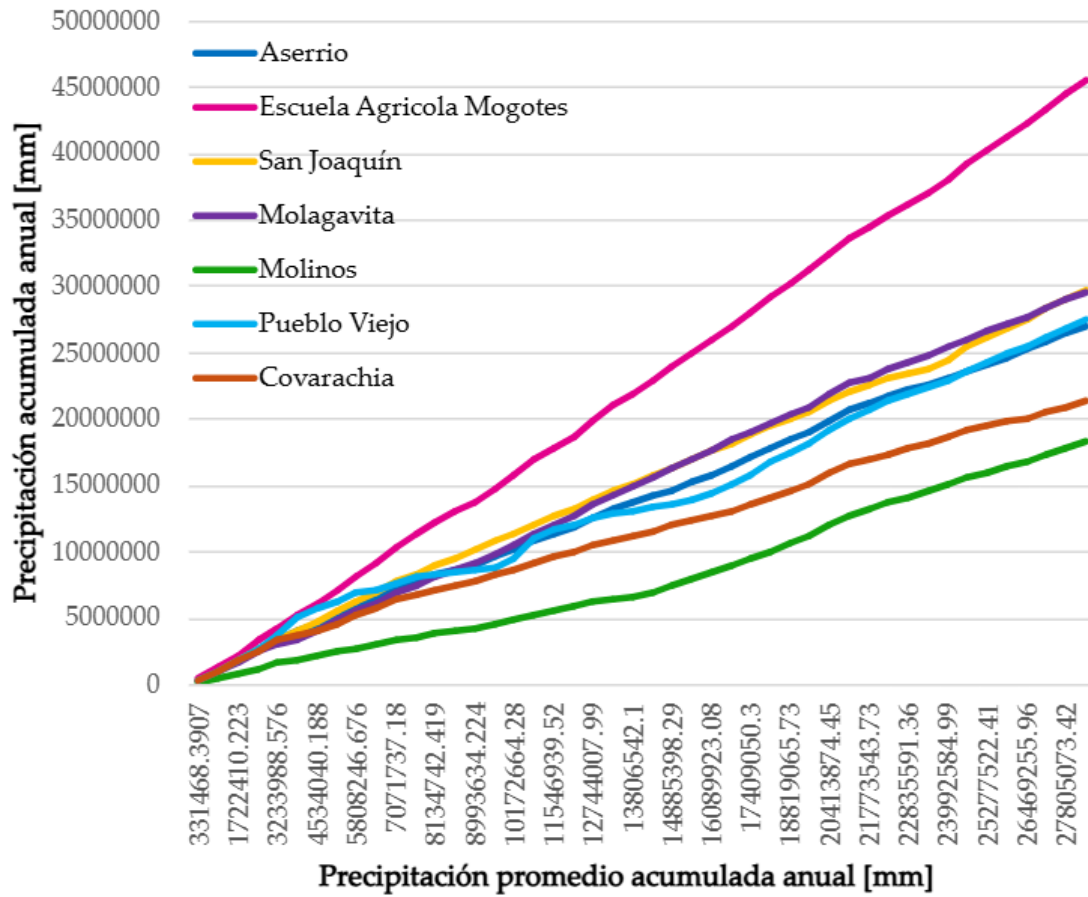
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. (2 de Enero de 2016). *National Centers of Environmental Information*. doi:<https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00672>
- ONU. (10 de Marzo de 2015). Obtenido de Objetivos y metas de desarrollo sostenible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/#>
- Pinto Duitama, K. (18 de Noviembre de 2024). Pérdidas económicas causadas por desastres naturales sumaron US\$258.000 millones. *La República*, págs. <https://www.larepublica.co/globoeconomia/perdidas-economicas-causadas-por-desastres-naturales-sumaron-us-258-000-millones-4000390>.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA: GCA). (2007). *Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas*. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería (Publicación Geológica Multinacional No. 4).
- Reichenbach, P. (1998). *Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (central Italy)*.
- Rodríguez Castiblanco, E., Sandoval Ramírez, J., Chaparro Cordón, J., Medina Bello, E., Ramírez Hernández, K., Castro Guerra, J., & Ruiz Peña, G. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000*. Bogotá D.C: SGC. doi:10.32685/9789585978225
- Rodríguez, C., Bommer, J., & Richard, C. (1999). *Earthquake-induced landslides: 1980-1997*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering.
- Schmitt, T., & Leydecker, G. (2015). *Calculation of Momento Magnitudes for the German Earthquake Catalogue*. TUV SUD Industrie Service GmbH, Munchen.
- Servicio Geológico Colombiano. (Septiembre de 2024). *Avenidas torrenciales y flujos de detritos en la cuenca de la quebrada La Leona, municipio de San Joaquín*. Informe técnico, SGC, Santander, Bucaramanga. Obtenido de <https://goo.su/W35AHP>
- SGC - SIMMA. (2025). *Sistema de Información de Movimiento en Masa - SIMMA*. Recuperado el 9 de marzo de 2025, de Servicio Geológico Colombiano: <https://simma.sgc.gov.co/#/>
- SGC. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa 1:25,000*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- SGC. (2025). *Sistema de Consulta de la Amenaza Sísmica de Colombia*. Obtenido de <https://amenazasismica.sgc.gov.co/>
- Thorn, H. (1966). Some methods of climatological analysis. *World Meteorological Organization*, 69 .

- United States Geological Survey. (2025). *Earthquake Hazards Program*. Obtenido de USGS: <https://goo.su/w9AGu4C>
- Valencia Ortiz, J. A., & Martínez Graña, A. M. (2023). Calculation of precipitation and seismicity thresholds as triggers for mass movements in the region of Bucaramanga, Colombia. *Ecological Indicators*, 152. doi:10.1016/j.ecolind.2023.110355.
- Vargas, H., Arias, T., Jaramillo, T., & Téllez, I. (1981). *Geología de las planchas 136 Málaga y 152 Soatá Cuadrángulo I-13*. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería.
- Velandia, F. (2017). *Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63257>
- Velandia, F., & Bermúdez, M. (2018). *The transpressive southern termination of the Bucaramanga fault (Colombia): Insights from geological mapping, stress tensors, and fractal analysis*. *Journal of Structural Geology*.
- Ven Te, C. D. (1988). *Applied hydrology*. Nueva York: McGraw-Hill Book.
- Vogel, R. (1986). *Prueba del coeficiente de correlación de la gráfica de probabilidad para las hipótesis de distribución normal, lognormal y de Gumbel*. Recursos Hídricos.

Apéndice A. Curvas doble masa

Figura A.

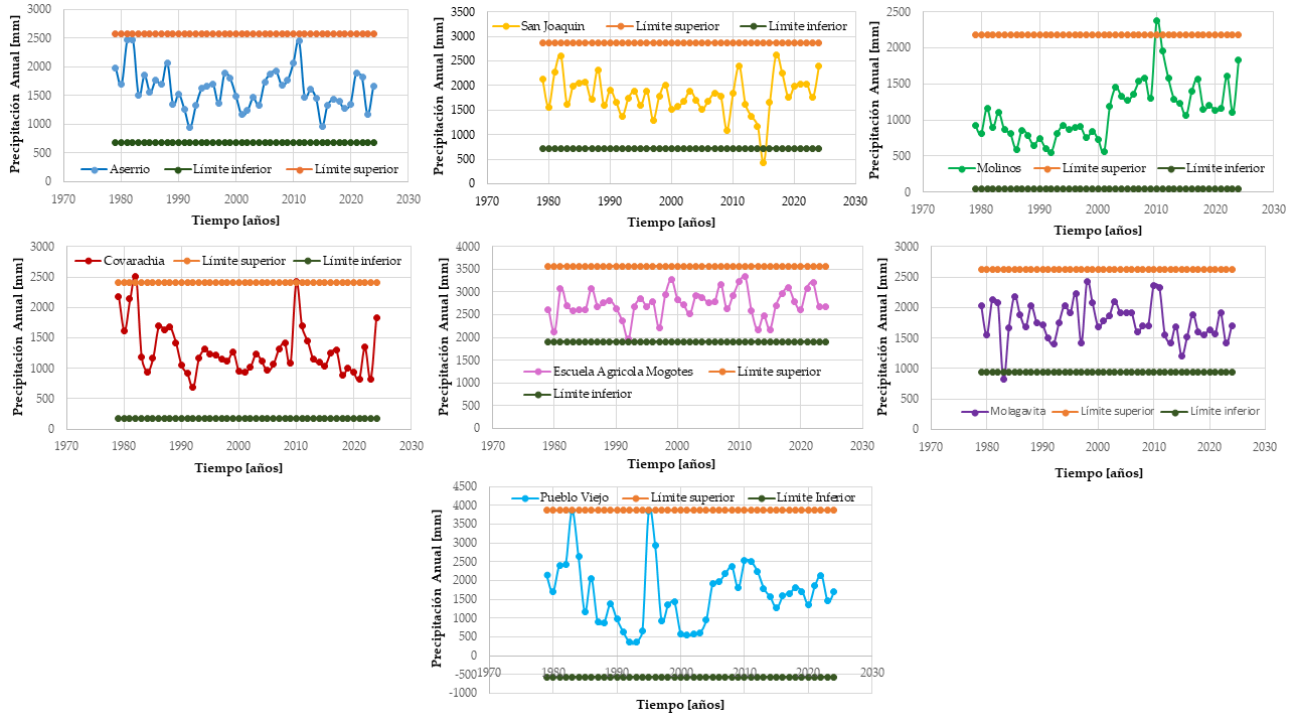
Análisis de consistencia de la serie temporal mediante la curva de doble masa para las estaciones presentes en el área de estudio



Apéndice B. Datos dudosos de la serie de lluvia.

Figura B.

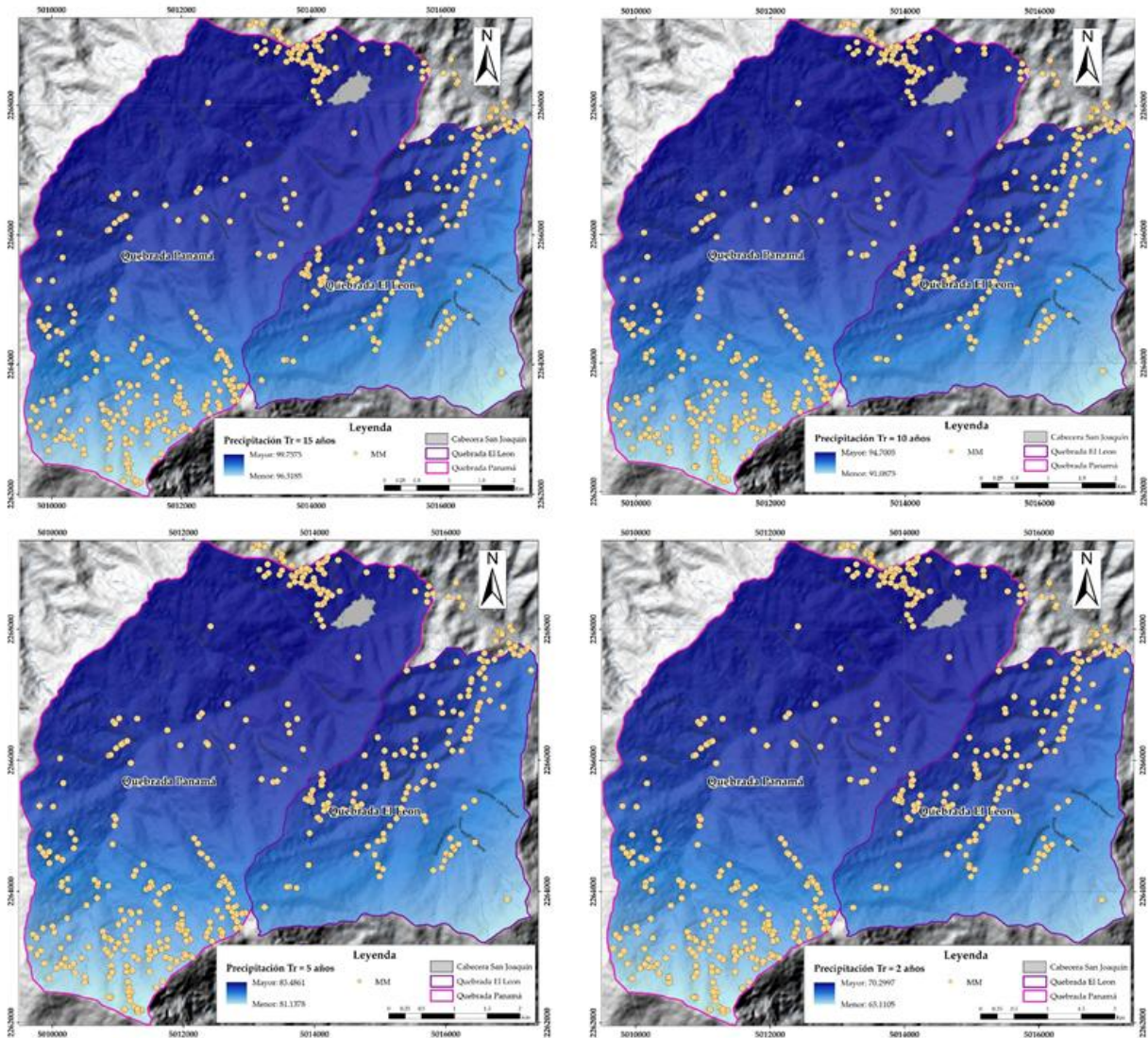
Prueba de consistencia de la serie temporal de cada estación a partir de la ecuación planteada por Chow et al (1988)



Apéndice C. Mapas de Tr

Figura C.

Distribución de lluvias máximas en las zonas hidrográficas de la Quebrada Panamá y el León para los periodos de retorno de 15, 10, 5 y 2 años.



Apéndice D. Análisis climático

Tabla D.

Distribución de lluvias máximas en las zonas hidrográficas de la Quebrada Panamá y el León para los periodos de retorno de 15, 10, 5 y 2 años.

AÑO	Grupo 1							AÑO	Grupo 2						
	Aserrio [24030850]	Escuela Agrícola Mogotes [24025040]	San Joaquín [24030200]	Molagavita [24030340]	Molinos [24030740]	Pueblo Viejo [24020230]	Covarachia [24030700]		Aserrio [24030850]	Escuela Agrícola Mogotes [24025040]	San Joaquín [24030200]	Molagavita [24030340]	Molinos [24030740]	Pueblo Viejo [24020230]	Covarachia [24030700]
1979	1974.62	2621.59	2138.00	2037.00	931.00	2153.47	2182.00	2002	1238.20	2517.40	1673.40	1865.60	1190.02	566.00	1025.60
1980	1694.01	2120.70	1566.00	1552.00	806.00	1701.08	1623.00	2003	1465.50	2931.90	1889.40	2099.00	1453.08	611.57	1241.50
1981	2475.00	3069.71	2274.00	2125.13	1164.00	2399.84	2152.00	2004	1336.70	2882.08	1707.20	1917.00	1332.30	960.26	1110.40
1982	2476.00	2700.20	2601.00	2084.48	892.00	2439.89	2510.00	2005	1738.20	2767.20	1519.30	1924.00	1271.09	1916.59	961.10
1983	1500.10	2593.72	1627.58	824.00	1105.96	3847.30	1178.75	2006	1883.20	2778.50	1689.10	1916.50	1363.80	1973.80	1070.20
1984	1855.40	2606.10	1997.00	1675.71	866.60	2646.72	941.00	2007	1933.66	3171.60	1851.80	1603.07	1540.87	2190.93	1323.68
1985	1563.40	2609.30	2054.00	2187.29	815.40	1174.00	1175.50	2008	1688.10	2632.80	1782.17	1699.20	1585.91	2364.68	1416.30
1986	1775.50	3070.80	2079.30	1876.92	594.80	2064.00	1698.10	2009	1767.90	2916.80	1091.30	1708.10	1307.29	1811.00	1093.40
1987	1692.20	2688.80	1730.00	1689.00	861.40	897.35	1638.88	2010	2064.00	3221.50	1839.51	2370.04	2379.21	2529.00	2423.10
1988	2074.20	2769.60	2325.00	2024.00	782.30	883.00	1681.60	2011	2456.80	3334.76	2397.09	2326.95	1963.97	2506.00	1695.30
1989	1349.60	2813.70	1600.00	1752.00	647.10	1373.87	1423.50	2012	1470.70	2591.70	1621.67	1551.44	1575.06	2244.10	1453.43
1990	1530.60	2641.30	1900.00	1723.00	743.20	979.00	1045.10	2013	1617.50	2166.23	1370.10	1421.40	1285.39	1793.42	1150.66
1991	1259.90	2360.60	1659.00	1495.90	609.70	637.96	914.50	2014	1452.46	2474.08	1171.39	1688.50	1237.74	1560.94	1099.74

1992	950.90	1959.20	1377.20	1406.00	553.80	363.30	695.90	2015	964.00	2173.50	427.80	1208.50	1058.55	1273.60	1043.18
1993	1333.20	2679.20	1748.30	1757.50	809.00	353.00	1165.70	2016	1337.80	2708.68	1656.60	1521.30	1403.71	1599.20	1246.40
1994	1624.40	2846.05	1876.90	2039.00	922.60	658.00	1317.70	2017	1441.10	2966.20	2617.63	1888.20	1571.40	1659.66	1308.00
1995	1667.10	2682.50	1603.10	1913.71	869.80	3845.72	1232.00	2018	1398.00	3097.18	2245.64	1605.50	1154.75	1822.00	886.90
1996	1705.70	2778.61	1879.10	2226.00	903.30	2930.00	1214.00	2019	1270.00	2792.60	1761.36	1546.60	1203.42	1705.00	1007.17
1997	1362,30	2207,50	1299,60	1424,00	904,10	938,00	1150,50	2020	1353,60	2606,60	1991,89	1639,50	1137,50	1356,00	936,71
1998	1892,50	2936,60	1776,10	2421,00	751,30	1344,00	1123,00	2021	1898,60	3084,20	2033,36	1563,50	1162,89	1871,00	827,30
1999	1799,81	3270,40	2004,40	2074,00	844,97	1436,07	1270,26	2022	1821,11	3203,60	2028,90	1910,10	1615,54	2141,00	1345,40
2000	1494,40	2838,30	1509,30	1692,00	729,50	591,00	953,60	2023	1179,30	2683,36	1762,20	1415,20	1108,51	1453,00	827,90
2001	1165,77	2715,00	1575,20	1789,00	559,00	541,00	944,10	2024	1662,28	2676,20	2407,50	1693,50	1836,45	1699,12	1835,04

Apéndice E. Pruebas de homogeneidad

Tabla E.

Resultados de las pruebas de homogenización mediante las pruebas T y F.

Pruebas	ASERRIO [24030850]	ESCUELA AGRICOLA MOGOTES [24025040]	SAN JOAQUIN [24030200]	MOLAGAVITA [24030340]	MOLINOS [24030740]	PUEBLO VIEJO [24020230]	COVARACHIA [24030700]
Prueba T	0.46174393	0.184123057	0.544033155	0.427313587	1.11804E-10	0.54641671	0.303272594
Prueba F	0.65080317	0.876720379	0.074737707	0.342547576	0.001750906	0.00216014	0.320866536
RESULTADOS							
Prueba T	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI
Prueba F	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI

Apéndice F. Prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado

Tabla F1.

Resultados de la aplicación de cada uno de los ajustes (Normal, Lognormal y Gumbel) para la estación Aserrio.

ASERRIO														
límites			Datos observados			Función Normal			Función Lognormal			Gumbell		
i	Li	Ls	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Función normal	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	Función Lognormal	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	Función Gumbell	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado
1	28.00	40.61	12	26.09%	26.09%	17.52%	8.06	1.93	23.06%	10.61	0.18	24.35%	11.20	0.06
2	40.61	53.23	20	43.48%	69.57%	26.21%	12.06	5.24	34.24%	15.75	1.15	31.00%	14.26	2.31
3	53.23	65.84	8	17.39%	86.96%	24.74%	11.38	1.00	23.13%	10.64	0.65	20.81%	9.57	0.26
4	65.84	78.46	3	6.52%	93.48%	14.74%	6.78	2.11	10.60%	4.88	0.72	10.52%	4.84	0.70
5	78.46	91.07	1	2.17%	95.65%	5.54%	2.55	0.94	3.99%	1.83	0.38	4.72%	2.17	0.63
6	91.07	103.69	0	0.00%	95.65%	1.31%	0.60	0.60	1.36%	0.62	0.62	2.01%	0.93	0.93
7	103.69	116.30	2	4.35%	100.00%	0.20%	0.09	40.50	0.44%	0.20	15.96	0.84%	0.39	6.74
Total			46	100.00%	200.00%	90.26%	41.52	52.32	96.81%	44.53	19.67	94.26%	43.36	11.62

Tabla F2.

Resultados de la aplicación de cada uno de los ajustes (Normal, Lognormal y Gumbel) para la estación Escuela Agrícola de Mogotes.

ESCUELA AGRÍCOLA MOGOTES

límites		Datos observados			Función Normal			Función Lognormal			Gumbell			
i	Li	Ls	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Función normal	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	Función Lognormal	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	Función Gumbell	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado
1	51.00	60.11	7	15.22%	15%	10.78%	4.96	0,84	12.40%	5.70	0.29	12.70%	5.84	0.23
2	60.11	69.23	15	32.61%	48%	19.07%	8.77	4.43	22.74%	10.46	1.97	26.44%	12.16	0.66
3	69.23	78.34	6	13.04%	61%	23.68%	10.89	2.20	24.51%	11.27	2.47	25.41%	11.69	2.77
4	78.34	87.46	7	15.22%	76%	20.64%	9.49	0.66	18.27%	8.40	0.23	16.58%	7.63	0.05
5	87.46	96.57	8	17.39%	93%	12.63%	5.81	0.82	10.50%	4.83	2.08	8.99%	4.13	3.62
6	96.57	105.69	1	2.17%	96%	5.43%	2.50	0.90	5.00%	2.30	0.73	4.47%	2.05	0.54
7	105.69	114.80	2	4.35%	100%	1.64%	0.75	2.07	2.08%	0.96	1.14	2.13%	0.98	1.06
			46	100.00%		93.86%	43.18	11.91	95.50%	43.93	8.92	96.71%	44.49	8.93

Tabla F3.

Resultados de la aplicación de cada uno de los ajustes (Normal, Lognormal y Gumbel) para la estación San Joaquín.

SAN JOAQUÍN															
límites			Datos observados			Función Normal			Función Lognormal			Gumbell			
i	Li	Ls	frecuencia	frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Función normal	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	Función Lognormal	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	Función Gumbell	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	
1	35	44	2	4.35%	4.35%	6.19%	2.85	0.25	6.14%	2.82	0.24	3.74%	1.72	0.05	
2	44	53	8	17.39%	21.74%	14.17%	6.52	0.34	17.72%	8.15	0.00	19.19%	8.83	0.08	
3	53	62	12	26.09%	47.83%	22.28%	10.25	0.30	24.89%	11.45	0.03	28.63%	13.17	0.10	
4	62	71	10	21.74%	69.57%	24.06%	11.07	0.10	22.10%	10.17	0.00	22.65%	10.42	0.02	
5	71	80	6	13.04%	82.61%	17.84%	8.21	0.59	14.52%	6.68	0.07	13.20%	6.07	0.00	
6	80	89	6	13.04%	95.65%	9.08%	4.18	0.79	7.79%	3.58	1.63	0.07	3.07	2.79	
7	89	98	2	4.35%	100.00%	3.17%	1.46	0.20	3.64%	1.67	0.06	0.03	1.46	0.20	
			46				2.58			2.03			3.24		

Tabla F4.

Resultados de la aplicación de cada uno de los ajustes (Normal, Lognormal y Gumbel) para la estación Molagavita.

MOLAGAVITA														
limites			Datos observados			Función Normal			Función Lognormal			Gumbell		
i	Li	Ls	frecuencia	frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Función normal	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	Función Lognormal	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	Función Gumbell	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado
1	38.00	45.46	11	23.91%	23.91%	12.87%	5.92	4.36	15.43%	7.10	2,14	16.96%	7.80	1.31
2	45.46	52.91	11	23.91%	47.83%	20.79%	9.57	0.22	24.90%	11.46	0,02	27.59%	12.69	0.23
3	52.91	60.37	11	23.91%	71.74%	23.62%	10.86	0.00	23.89%	10.99	0,00	23.40%	10.76	0.01
4	60.37	67.83	4	8.70%	80.43%	18.85%	8.67	2.52	16.17%	7.44	1,59	14.38%	6.62	1.03
5	67.83	75.29	7	15.22%	95.65%	10.57%	4.86	0.94	8.62%	3.96	2,32	7.59%	3.49	3.53
6	75.29	82.74	0	0.00%	95.65%	4.16%	1.92	1.92	3.89%	1.79	1,79	3.72%	1.71	1.71
7	82.74	90.20	2	4.35%	100.00%	1.15%	0.53	4.08	1.56%	0.72	2,29	1.77%	0.81	1.73
			46	100.00%		92.02%	42.33	14.03	94.47%	43.46	10,16	95.40%	43.88	9.56

Tabla F5.

Resultados de la aplicación de cada uno de los ajustes (Normal, Lognormal y Gumbel) para la estación Molinos.

MOLINOS														
límites			Datos observados			Función Normal			Función Lognormal			Gumbell		
i	Li	Ls	frecuencia	frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Función normal	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	Función Lognormal	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	Función Gumbell	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado
1	26.93	38.02	21	45.65%	45.65%	24%	11.11	8.79	33.47%	15.39	2.04	33.16%	15.25	2.17
2	38.02	49.11	14	30.43%	76.09%	30%	13.88	0.00	33.13%	15.24	0.10	29.96%	13.78	0.00
3	49.11	60.20	9	19.57%	95.65%	21%	9.74	0.06	16.64%	7.66	0.24	15.62%	7.18	0.46
4	60.20	71.29	1	2.17%	97.83%	8%	3.84	2.10	6.02%	2.77	1.13	6.56%	3.02	1.35
5	71.29	82.38	0	0.00%	97.83%	2%	0.85	0.85	1.85%	0.85	0.85	2.54%	1.17	1.17
6	82.38	93.47	0	0.00%	97.83%	0%	0.11	0.11	0.53%	0.24	0.24	0.95%	0.44	0.44
7	93.47	104.56	1	2.17%	100.00%	0%	0.01	135.26	0.15%	0.07	12.94	0.35%	0.16	4.32
			46			86%	39.54	147.18	91.80%	42.23	17.55	89.14%	41.00	9.90

Tabla F6.

Resultados de la aplicación de cada uno de los ajustes (Normal, Lognormal y Gumbel) para la estación Pueblo Viejo.

PUEBLO VIEJO

i	límites		Datos observados			Función Normal			Función Lognormal			Gumbell		
	Li	Ls	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Función normal	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	Función Lognormal	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	Función Gumbell	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado
1	8.00	21.14	10	21.74%	21.74%	12%	5.46	3.78	23.26%	10.70	0.05	16.07%	7.39	0.92
2	21.14	34.29	8	17.39%	39.13%	18%	8.30	0.01	25.92%	11.92	1.29	24.26%	11.16	0.89
3	34.29	47.43	14	30.43%	69.57%	21%	9.60	2.02	17.87%	8.22	4.07	21.77%	10.02	1.58
4	47.43	60.57	5	10.87%	80.43%	18%	8.44	1.41	11.19%	5.15	0.00	14.82%	6.82	0.48
5	60.57	73.71	2	4.35%	84.78%	12%	5.65	2.36	6.92%	3.18	0.44	8.74%	4.02	1.01
6	73.71	86.86	4	8.70%	93.48%	6%	2.87	0.44	4.33%	1.99	2.02	4.78%	2.20	1.47
7	86.86	100.00	3	6.52%	100.00%	2%	1.11	3.21	2.76%	1.27	2.35	2.52%	1.16	2.91
			46	100.00%		90%	41.44	13.22	92.24%	42.43	10.23	92.97%	42.76	9.28

Tabla F7.

Resultados de la aplicación de cada uno de los ajustes (Normal, Lognormal y Gumbel) para la estación Covarachía.

COVARACHÍA														
límites			Datos observados			Función Normal			Función Lognormal			Gumbell		
i	Li	Ls	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Función normal	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	Función Lognormal	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado	Función Gumbell	Frecuencias esperadas	Chi cuadrado
1	31	46	15	32.61%	32.61%	18.59%	8.55	4.87	24.68%	11.35	1.17	39.46%	18.15	0.55
2	46	61	15	32.61%	65.22%	28.87%	13.28	0.22	34.72%	15.97	0.06	45.39%	20.88	1.66
3	61	76	10	21.74%	86.96%	25.87%	11.90	0.30	22.23%	10.22	0.00	27.39%	12.60	0.54
4	76	91	4	8.70%	95.65%	13.37%	6.15	0.75	9.81%	4.51	0.06	12.55%	5.77	0.54
5	91	106	1	2.17%	97.83%	3.98%	1.83	0.38	3.61%	1.66	0.26	5.15%	2.37	0.79
6	106	121	0	0.00%	97.83%	0.68%	0.31	0.31	1.22%	0.56	0.56	2.03%	0.93	0.93
7	121	136	1	2.17%	100.00%	0.07%	0.03	30.45	0.39%	0.18	3.69	0.78%	0.36	1.13
			46	100.00%		91.43%	42.06	37.29	96.65%	44.46	5.81	132.76%	61.07	6.14

Apéndice G. Recopilación de valores de Chi Cuadrado.

Tabla G1.

Selección del mejor ajuste para cada estación meteorológica.

Estación	Valor de Chi Cuadrado		
	Función normal	Función lognormal	Gumbell
Máx. de ASERRIO [24030850]	Rechazado	Rechazado	Rechazado
Máx. de ESCUELA AGRICOLA MOGOTES [24025040]	Rechazado	8.92350137	8,92816691
Máx. de SAN JOAQUIN [24030200]	2.57674533	2.03266759	3.23809543
Máx. de MOLAGAVITA [24030340]	Rechazado	Rechazado	Rechazado
Máx. de MOLINOS LOS [24030740]	Rechazado	Rechazado	Rechazado
Máx. de PUEBLO VIEJO [24020230]	Rechazado	Rechazado	9.28449505
Máx. de COVARACHIA [24030700]	Rechazado	5.81002285	6.13978554

Apéndice H. Periodos de retorno.

Tabla H.

Análisis estadístico de los periodos de retorno de cada estación y ajuste de bondad mediante el método Chi-Cuadrado. Las estaciones con negrilla corresponden al ajuste de Gumbel y las de blanco corresponden a Lognormal.

Tr (Años)	Valor extremo para un T ASERRI O	Valor extremo para un T ESCUELA AGRICOLA	Valor extremo para un T SAN JOAQUÍN	Valor extremo para un T MOLAGAVI TA	Valor extremo para un T MOLINO S	Valor extremo para un T PUEBLO VIEJO	Valor extremo para un T COVARACHIA
2	48.66	72.33	61.46	53.57	39.96	37.19	54.77
3	56.28	78.64	67.50	58.74	45.92	47.57	63.02
5	64.77	85.67	74.23	64.50	52.55	59.14	72.21
10	75.43	94.50	82.68	71.74	60.89	73.66	83.76
25	88.90	105.66	93.36	80.88	71.43	92.02	98.36
50	98.90	113.94	101.28	87.66	79.24	105.64	109.18
100	108.82	122.15	109.15	94.39	87.00	119.15	119.93