

**INFLUENCIA DEL FENÓMENO EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS) EN
SUS FASES EXTREMAS EN LAS LLUVIAS Y LOS MOVIMIENTOS EN MASA
EN EL DEPARTAMENTO DE NARIÑO**

Estudiante
Miguel Ángel López López

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
INGENIERO CIVIL



Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Programa de Ingeniería Civil
Santiago de Cali, Colombia
2025

**INFLUENCIA DEL FENÓMENO EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR (ENOS) EN
SUS FASES EXTREMAS EN LAS LLUVIAS Y LOS MOVIMIENTOS EN MASA
EN EL DEPARTAMENTO DE NARIÑO**

Estudiante
Miguel Ángel López López

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
INGENIERO CIVIL

Codirectoras:
Lina María Ospina Ostios, Ph.D
Isabel Cristina Gómez Gutiérrez, Ph.D

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Programa de Ingeniería Civil
Santiago de Cali, Colombia
2025

Nota de aceptación

Carlos Alberto Madera. Ph.D.
Universidad del Valle
Director de pregrado Ingeniería Civil

Firma del evaluador 1

Firma del evaluador 2

Lina María Ospina Ostios, Ph.D.
Universidad del Valle
Codirectora

Isabel Cristina Gómez Gutiérrez, Ph.D.
Universidad del Valle
Codirectora

AGRADECIMIENTOS

Estimados profesores, compañeros y seres queridos,

En este día de culminación de mi trabajo de grado, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que han desempeñado un papel esencial en este significativo capítulo de mi vida académica.

Quiero extender mi gratitud a mis directoras por su orientación experta, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proceso. Sus enseñanzas y guía han sido invaluable para el desarrollo de mi investigación.

A mi familia y amigos, su amor incondicional y aliento constante han sido mi fortaleza. Aprecio su comprensión durante mis ausencias y la celebración de cada pequeño logro en este camino.

Este logro no habría sido posible sin el respaldo de todos ustedes. Cada uno ha dejado una huella imborrable en mi trayectoria académica, y les agradezco profundamente por su contribución a mi éxito.

*Con sincera gratitud,
Miguel Angel Lopez Lopez*

RESUMEN

Nariño es una región geográficamente vulnerable con antecedentes de movimientos en masa (MM) asociados a lluvias extremas. Esta situación de riesgo resalta la necesidad de comprender los eventos climáticos que agravan el problema. En este contexto, surge el interés por estudiar la influencia del Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en sus fases extremas sobre las precipitaciones y la ocurrencia de MM en el departamento. Para analizar esta relación, se realizó un estudio basado en series de tiempo y en la obtención del coeficiente de correlación de Pearson, utilizando una ecuación programada en Python con las bibliotecas Pandas y Numpy. Se recopilieron datos históricos de precipitaciones del IDEAM, registros de MM de la base DesInventar y datos sobre la intensidad del ENOS proporcionados por la NOAA, abarcando el periodo 2006-2015.

Los resultados evidenciaron la necesidad de segmentar el análisis en dos regiones: la Pacífica y la Andina debido a las diferencias geológicas y climáticas de cada una. A través de un análisis de series temporales, se observó que, a pesar de las condiciones altamente húmedas y lluviosas de la región Pacífica del departamento de Nariño, no existe una relación clara entre el ENOS y los MM. Esto se puede explicar teniendo en cuenta que la Zona Pacífica se caracteriza por extensas llanuras planas, que finalmente representan un riesgo relativamente bajo para este tipo de eventos. En contraste, la región Andina sí mostró una correlación significativa entre la fase La Niña y un aumento en la ocurrencia de MM.

Este enfoque integral ofrece perspectivas valiosas para la planificación y gestión de riesgos por MM en la región y en general para otros lugares del país. Los hallazgos obtenidos no solo enriquecen el conocimiento sobre la relación entre los MM, el ENOS y las precipitaciones en Nariño, sino que también destacan la utilidad del empleo de las herramientas estadísticas implementadas en Python para abordar problemáticas ambientales complejas.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN.....	5
TABLA DE CONTENIDO	6
TABLA DE TABLAS.....	7
TABLA DE FIGURAS	7
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. OBJETIVOS	10
1.1.1. Objetivo General	10
1.1.2. Objetivos Específicos	10
1.2. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.....	10
2. MARCO DE REFERENCIA	11
2.1. MARCO TEÓRICO	11
2.1.1. Conceptos Relacionados con Riesgos Geológicos	11
2.1.2. Conceptos Relacionados con El Niño Oscilación del Sur (ENOS).....	14
2.1.3. Conceptos Relacionados con Análisis de Datos.....	16
2.1.4. Localización del Área de Estudio.....	18
2.2. ANTECEDENTES	21
3. METODOLOGÍA	30
3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	30
3.1.1. Base de Datos Historial de Movimientos en Masa.....	30
3.1.2. Base de Datos Variable ENOS	33
3.1.3. Base de Datos Información Climatológica	34
3.2. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	36
3.2.1. Cartográfico.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2.2. Series de Tiempo	38
3.2.3. Coeficiente de Correlación	39
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	40
4.1. CARTOGRÁFICO	¡Error! Marcador no definido.
4.2. SERIES DE TIEMPO	40
4.2.1. Análisis Zona Andina.....	40
4.2.2. Análisis Zona Pacífica.....	42
4.2.3. Análisis Nariño.....	44
4.3. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	47

5.	CONCLUSIONES	51
7.	REFERENCIAS	52
8.	ANEXOS.....	56

TABLA DE TABLAS

Tabla 1: Comportamiento de caudales máximos, medios y mínimos medios anuales en algunos ríos del Valle del Río Cauca.....	28
Tabla 2: Número final de eventos por municipio obtenidos de los 543 registros de DesInventar. ...	56
Tabla 3: Resumen datos ingresados en base de datos DHIME del IDEAM para obtener información de la precipitación en estaciones meteorológicas del departamento de Nariño	34
Tabla 4: Lista 100 estaciones meteorológicas del departamento de Nariño obtenidas de la base de datos del IDEAM para el periodo de estudio.	56
Tabla 5: Listado de las 57 estaciones meteorológicas del departamento de Nariño con datos en los 121 meses	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 6: Listado de las 27 estaciones meteorológicas del departamento de Nariño escogidas para la investigación, coordenadas y área de influencia de su polígono de Thiessen asociado.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 7: Estaciones meteorológicas relacionadas para la obtención de datos faltantes.	58
Tabla 8: Número de eventos por polígono de Thiessen Zona Andina del departamento de Nariño	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 9: Número de eventos por polígono de Thiessen Zona Pacífica del departamento de Nariño	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 10: Listado de las 21 estaciones meteorológicas finales del departamento de Nariño; coordenadas y área de influencia de su respectivo polígono de Thiessen asociado.	37

TABLA DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de deslizamientos según el tipo de movimientos (adaptado de Varnes, 1958)	12
Figura 2: Ejemplo de la representación gráfica de los coeficientes de Pearson obtenidos en el análisis entre dos variables cuando SI existe correlación. Obtenido de https://www.cimec.es	18
Figura 3: Ejemplo de la representación gráfica de los coeficientes de Pearson obtenidos en el análisis entre dos variables cuando NO existe correlación. Obtenido de https://www.cimec.es	18
Figura 4: Ilustración adaptada de (Canchala, Alfonso-Morales, Carvajal-Escobar, et al., 2020)	19
Figura 5: Localización geográfica del área de estudio y su distribución por regiones. Ilustración adaptada de (Canchala, Alfonso-Morales, Carvajal-Escobar, et al., 2020).....	20
Figura 6: Mapa global de impacto dónde ENOS impacta más fuertemente la exposición de la población a los peligros de deslizamientos de tierra. Tomado de Emberson et al. (2021).....	22
Figura 7: Distribución total de los detonantes identificados en los registros de FRM.....	23
Figura 8: Variación interanual de la lluvia y los movimientos en masa en el departamento de Antioquia, asociado a las fases del ENOS, Tomado de Naranjo et al. (2019).	25
Figura 9: Número de deslizamientos por año. Tomado de Moreno et al. (2006).....	26

Figura 10: Distribución mensual de los movimientos en masa ocurridos en Colombia durante los fenómenos cálido 1997-1998 y frío 1998-2000 del Pacífico	27
Figura 11: DESINVENTAR, vista de página con base de datos de interés.	31
Figura 16: SIMMA, vista base de datos registros de MM.	31
Figura 17: Cantidad de Movimientos en Masa en Nariño vs. Año de registro.	32
Figura 21: NOAA, Vista página principal	33
Figura 22: NOAA, Vista de registros.....	33
Figura 23: Valores MEI.V2 mensuales en la ventana temporal de estudio.....	34
Figura 18: DHIME, vista página principal.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 19: DHIME, vista portal interactivo bases de datos	¡Error! Marcador no definido.
Figura 20: Comparación polígonos de Thiessen entre el total de las estaciones meteorológicas (57) versus estaciones escogidas (27)	35
Figura 24: Diagrama de red de estaciones meteorológicas del departamento de Nariño.....	38
Figura 25: Mapa polígonos de Thiessen 27 estaciones meteorológicas – eventos de MM.....	36
Figura 26: Mapa polígonos de Thiessen 21 estaciones meteorológicas – eventos de MM.....	37
Figura 27: Gráfico de precipitación, ENOS y MM mensual de Zona Andina del departamento de Nariño.....	41
Figura 28: Grafico de precipitación, ENOS y MM anual de Zona Andina del departamento de Nariño	42
Figura 29: Grafico de precipitación, ENOS y MM mensual de Zona Pacífica del departamento de Nariño.....	43
Figura 30: Grafico de precipitación, ENOS y MM anual de Zona Pacífica del departamento de Nariño	44
Figura 31: Gráfico de precipitación, ENOS y MM mensual del departamento de Nariño	45
Figura 32: Grafico de precipitación, ENOS y MM anual del departamento de Nariño	46
Figura 33: Diagrama de cajas y bigotes entre las variables de estudio para la Zona Pacífica del departamento de Nariño	47
Figura 34: Distribucion de MM según la fase de ENOS en la Zona Pacífica del departamento de Nariño.....	48
Figura 35: Matriz de correlación de Pearson entre las variables de estudio con datos completos	49
Figura 36: Matriz de correlación de Pearson entre las variables de estudio sin datos de precipitación cuando $MM < 1$	49

1. INTRODUCCIÓN

Los daños causados por fenómenos geológicos tales como terremotos, erupciones volcánicas y movimientos en masa, ocurren desde épocas remotas, provocando pérdidas de vidas humanas y daños materiales (Ogura & Soares Macedo, 2005). De acuerdo con la OMS¹ (Organización Mundial de la Salud), los movimientos en masa están más extendidos que cualquier otro evento geológico y pueden ocurrir en cualquier parte del mundo. Se producen cuando grandes masas de suelo, rocas o detritos o mezcla de ellos, descienden pendiente abajo por acción de la gravedad como consecuencia de las lluvias, los sismos o acciones antrópicas. Las precipitaciones se consideran como uno de los factores detonantes de los movimientos en masa (Moreno et al., 2006).

Colombia, por su localización en la región Andina de Sur América, se destaca como un país con una geografía diversa y susceptible a desastres. En este territorio, los Andes se ramifican en tres cordilleras que atraviesan el país de sur a norte, albergando actualmente la mayor densidad poblacional del país (Díaz Collazos, 2015), situación que le da especial relevancia a la seguridad geográfica de esta área. Sin embargo, las características geológicas de los Andes como el relieve topográfico abrupto, actividad sísmica y extenso volcanismo, combinado con una meteorización profunda, han generado una alta e inusual incidencia de amenazas por movimientos en masa. De hecho, uno de los peores desastres asociados a movimientos en masa en el mundo ocurrió en la región Andina colombiana: El lahar de Armero de 1985, con 23.000 víctimas (GEMMA, 2007).

Según la UGNRD² (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastre), en Colombia en los últimos 100 años en zonas de laderas, se han registrado más de 11.800 eventos asociados a movimientos en masa. Debido a esto, cerca de 7.590 personas han perdido la vida y aproximadamente 239.740 familias se han visto afectadas, siendo Nariño el departamento más damnificado. Por ejemplo, durante el primer trimestre del año 2022 el departamento atravesó una emergencia ocasionada por las lluvias donde 3 personas fallecieron por deslizamientos de tierra, esto de acuerdo con la entrevista de Caracol Radio (Gomez & Ortega, 2022) al Gobernador de Nariño Jhon Rojas.

Siendo la lluvia un desencadenante de los movimientos en masa; es importante estudiar las implicaciones del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en un país como Colombia cuya ubicación tropical y proximidad al Océano Pacífico la hacen susceptible a los cambios climáticos ocasionados por este (Lindsey, 2021). Este fenómeno puede presentarse en dos fases: “El Niño” que ocurre cuando aumentan las temperaturas en el océano pacífico -por ende, aumentan las sequías- y “La Niña” que ocurre cuando disminuye la temperatura en el océano pacífico -aumentan las precipitaciones- (Puertas Orozco & Carvajal Escobar, 2008). Puntualmente, las consecuencias del Fenómeno de “La Niña” en los años 2010-2011 generaron grandes afectaciones en todos los sectores productivos de Colombia. Este evento causó inundaciones en las zonas planas y movimientos en masa en las zonas de ladera, afectando más del 90% de los municipios del país (Montero Olarte, 2017). Por lo anterior, es necesario establecer una relación entre los movimientos en masa y el fenómeno macroclimático ENOS para plantear medidas de seguridad necesarias que apoyen los sistemas de alertas tempranas con el fin de reducir los impactos negativos de la región.

¹ [Deslizamientos \(who.int\)](https://www.who.int/)

² [Riesgo por movimientos en masa en Colombia \(gestiondelriesgo.gov.co\)](https://gestiondelriesgo.gov.co/)

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Identificar la influencia de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en las lluvias y los movimientos en masa en el departamento de Nariño.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Recolectar información de las bases de datos oficiales sobre períodos de ENOS (NOAA), precipitaciones (IDEAM) y movimientos en masa (DESINVENTAR), disponibles para la zona de estudio.
- Estudiar la relación entre los ciclos del ENOS en sus fases extremas, movimientos en masa, y precipitaciones en el departamento de Nariño con base en la información obtenida de las diferentes bases de datos.
- Determinar la influencia de los ciclos ENOS en sus fases extremas con las precipitaciones y la ocurrencia de movimientos en masa en el departamento de Nariño.

1.2. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

Para una comprensión integral de esta investigación, el presente documento estructura la información en seis capítulos. En el primero, se presenta una introducción que contextualiza y destaca la relevancia del proyecto. El segundo capítulo aborda el marco de referencia que contiene el marco teórico y los antecedentes. En el marco teórico se proporcionan definiciones y explicaciones esenciales para comprender los temas que se discuten a lo largo del documento, en especial para la comprensión de la metodología y los resultados de la investigación. Con estos conceptos claros, el lector está preparado para explorar los Antecedentes o el estado del arte. Aquí, se resumen trabajos previos que han servido de guía y referencia para el proyecto, ofreciendo ejemplos concretos de investigaciones afines y un panorama actual de los conocimientos alcanzados en la literatura en el tema de estudio.

El tercer capítulo presenta la metodología utilizada por el autor en el desarrollo de la investigación, incluyendo detalles sobre los materiales, equipos, y el orden de ejecución de las actividades. Los resultados obtenidos y sus análisis se presentan en el capítulo cuatro, permitiendo al lector evaluar la satisfacción de los resultados y validar el progreso de la investigación.

En el quinto capítulo, se encuentran las conclusiones, donde se condensa la información más relevante, especialmente la de los resultados obtenidos. Finalmente, en el sexto capítulo, se presentan las referencias bibliográficas utilizadas a lo largo del proyecto, proporcionando a los lectores la posibilidad de ampliar y verificar los datos presentados en el documento.

2. MARCO DE REFERENCIA

Este capítulo se divide en dos apartados: Marco Teórico y Antecedentes. El primero consta de definiciones y explicaciones a los conceptos que se usaron en la investigación (Movimientos en masa, detonantes, ENOS, etc.); En el segundo, se relacionan antecedentes o estado del arte para esta investigación, donde se hace un breve resumen de trabajos previos que han servido de guía metodológica y referencias para este trabajo.

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Conceptos Relacionados con Riesgos Geológicos

2.1.1.1. Riesgo

El riesgo se entiende como la posibilidad de que ocurra un evento adverso con consecuencias negativas para la vida, la salud, los bienes o el medio ambiente. Se refiere a los daños potenciales que pueden generarse ante la materialización de una amenaza. En el contexto geológico, estos riesgos corresponden a fenómenos naturales que representan un peligro cuando las personas se establecen en áreas donde ocurren con frecuencia. Según su origen, los riesgos geológicos pueden clasificarse en dos grandes categorías: los endógenos, que surgen de la actividad interna del planeta, como los terremotos, erupciones volcánicas y maremotos, y los exógenos, que están relacionados con procesos superficiales, como los deslizamientos y la erosión (Ávila et al., 2016), (Tarbuck & Lutgens, 2005), (Ogura & Soares Macedo, 2005).

2.1.1.2. Amenaza

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) define la amenaza como la probabilidad de que ocurra un evento físico o una condición peligrosa, ya sea de origen natural o inducido por la actividad humana, que pueda generar pérdidas humanas, afectar la salud, causar daños en bienes e infraestructura, comprometer medios de sustento o deteriorar los recursos naturales (SGC & MinMinas, 2017).

2.1.1.3. Vulnerabilidad

La Ley 1523 de 2012 define la vulnerabilidad como la “susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional de una comunidad para sufrir efectos adversos o ser afectada por un evento físico peligroso”. Esta vulnerabilidad se relaciona con la predisposición a sufrir pérdidas o daños en los sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo, así como en los medios de subsistencia de los seres humanos que pueden ser impactados por estos eventos peligrosos.

2.1.1.4. Movimientos en masa

Los movimientos en masa (MM) constituyen una amenaza geológica y se caracterizan por el desplazamiento de masas de suelo, rocas o escombros a lo largo de una pendiente (Cruden, 1991). Estos fenómenos forman parte de los procesos de modelado del relieve terrestre y pueden originarse debido a diversos factores geológicos, hidrometeorológicos, químicos y mecánicos que interactúan en la superficie terrestre y su relación con la hidrósfera y la atmósfera (GEMMA, 2007).

Un MM ocurre cuando las fuerzas que estabilizan una ladera son superadas por aquellas que generan inestabilidad. Entre los factores desestabilizadores más relevantes se encuentran el incremento en la presión de poros del suelo debido a lluvias intensas, la meteorización, las vibraciones sísmicas y la sobrecarga por actividades humanas. Cuando estos elementos reducen la resistencia al corte del suelo,

la pendiente colapsa y se reconfigura hacia una condición más estable y de menor inclinación. Esto implica que la posibilidad de ocurrencia de un deslizamiento está presente desde la formación natural de una ladera o la construcción de un talud artificial (GEMMA, 2007), (Duque Escobar, 2022).

A raíz de la ocurrencia de desastres de origen socio-natural, se han expedido en Colombia reglamentaciones relacionadas con la administración y desarrollo físico del territorio, la utilización del suelo y la gestión del riesgo de desastres. Las normas de ordenamiento territorial en Colombia se rigen por diversas leyes y decretos nacionales, como la Ley 388 de 1997, la Ley 1523 de 2012 y los decretos 1807 de 2014 y 1077 de 2015 (SGC & MinMinas, 2017).

La clasificación de los movimientos en masa ha sido abordada desde diferentes perspectivas, y la mayoría de los estudios consideran criterios como el mecanismo de falla, el tipo de material involucrado, la actividad y velocidad del desplazamiento. Algunos enfoques adicionales incluyen factores como la edad del evento, las características geomorfológicas (pendiente), la ubicación geográfica, el clima y la influencia de la intervención humana en laderas, cauces o taludes artificiales (Montero Olarte, 2017).

Entre los sistemas de clasificación más reconocidos a nivel internacional se encuentran los propuestos por Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988) ampliamente utilizados en países de habla inglesa e hispana. Varnes basa su clasificación en dos criterios principales: el tipo de movimiento y el material involucrado, estableciendo cinco categorías de movimientos en masa: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones y flujos (Ver Figura 1). Además, diferencia los materiales en rocas y suelos, dividiendo estos últimos en detritos y tierra. Esta metodología permite describir diversas combinaciones de movimiento y material (GEMMA, 2007). En Colombia, el SGC adopta la clasificación de Varnes (1958) como referencia en su guía para la evaluación de amenazas por movimientos en masa.

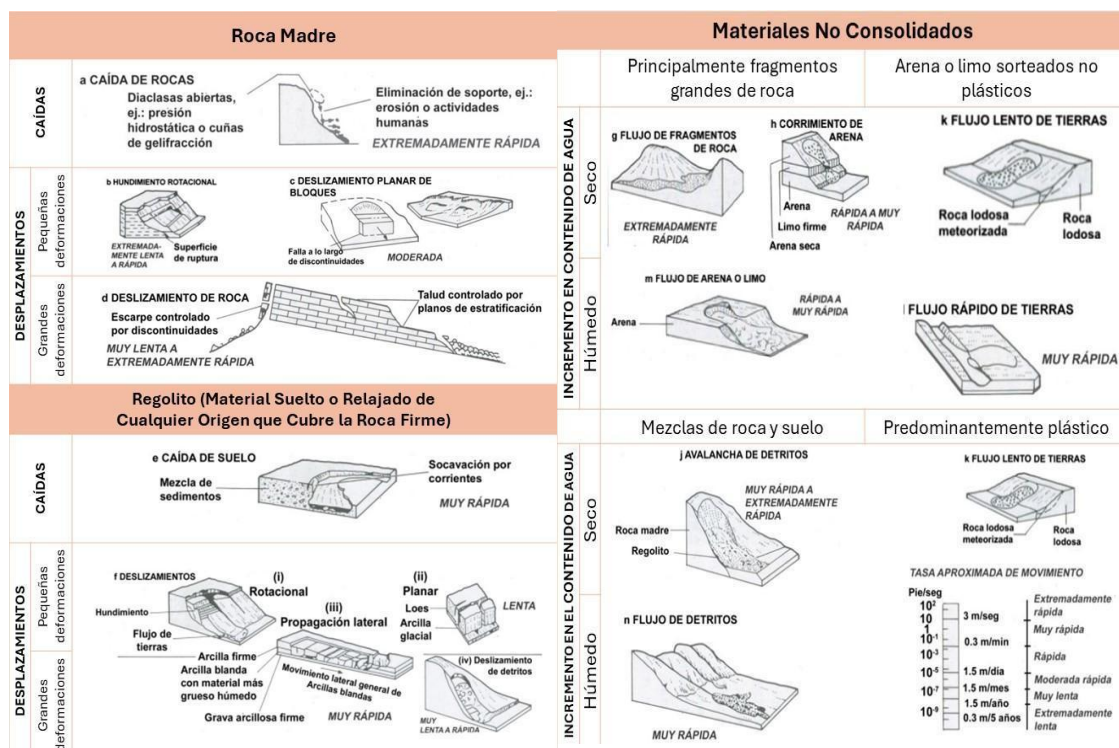


Figura 1: Clasificación de deslizamientos según el tipo de movimientos (adaptado de Varnes, 1958)

Otros términos relevantes para la comprensión de los movimientos en masa son los **factores condicionantes** y **detonantes**. Los factores condicionantes están relacionados con aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos y de uso del suelo. Configuran la predisposición del terreno a la ocurrencia de movimientos en masa, considerándose intrínsecos al área de estudio dado que la variación en el tiempo es casi imperceptible. Mientras que los factores detonantes son estímulos externos, tales como lluvias intensas o con larga duración, sismos, erupciones volcánicas, tormentas, entre otros, ocurridas previamente al movimiento en masa.

Factores condicionantes

- Condicionante geológico: corresponde a información sobre la distribución y propiedades físicas y mecánicas de las rocas y los suelos, el agua subterránea, niveles freáticos, las características del relieve y los procesos geodinámicos actuales en una zona determinada, que son considerados los componentes básicos del ambiente geológico.
- Condicionante geomorfológicos: consiste en las relaciones geométricas de la superficie del terreno (morfometría), las causas y procesos que dieron origen a las geoformas (morfogénesis), los movimientos en masa presentes en la zona, así como los depósitos o unidades de suelos transportados (morfodinámica). Trata aspectos cuantitativos del terreno en términos de rugosidad, pendiente y flujo acumulado en una celda, Acuenca.
- Variable suelos edáficos: implica algunas características como la textura, taxonomía, drenaje natural, profundidad y tipo de arcilla o mineralogía del suelo. De acuerdo con estas características así mismo influye en el escurrimiento o flujo superficial, infiltración, capilaridad, percolación, entre otros. Estas condiciones tienden a modificar el estado de la materia y la energía del suelo, afectando sus propiedades y esfuerzos, sin alterar su naturaleza.

Factores detonantes

- Detonante lluvia

Las precipitaciones son consideradas como una de las variables climáticas más importantes, por lo que conocer la cantidad de precipitación para un área en particular es de interés para los líderes regionales que deben lidiar con el bienestar de sus habitantes (Mehdizadeh, 2019). Las precipitaciones son un fenómeno meteorológico producto del proceso de condensación del vapor de agua atmosférico y de la influencia de muchos factores océano-atmosféricos (Canchala, Alfonso-Morales, Carvajal-Escobar, et al., 2020)

Colombia presenta dos regímenes de precipitación intranual característicos: en la región Andina presenta el régimen bimodal: las lluvias se inician con los equinoccios y los veranos con los solsticios y monomodal que se presenta en zonas de baja altura principalmente en la parte oriental del país donde el invierno inicia a principios de noviembre y asciende en dirección norte-occidente hasta finales de abril (Duque Escobar, 2022; Puertas Orozco & Carvajal Escobar, 2008; Unimedios, 2020). Los periodos de invierno son de especial interés, pues la incidencia de las lluvias como factor detonante en los movimientos en masa ha sido comprobada en distintas investigaciones, tanto en relación con la intensidad, como con la duración y la lluvia acumulada (Guzzetti et al., 2007).

La manera en que se produce un movimiento en masa en una ladera depende del tipo de falla que presente. En casos de lluvias intensas, es común observar movimientos superficiales y flujos de detritos debido al incremento de la presión de poros. Por otro lado, en situaciones de lluvias de baja

o moderada intensidad que se prolongan por días o semanas se pueden desencadenar flujos de detritos y deslizamientos profundos (Guzzetti et al., 2007). En estos casos, la lluvia antecedente (entendiéndose como la lluvia que se ha presentado días o incluso semanas antes del deslizamiento o movimiento en masa) es importante, ya que puede disminuir la succión del suelo y aumentar las presiones de poros positivas, especialmente en suelos con baja permeabilidad (INGEOMINAS, 2010).

En Colombia se han desarrollado umbrales diarios de lluvia como los calculados por Castellanos (1996), Moreno et al. (2006), Echeverri & Valencia (2004) y Ortiz et al. (1992). Superar dichos umbrales no significa la ocurrencia de movimientos en masa, sino que se generan las condiciones propicias de humedad para que ocurran (SGC & MinMinas, 2017).

- **Detonante Sismo**

Está altamente documentada la influencia de los sismos en los movimientos en masa. Cuando hay un sismo hay una carga dinámica tal que disminuye la estabilidad del talud que puede ocasionar un movimiento en masa. Esto comúnmente resulta en daños que pueden ser desde insignificantes hasta catastróficos, dependiendo de las condiciones de vulnerabilidad, la geomorfología de la zona y las características del material que conforma el terreno (SGC & MinMinas, 2017). Según el Libro Guía del curso Cartografía Geotécnica³ de la Universidad Nacional de Colombia, los sismos a partir de M_L 4.0 tienen la capacidad de detonar movimientos en masa, denominados cosísmicos. Cabe señalar que la presente investigación no contempla dentro de su análisis la influencia de los sismos en los movimientos en masa de la región de estudio.

2.1.2. Conceptos Relacionados con El Niño Oscilación del Sur (ENOS)

El Fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) es un estado anómalo natural que ocurre en las condiciones oceánicas y atmosféricas acopladas del Pacífico tropical. Está compuesto por dos fases extremas (El Niño y La Niña) y la fase neutra, representa desviaciones eventuales de las temperaturas superficiales del mar esperadas en el océano Pacífico ecuatorial. Ambas fases extremas se encuentran asociadas a las anomalías hidrológicas que ocurren en el trópico sudamericano, entre otras regiones. El patrón cambia de un lado a otro de manera irregular cada dos a siete años, y cada fase desencadena alteraciones predecibles de temperatura y precipitación (Lindsey, 2021).

La fase de El Niño también es conocida como fase cálida, produce un calentamiento de la superficie del océano, o temperaturas de la superficie del mar (SST, por sus siglas en inglés o TSM por sus siglas en español) por encima del promedio, en el Océano Pacífico tropical central y oriental. Los vientos superficiales de bajo nivel, que normalmente soplan de este a oeste a lo largo del Ecuador ("vientos del este"), se debilitan o, en algunos casos, comienzan a soplar en la otra dirección (de oeste a este o "vientos del oeste"). **La fase de La Niña** también es conocida como fase fría. En esta se presenta un enfriamiento de la superficie del océano, o en la TSM por debajo del promedio, en el Océano Pacífico tropical central y oriental. Los vientos normales del este a lo largo del Ecuador se vuelven aún más fuertes (Lindsey, 2021).

En Colombia, la influencia de La Niña se refleja en un aumento significativo de las lluvias (anomalías positivas) y una reducción de las temperaturas (anomalías negativas) en las regiones Andina, Caribe y Pacífica, así como en el piedemonte de los Llanos Orientales. En contraste, en la Orinoquía y la

³ https://edieraristizabal.github.io/Libro_cartoGeotecnia/07_detonante.html

Amazonía, los valores de precipitación y temperatura tienden a mantenerse dentro de rangos normales, sin que se observe un patrón climático claramente definido ante la presencia de este fenómeno (Euscategui & Hurtado, 2011).

Diferentes centros climáticos mundiales tales como la OMM (Organización Meteorológica Mundial), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), IRI (International Research Institute for Climate and Society), BOM (Bureau of Meteorology), CIIFEN (Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño), JMA (Japan Meteorological Agency), entre otros, emiten información sobre la condición actual y futura del ciclo ENOS a partir de la evolución de la TSM y la dinámica atmosférica con base en registros de satélites, boyas, reportes de embarcaciones y aeronaves, entre otras (Serna Cuenca, 2021). Estas entidades calculan varios indicadores de relevancia sobre el comportamiento ENOS. A continuación, se mencionan algunos de los índices más relevantes:

- TSM en las zonas Niño1+2, Niño3, Niño3.4 y Niño4. De acuerdo con Diaz Cohen (2023), las regiones Niños, también conocidas como regiones Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 y Niño 4, son áreas específicas en el Océano Pacífico tropical que han sido seleccionados por la comunidad científica para el monitoreo y vigilancia de ENOS. La región Niño 1+2 está situada en el centro y el este del Océano Pacífico, y es la más importante para el seguimiento de ENOS porque es la región donde se encuentra el agua más cálida durante los episodios de El Niño. La región Niño 3.4 está ubicada dentro de las regiones de Niño 3 y 4, y se utiliza para calcular el Índice Oceánico de El Niño (ONI), que es la medida más utilizada del ENOS. La región Niño 4 está situada en el Océano Pacífico occidental, y es la menos importante para el seguimiento de ENOS de todas las regiones, ya que esta región no muestra tanta variabilidad en la TSM, como las demás. En estas zonas se mide la temperatura de la superficie del mar comprobando cuánta energía irradia el océano en diferentes longitudes de onda. Algunos softwares trazan estas mediciones en un mapa y luego fusionan y suavizan los datos utilizando filtros matemáticos. Cada punto cubre un área de aproximadamente 5 x 5 km. Las temperaturas diarias en cada punto de la cuadrícula se promedian para calcular la temperatura promedio mensual (Climate.gov, 2024).
- Según la NOAA, el Southern Oscillation Index⁴ (SOI) o Índice de Oscilación del Sur (IOS) es un índice estandarizado basado en las diferencias observadas en la presión atmosférica a nivel del mar entre Tahití y Darwin, Australia. Este es una medida de las fluctuaciones a gran escala en la presión del aire que ocurren entre el Pacífico tropical occidental y oriental durante los episodios de El Niño y La Niña. La existencia de valores negativos sostenidos del SOI frecuentemente indican episodios del fenómeno de El Niño, lo contrario indica episodios del fenómeno de La Niña.
- El Multivariate ENSO Index (MEI) es un método utilizado para caracterizar la intensidad del fenómeno ENOS (El Niño-Oscilación del Sur). Dado que este surge de una interacción compleja entre varios sistemas climáticos, el MEI se considera el índice más completo para monitorear el ENOS, ya que combina el análisis de múltiples componentes meteorológicos y oceanográficos (Mazzarella et al., 2013). Originalmente, el MEI se determinaba como el primer componente principal de seis parámetros: presión a nivel del mar, componentes zonales y meridionales del viento en la superficie, temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire en la superficie y nubosidad. Sin embargo, una nueva versión del MEI (MEI.v2) fue desarrollada, la cual utiliza

⁴ <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/soi>

cinco variables: presión a nivel del mar (SLP), temperatura de la superficie del mar (SST), vientos zonales en la superficie (U), vientos meridionales en la superficie (V) y radiación de onda larga saliente (OLR). Esta versión amplía el índice original, permitiendo generar una serie temporal de las condiciones del ENOS desde 1979 hasta la actualidad. Los valores positivos altos del MEI indican la ocurrencia de condiciones de El Niño, mientras que los valores negativos altos reflejan condiciones de La Niña (NOAA Physical Sciences Laboratory, s.f.). Actualmente este índice se calcula a partir del dataset JRA3Q.

- El Oceanic Niño Index⁵ (ONI), es el principal indicador del NOAA para monitorear la parte oceánica del patrón climático estacional del ENOS. Este índice rastrea las temperaturas promedio de la superficie del mar durante 3 meses en el Pacífico tropical centro-oriental entre 120°-170°W, cerca de la línea de cambio de fecha internacional. La NOAA considera que las condiciones de El Niño están presentes en el océano cuando el ONI en esa área, conocida como región Niño 3.4, es +0.5 o más, lo que significa que las aguas superficiales en el Pacífico tropical central-oriental están a 0.5 grados Celsius (0.9 grados Fahrenheit) más cálido que el promedio. Las condiciones oceánicas de La Niña existen cuando el ONI es -0,5 o menos, lo que indica que la región es 0,5 grados Celsius más fría que el promedio. Para calcular el ONI, los científicos del Centro de Predicción Climática de la NOAA calculan la temperatura promedio de la superficie del mar en la región del Niño 3.4 para cada mes, utilizando mediciones en el océano de una variedad de fuentes, incluidos flotadores autónomos, boyas amarradas y cruceros de barcos. Combinan las observaciones en un único promedio mensual y luego lo promedian con los valores de los meses anteriores y siguientes. Este promedio móvil de tres meses se compara con un promedio de 30 años. La diferencia observada con respecto a la temperatura promedio en esa región, ya sea más cálida o fría, es el valor ONI para esa "temporada" de 3 meses.
- Pacific Decadal Oscillation (PDO) o la Oscilación Decenal del Pacífico (ODP) se define por el patrón principal (EOF) de anomalías de la temperatura de la superficie del mar (TSM) en la cuenca del Pacífico Norte (típicamente, hacia el polo 20°N) (Deser et al., 2022).

2.1.3. Conceptos Relacionados con Análisis de Datos

El ser humano observa la naturaleza y el clima para aprender o extraer información relevante para la descripción de su estado actual o para la realización de predicciones. Si los procesos atmosféricos fueran constantes, o estrictamente periódicos, sería fácil describirlos matemáticamente. Sin embargo, la atmósfera exhibe variaciones y fluctuaciones que son irregulares. Con el fin de lograr su entendimiento se realiza la recopilación y el análisis de grandes conjuntos de datos meteorológicos (Parnell, 2013).

Para el país, así como a nivel mundial, el clima es un factor que interviene en la planificación estratégica y toma de decisiones a nivel ambiental, social y económico. Por lo tanto, es necesaria la disposición de información amplia, y confiable de una serie de variables claves que permitan caracterizarlo. En Colombia, los datos de observación relativos al clima y la atmósfera se recopilan por medio de la red hidrometeorológica del país, una responsabilidad del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Estos datos sirven para realizar análisis y obtener información relevante que sirva como herramienta de apoyo a los encargados de formular políticas

⁵ <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-nino-index>

con el fin de establecer estrategias de manejo y definir modelos de planeación en los diferentes sectores que componen la sociedad (IGAC, 2019).

Según QuestionPro⁶ el análisis de datos es la ciencia que se encarga de examinar un conjunto de datos a los que se le aplican diferentes tipos de operaciones, enfoques, técnicas y herramientas con el propósito de descomponer, examinar y comprender fenómenos complejos para poder tomar decisiones, o simplemente ampliar los conocimientos sobre diversos temas. Para esta investigación se plantea utilizar Python como medio para la aplicación del análisis de los datos. Este es un lenguaje de programación de alto nivel y de propósito general. Es conocido por su simplicidad y legibilidad, lo que lo convierte en una opción popular para una amplia gama de aplicaciones, incluido el análisis de datos. Python proporciona una variedad de bibliotecas y herramientas especializadas en análisis de datos, como NumPy, pandas y matplotlib. Estas bibliotecas ofrecen funciones y métodos que permiten la manipulación, limpieza, procesamiento y visualización de datos de manera eficiente (Python, 2019).

Dentro de los métodos de análisis de datos se utilizarán las series de tiempo para la comprensión de los registros de lluvia y posteriormente se encontrará el coeficiente de correlación adaptado al tipo de distribución encontrada, con el fin de identificar la influencia del ENOS en los MM y las precipitaciones. Estos métodos se aplicarán a los datos por medio de las bibliotecas de Python anteriormente nombradas. A continuación, se presenta una breve descripción de los métodos de análisis que se implementarán.

2.1.3.1. Series de tiempo

Las series de tiempo son conjuntos de datos que se organizan a lo largo del tiempo, generalmente en intervalos regulares. Son una herramienta importante en el análisis estadístico y se utilizan para modelar y predecir patrones en los datos, así como para analizar tendencias y ciclos. Las series de tiempo se pueden utilizar en una amplia variedad de campos, incluyendo la economía, las finanzas, la meteorología y la ingeniería, entre otros (Brockwell & Davis, 2016).

2.1.3.2. Coeficientes de correlación

El coeficiente de correlación es una medida estadística que indica el grado de asociación entre dos variables y varía entre -1 y 1, donde -1 indica una correlación negativa perfecta, 0 indica una falta de correlación y 1 indica una correlación positiva perfecta (Wenzel & Babbie, 1994). Según el tipo de distribución encontrada en los datos se plantea usar un tipo de coeficiente de correlación:

- El coeficiente de correlación de **Pearson** se utiliza cuando las variables están distribuidas de manera aproximadamente lineal y se busca medir la fuerza y dirección de la relación lineal entre ellas. Es adecuado para variables continuas o discretas que se pueden aproximar a una distribución normal (James et al., 2021). De acuerdo con CIMEC⁷, la representación gráfica de los datos es muy útil para visualizar la relación existente entre las variables, ya que hay que tener en cuenta que a veces existen relaciones entre variables que no son lineales. Los resultados obtenidos del cálculo del coeficiente de correlación de Pearson cuando se varían las variables de comparación son presentados en la Figura 2.

⁶ https://www.questionpro.com/es/analisis-de-datos.html#que_es_analisis_de_datos

⁷ <https://www.cimec.es/coeficiente-correlacion-pearson/>

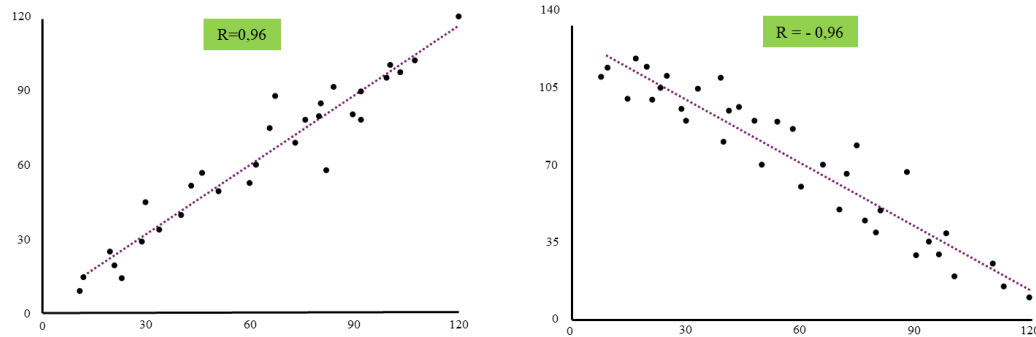


Figura 2: Ejemplo de la representación gráfica de los coeficientes de Pearson obtenidos en el análisis entre dos variables cuando SI existe correlación. Obtenido de <https://www.cimec.es>

Esta grafica muestra el valor de “R” cuando es cercano a 1. Puede verse como las nubes de puntos (pares de datos de valores para las dos variables), siguen un sentido y se acumulan en su recorrido cerca de la línea de tendencia, que es positiva en un caso y negativa en el otro, esto indica la existencia de correlación entre las variables. Por el contrario, cuando la nube de puntos se encuentra más dispersa (ver Figura 3), los coeficientes de correlación son bajos a moderados (-0,31) lo que puede estar indicando una correlación baja, a pesar de que se apunta una ligera tendencia de correlación negativa. En el caso de la derecha, la dispersión es total y se ve perfectamente que se trata de dos variables no correlacionadas. Su coeficiente valor “R” es de -0,05.

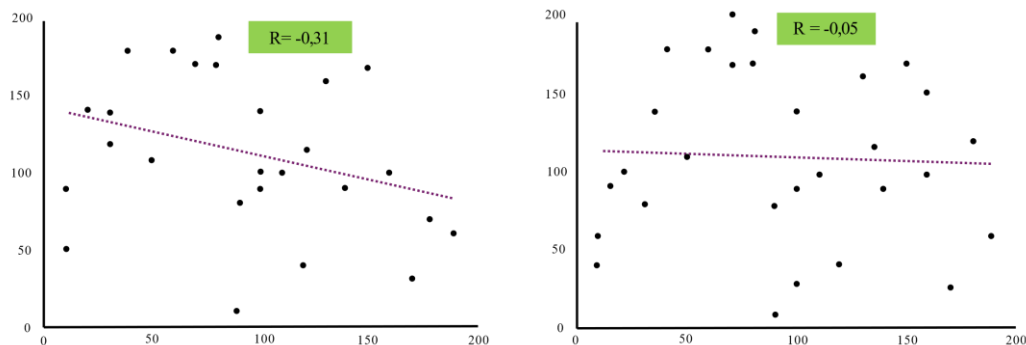


Figura 3: Ejemplo de la representación gráfica de los coeficientes de Pearson obtenidos en el análisis entre dos variables cuando NO existe correlación. Obtenido de <https://www.cimec.es>

- El coeficiente de correlación de **Spearman** se utiliza cuando no se cumple el supuesto de linealidad o cuando las variables son ordinales o no continuas. En lugar de evaluar la relación lineal, el coeficiente de Spearman mide la relación monotónica entre las variables, es decir, si los cambios en una variable se asocian consistentemente con cambios en la otra variable, sin importar la forma exacta de la relación (James et al., 2021).

2.1.4. Localización del Área de Estudio

El departamento de Nariño, en el suroeste del país (ver Figura 4), presenta importantes accidentes geográficos. Está conformado por 64 municipios cuya capital es la ciudad de Pasto. Tiene 1.787.545 habitantes y 33.268 km² de superficie. Para su manejo administrativo y de gestión ambiental se encuentra zonificado en tres regiones naturales (SGC, 2017).



Figura 4: Ilustración adaptada de (Canchala, Alfonso-Morales, Carvajal-Escobar, et al., 2020)

La primera es la planicie o llanura del Pacífico (región azul de la Figura 5), corresponde a la parte occidental del departamento, constituyendo el 52% del territorio, cuenta con una baja densidad poblacional ubicada generalmente cerca al lecho de los ríos (Corporación Autónoma Regional de Nariño, 2002). Se caracteriza por altas temperaturas, abundantes lluvias y exuberante vegetación; se subdivide en la zona de manglares y la llanura del bosque húmedo, que se extiende hasta las estribaciones de la Cordillera Occidental (Martínez, 2019).

La segunda región corresponde a la zona Andina (región verde de la Figura 5) definida por la cordillera de los Andes. Esta abarca aproximadamente el 38% de la extensión del departamento. Caracterizada por ser zona boscosa, con comportamiento climático templado a frío (Corporación Autónoma Regional de Nariño, 2002), cuenta con vertientes externas, interAndinas y altiplanos. Allí se encuentra el Macizo Colombiano y el Nudo de los Pastos, de este último se desprende dos ramales: La Cordillera Occidental, la cual presenta los volcanes Chiles (4.718 m), Cumbal (4.764 m), Azufral (4.070 m) y una profunda depresión denominada Hoz de Minamá y la Cordillera Centro-Oriental que presenta el altiplano de Túquerres-Ipiales, el valle de Atriz y los volcanes Doña Juana (4.250 m) y Galeras (4.276 m), uno de los volcanes más activos en el mundo. Esta zona corresponde a la más densamente poblada del departamento (Martínez, 2019).

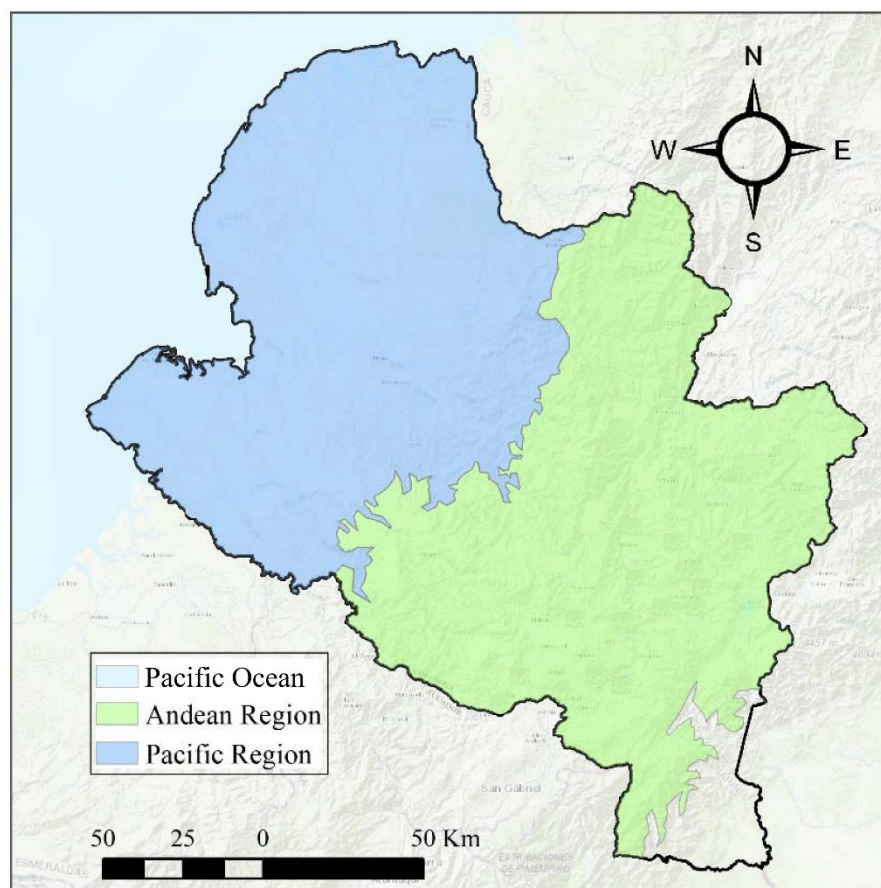


Figura 5: Localización geográfica del área de estudio y su distribución por regiones. Ilustración adaptada de (Canchala, Alfonso-Morales, Carvajal-Escobar, et al., 2020)

La tercera región (región sin sombrear dentro de la delimitación del departamento. (Ver Figura 5), correspondiente a la vertiente amazónica, está constituida por colinas disectadas y caracterizada por selva húmeda cálida, se encuentra formada por el piedemonte amazónico, económicamente unida al departamento del Putumayo, y que presenta terrenos abruptos poco aprovechables (Corporación Autónoma Regional de Nariño, 2002). En ella se localiza la Laguna de la Cocha (Martínez, 2019).

Históricamente, en el territorio de Nariño ha habido procesos de desestabilización de laderas que han afectado tanto a población como infraestructura. Entre los movimientos en masa más antiguos registrados documentalmente se encuentra el ocurrido el 9 de noviembre de 1954 en el municipio de Pasto (SGC, 2017). Según la UNGRD⁸ para el 2020 el departamento de Nariño se encontraba en la tercera posición de mayor ocurrencia de movimientos en masa, solo antecedido por Antioquia y Cundinamarca. Es el departamento de Colombia donde hay más afectación a la población y con mayores cifras de daños. Esto se debe a que gran parte de la geomorfología del departamento se encuentra sobre la Cordillera Occidental.

⁸ <https://n9.cl/notiungrd>

2.2. ANTECEDENTES

Como se ha mencionado, los movimientos en masa son un fenómeno que pueden generar grandes pérdidas materiales e incluso humanas. Es por lo que diferentes disciplinas han centrado sus esfuerzos en el estudio de relacionar los detonantes con la ocurrencia de movimientos masales en diferentes periodos de tiempo y regiones. A continuación, se presentan los resultados de algunos estudios que sirvieron como base para el desarrollo de esta investigación.

1. En “Código Python para el análisis de datos históricos de Precipitación de la Provincia de Misiones” (Javier Fernandez, 2022), se describe el proceso de creación de una herramienta en código Python para analizar los datos históricos de precipitación de las distintas estaciones meteorológicas que posee el Sistema Nacional de Información Hídrica (SNHI) en la Provincia de Misiones (Argentina). La herramienta utiliza principalmente la librería Pandas de Python para procesar los datos y calcular las precipitaciones anuales, el módulo anual, los módulos mensuales, el año con mayor y el de menor lámina precipitada, y también el día que más precipitó. Los resultados de estos cálculos se presentan en una tabla con información resumida. Además, se utilizó la librería Matplotlib para generar gráficos de las precipitaciones anuales y los módulos mensuales. Estos gráficos permiten visualizar de manera clara y sencilla la distribución de las precipitaciones a lo largo del año. Para llevar a cabo el análisis, se utilizaron los datos de siete estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes localidades de la provincia. Los resultados obtenidos a partir de estos datos muestran, por ejemplo, que el máximo módulo pluviométrico anual es de 2081 mm, que octubre es el mes donde mayor lámina precipita (226 mm) y que la mayor lámina diaria precipitada observada fue de 250 mm.
2. En la investigación “Global connections between El Nino and landslide impacts” (Emberson et al., 2021) se afirma que El Niño (en esta investigación se refieren a ENOS como “El Niño”) es una parte crítica de la variabilidad climática global interanual y la intensidad de éste tiene implicaciones importantes para los peligros naturales inducidos por las lluvias en muchos países vulnerables. De acuerdo con el artículo, es probable que el impacto de los deslizamientos provocados por las lluvias sea modulado por la fuerza de El Niño, pero la naturaleza de esta conexión y los lugares donde es más relevante siguen sin restricciones. Para este estudio se combinaron datos satelitales de lluvia con un modelo global de exposición a deslizamientos para mostrar que El Niño tiene efectos de gran alcance en los impactos de los deslizamientos en las personas y la infraestructura. Los autores encontraron que el impacto de El Niño en la exposición a deslizamientos puede ser mayor en partes del sudeste de Asia y América Latina debido a la variabilidad estacional de las precipitaciones (Ver Figura 6).

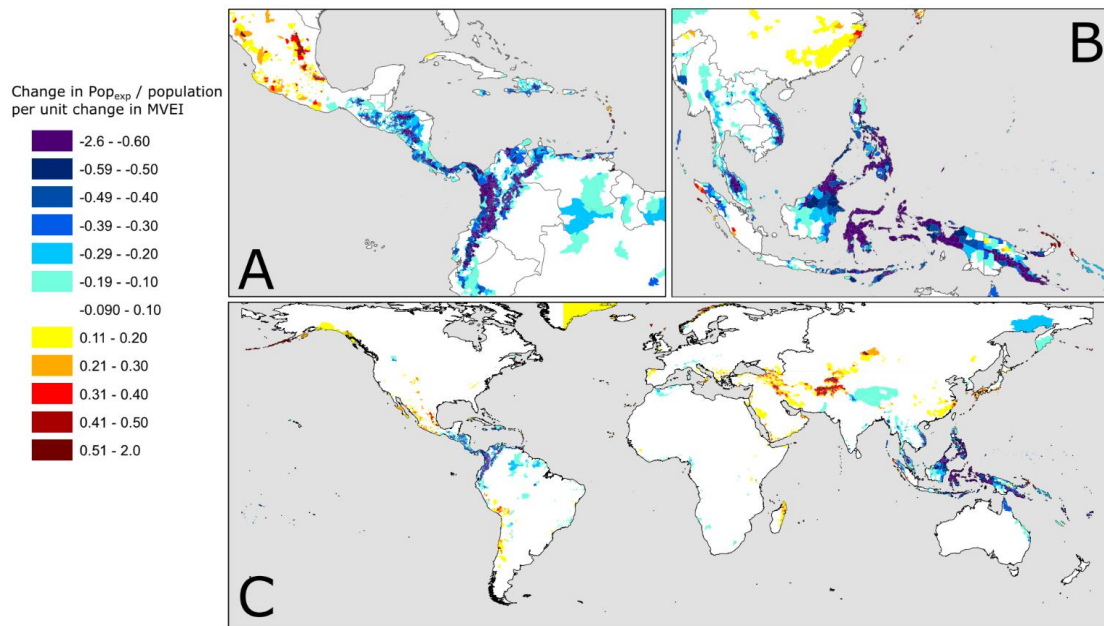


Figura 6: Mapa global de impacto dónde ENOS impacta más fuertemente la exposición de la población a los peligros de deslizamientos de tierra. Tomado de Emberson et al. (2021).

3. Vargas Cediell (2020) en su trabajo titulado “Correlación Cronológica entre Posibles Detonantes Climáticos, Sísmicos y Volcánicos con la Ocurrencia de Movimientos en Masa en el Departamento De Nariño” buscó entender la relación entre los diferentes detonantes de movimientos en masa (también llamados FRM) del departamento de Nariño para así poder generar gráficas que ayuden a ilustrar de manera clara la recolección de datos de diversas fuentes. En particular, este proyecto de grado estuvo orientado a entender la relación de la ocurrencia de movimientos en masa en Nariño con detonantes climáticos, sísmicos y volcánicos teniendo en cuenta la diversidad de fenómenos que confluyen en este departamento. Con base en cuatro fuentes de datos independientes (SIMMA, IDEAM, Enciclopedia de Desastres y Sismicidad Histórica), se hizo un análisis estadístico de relación temporal entre cada movimiento en masa documentado con la información disponible sobre sismicidad histórica, eventos volcánicos y registros de precipitación, con el fin de identificar posibles casualidades. La Figura 7 muestra que el detonante de mayor impacto en Nariño es el climático, puesto que más de la mitad de los registros ocurren en meses de mayor precipitación, con una influencia muy fuerte de la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y la corriente del Chorro del Chocó en el último trimestre del año, pero también influencias temporales con episodios de La Niña. A su vez, los detonantes sísmicos y volcánicos también presentan una gran influencia detonando FRM, ya que la cuarta parte de los FRM tienen una relación temporal con estos dos fenómenos. Se encontró un mayor grado de complejidad en algunas zonas que se encuentran cercanas a volcanes, puesto que la amenaza a movimientos en masa es mayor ya que se encuentran bajo el efecto de los 3 posibles mecanismos detonantes descritos en este proyecto.

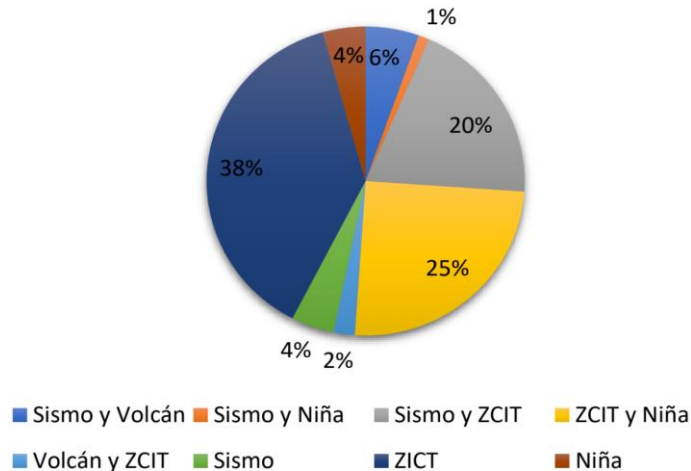


Figura 7: Distribución total de los detonantes identificados en los registros de FRM

4. En la investigación “Monthly rainfall anomalies forecasting for southwestern Colombia using artificial neural networks approaches” (Canchala, Alfonso-Morales, Carvajal-Escobar, et al., 2020), los autores pronosticaron mediante la aplicación de Redes Neuronales Artificiales (RNA) anomalías de lluvia para el departamento de Nariño. Para ello, utilizaron tres enfoques diferentes de RNA. Con el primero NLPCA (Non-linear Principal Component Analysis) identificaron los modos principales de variabilidad de las anomalías de lluvia. El segundo, NNARMAX (Neural Network Autoregressive Moving Average with eXogenous variables) se implementó como modelo de predicción, utilizando como variables exógenas 8 índices climáticos a gran escala: temperaturas de la superficie del mar (Sea Surface Temperatures): SST1+2, SST3, SST3.4, SST4, Oceanic Niño Index (ONI), Multivariate ENSO index (MEI), Southern Oscillation Index (SOI) y Pacific Decadal Oscillation (PDO). Finalmente, el tercero, NLPCA inverso, obtuvo las anomalías de lluvia mensuales previstas para cada región. Los modelos se entrenaron con datos de lluvias desde el año 1983 hasta 2014; y se probaron con los datos del 2015 y 2016. El rendimiento del modelo y la habilidad de pronóstico se validó mediante tres métodos estadísticos: Error Cuadrático Medio (Root Mean Square Error - RMSE), Error Absoluto Medio (Mean Absolute Error - MAE) y Coeficientes de Correlación de Pearson (Pearson Correlation Coefficients - r). Los resultados obtenidos demostraron la posibilidad de pronosticar lluvias con cinco meses de anticipación para la zona del Suroccidente de Colombia. Además, se verificó que, en cuanto a las precipitaciones, los índices ENOS, principalmente SST3 y SST4, pueden volverse relevantes para pronosticar las precipitaciones estacionales en la región de los Andes
5. En la investigación “Teleconnections between Monthly Rainfall Variability and Large-Scale Climate Indices in Southwestern Colombia” (Canchala, Alfonso-Morales, Cerón, et al., 2020), se analizan las teleconexiones entre las precipitaciones mensuales y los índices clima-oceanográficos en el departamento de Nariño. Para ello, los autores utilizaron series temporales de precipitaciones mensuales desde 1983 hasta 2016 que incluyeron 44 estaciones pluviométricas ubicadas en diferentes zonas del departamento. Los datos faltantes se estimaron por medio de análisis de componentes principales no lineales (non-linear principal component analysis - NLPCA), se calculó la precisión utilizando el error cuadrático medio (RMSE). Por otro lado, se seleccionaron ocho series temporales de variables atmosféricas y oceánicas mensuales que fueron: Índice de Oscilación del Sur (IOS), el Índice Multivariado ENSO (MEI - IMENSO), el Índice Niño Oceánico (ONI), la Temperatura en la Superficie del Mar (TSM) en regiones del

Océano Pacífico Tropical (TPO) (Niño1+2, Niño3, Niño3.4, Niño4) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). Para establecer el régimen de precipitación de la región se utilizó la combinación de dos métodos no lineales: NLPCA y Mapa de características autoorganizado (Self-Organized Feature Map - SOM), como enfoques eficientes para identificar grupos con características de lluvia similares. Así, los datos de 44 estaciones con información de 408 meses (34 años), requirieron el uso de la NLPCA para reducir la dimensionalidad del conjunto de datos, el resultado se utilizó luego como entrada para el SOM que arrojó el perfil de las áreas homogéneas y la clasificación de las estaciones de medición. Los resultados del NLPCA y SOM mostraron que Nariño tiene dos regímenes de precipitación por zona: la Región Andina (RA) y la Región Pacífica (RP). Para hallar las teleconexiones se aplicaron las correlaciones cruzadas mediante Correlaciones de Pearson, teniendo en cuenta que los índices climáticos preceden a las precipitaciones mensuales, y el grado de correlación de estos con los principales modos de variabilidad de las precipitaciones mensuales hallados con el NLPCA. Los hallazgos mostraron que la precipitación en RA tiene una relación directa (inversa) con el SOI (ONI, MEI, Niño1+2, Niño3, Niño3.4, Niño4 y PDO) índices. Además, la magnitud de las correlaciones fue más fuerte con Niño3.4 y Niño4, y esta influencia se mantuvo durante 10 y ocho meses, respectivamente. En este sentido, la lluvia en RP mostró correlaciones sincrónicas positivas, pero no significativas con los índices Niño1+2 y Niño3, y una relación inversa con Niño3.4 y Niño4 en 8, 9 y 10 rezagos. En general, los índices vinculados al fenómeno ENOS mostraron fuertes teleconexiones con las precipitaciones en RA y débiles en RP. Los resultados establecidos permiten inferir que la variabilidad de las precipitaciones en el suroeste de Colombia es influenciada por el ENOS/ENSO, siendo más fuerte en el oriente de Nariño que en el occidente. Estos resultados son especialmente importantes para análisis de predicción posteriores, dado que los índices clima-oceanográficos con alta correlación sincrónica y rezagada podrían convertirse en potenciales predictores de precipitaciones mensuales en estas subregiones del suroccidente colombiano.

6. En “Influencia del ENSO en la variabilidad espacial y temporal de la ocurrencia de movimientos en masa detonados por lluvias en la región Andina” (Naranjo Bedoya et al., 2019), se explora para el departamento de Antioquia, ubicado sobre los Andes Colombianos, la relación de la precipitación con la ocurrencia de movimientos en masa para el período comprendido entre 1985 y 2016, y la influencia del ENSO, en escalas temporales diaria, mensual e interanual, y escalas espaciales agregada para todo el departamento y por regiones. Usan la base de datos de movimientos en masa de SIMMA y DesInventar con registros históricos a escala temporal diaria desde 1985 a 2016. Debido a que las bases de datos no especifican el factor detonante del movimiento, se asume que todos los eventos fueron desencadenados por lluvia. Los datos de precipitación los obtuvieron del IDEAM para 27 estaciones pluviométricas con registros durante 32 años en escala temporal diaria. El área de influencia de cada estación fue determinada a partir de los polígonos de Thiessen. Para evaluar la posible correlación entre cada fase del ENSO con la lluvia y los movimientos en masa se utilizó el Índice Multivariado del ENSO a escala mensual (MEI). Los resultados indicaron que el ENSO en su fase La Niña puede afectar la ocurrencia de deslizamientos de tierra en la región Andina de Colombia asociado con un mayor riesgo de deslizamientos de tierra. La Figura 8 muestra la variación interanual de lluvia y los movimientos en masa asociados al ENOS del departamento de Antioquia. Los puntos rojos significan años El Niño, los puntos azules años La Niña, y puntos verdes años neutros.

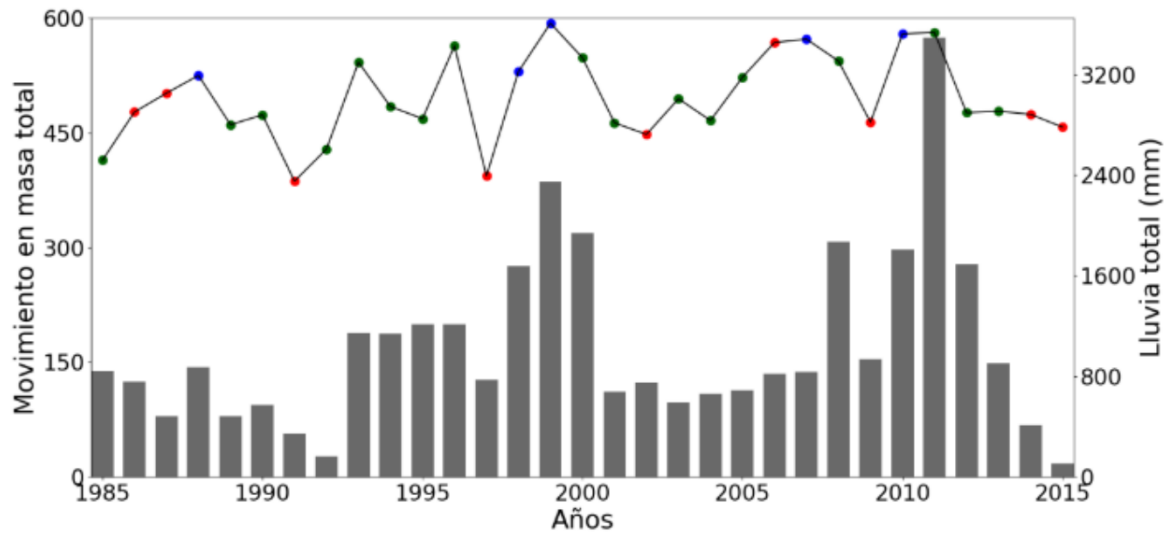


Figura 8: Variación interanual de la lluvia y los movimientos en masa en el departamento de Antioquia, asociado a las fases del ENOS, Tomado de Naranjo et al. (2019).

7. En “Evaluación del riesgo de inundaciones y movimientos en masa asociado al fenómeno de la niña en el departamento de Santander” (Gutiérrez Torres, 2019). El autor evalúa el riesgo asociado a inundaciones y movimientos en masa en el departamento de Santander, considerando el impacto del fenómeno de La Niña. La metodología utilizada se basó en un análisis espacial multicriterio empleando el método de suma ponderada, en el cual se integraron capas de información geoespacial obtenidas de diversas fuentes, incluyendo mapas de susceptibilidad a inundaciones y movimientos en masa, datos históricos de precipitación y factores de vulnerabilidad social y económica. Para la evaluación del riesgo, se aplicó una matriz de doble entrada que combinó la amenaza y la vulnerabilidad, permitiendo una categorización precisa de las áreas con mayor exposición a desastres naturales. Los resultados revelaron que las zonas con mayor riesgo de inundaciones se encuentran en el municipio de Puerto Wilches, particularmente en el primer trimestre del segundo año de un evento de La Niña de alta intensidad. En cuanto a los movimientos en masa, los municipios de Matanza, San José de Miranda y Molagavita fueron identificados como los más vulnerables, especialmente en el tercer trimestre del primer año del fenómeno. Estos hallazgos brindan información valiosa para fortalecer las estrategias de mitigación y adaptación en la región, permitiendo una respuesta más efectiva ante eventos climáticos extremos.
8. En “Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer” de (Puertas Orozco & Carvajal Escobar, 2008), Se “utilizó el Climate Explorer para establecer relaciones lineales entre la precipitación y la temperatura media del aire (anual y trimestral) de Colombia con variables asociadas a ENOS, entre 1975-2000”. Para ello se extrajeron los datos de 155 estaciones de precipitación y 44 de temperatura. En términos metodológicos primero se identificaron datos faltantes y se completaron por medio de sustitución de media mensual, luego se identificaron las estaciones que no tenían datos consistentes debido a un comportamiento “atípico” detectado en un análisis de clúster y en una evaluación de estabilidad de la media y la varianza descartando un total de 7 estaciones. Luego se determinó cuáles eran las variables relacionadas con el ENOS que se compararían con los datos de temperatura y precipitación, estas variables fueron: TSM (Temperatura en el

Superficie del Mar), IOS (Índice de Oscilación del Sur), e IMENSO (Índice Multivariado de ENOS). Este estudio es relevante para la presente investigación pues compara dos eventos de una manera metodológica similar. En ambas investigaciones se utiliza el coeficiente de Person (r) para evaluar la correlación de los eventos. Esto debido a que es el método más utilizado para estudiar el grado de relación lineal que existe entre dos variables cuantitativas. “los resultados de correlaciones entre las variables macroclimáticas asociadas a ENOS con la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, coinciden con estudios preliminares desarrollados en el país” Los autores concluyen que “al centro, norte y occidente del país, El Niño (fase cálida) trae disminución de lluvias e incrementa la temperatura, lo contrario sucede durante La Niña”. Mayores correlaciones significativas se obtuvieron con períodos trimestrales (principalmente en DEF) y rezagos alrededor de cero; éstas decaen en el trimestre MAM de las variables climatológicas; entre la precipitación y el índice IMENSO se obtuvieron mayores coeficientes en DEF ($r=-0.44$). Existe mayor incidencia de ENOS sobre la temperatura del país.

9. En la investigación “La Lluvia y los Deslizamientos de Tierra en Antioquia: Análisis de su Ocurrencia en las Escalas Interanual, Intraanual y Diaria” (Moreno et al., 2006) se estudió la relación entre la lluvia y los deslizamientos reportados en el departamento de Antioquia entre 1929 y 1999. Se realizó la georreferenciación de 405 deslizamientos posiblemente producidos por lluvia en la región de estudio y se efectuó el análisis de la ocurrencia de los deslizamientos durante las fases cálida y fría del fenómeno ENOS y el ciclo intraanual de la precipitación en Colombia. Se observó que La Niña, tanto en la escala interanual como en los dos períodos intraanuales más lluviosos sobre la zona Andina, favorecen un incremento en el número de deslizamientos de tierra (ver Figura 9), así que, mediante el análisis de la precipitación diaria acumulada en estaciones cercanas al sitio de cada deslizamiento, se propuso un umbral de lluvia por regiones y se describieron las posibles combinaciones de lluvia acumulada antecedente. Las condiciones de lluvia más comunes para el desencadenamiento de un movimiento de suelo tienen que ver con altas cantidades de lluvia acumulada diaria en el mediano plazo (15 días o más). Este estudio constituyó un primer acercamiento al modelamiento de la lluvia y su influencia sobre los deslizamientos de tierra, lo cual pudo dar apoyo a las autoridades en prevención de desastres para declarar estados de alerta ante condiciones de superación de umbrales de lluvia.

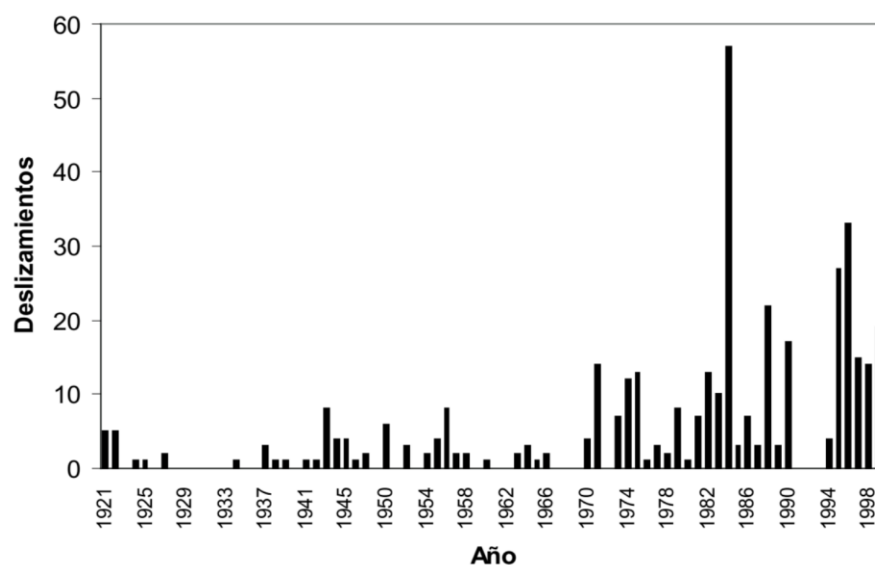


Figura 9: Número de deslizamientos por año. Tomado de Moreno et al. (2006).

10. En la tesis de maestría “Los fenómenos cálidos del Pacífico (El Niño) y frío del Pacífico (La Niña) y su incidencia en la estabilidad de laderas en Colombia” de (Sánchez et al., 2001) se pretendió relacionar el comportamiento de algunas variables ambientales como la temperatura superficial del mar, y las anomalías de precipitación mensual en Colombia con la distribución, frecuencia e intensidad de daño por deslizamientos durante los episodios Niño 97/98 y Niña 98/00. Para el análisis del ENOS, los autores estudiaron los comportamientos de la TSM en el pacífico y el caribe durante la temporada de interés y las precipitaciones en Colombia; con respecto a la TSM, de acuerdo con la información que obtuvieron del NCEP/NOAA para los años 1997,1998 y 1999 se registraron temperaturas más altas bajo condiciones Niño en el océano Pacífico colombiano y temperaturas más bajas bajo condiciones Niña, mientras que la temperatura del mar en el Caribe colombiano ante eventos Niño o Niña osciló en menor grado y fue más notorio el comportamiento estacional. Con respecto a las precipitaciones, obtuvieron el comportamiento de la anomalía de la precipitación a nivel mensual en Colombia durante los años 97, 98 y 99. En el 97 las lluvias fueron deficitarias mientras que, en el 98, 99 y 00 se presentaron en exceso. Posteriormente, los autores realizan un análisis comparativo de los movimientos en masa ocurridos durante estos dos fenómenos (TSM y precipitaciones), teniendo en cuenta su distribución temporal y espacial, frecuencia e intensidad de daño asociados a las lluvias como detonantes. La Figura 10 muestra la distribución mensual de movimientos en masa de Colombia durante los fenómenos El Niño y La Niña de los años 97, 98, 99 y 2000.

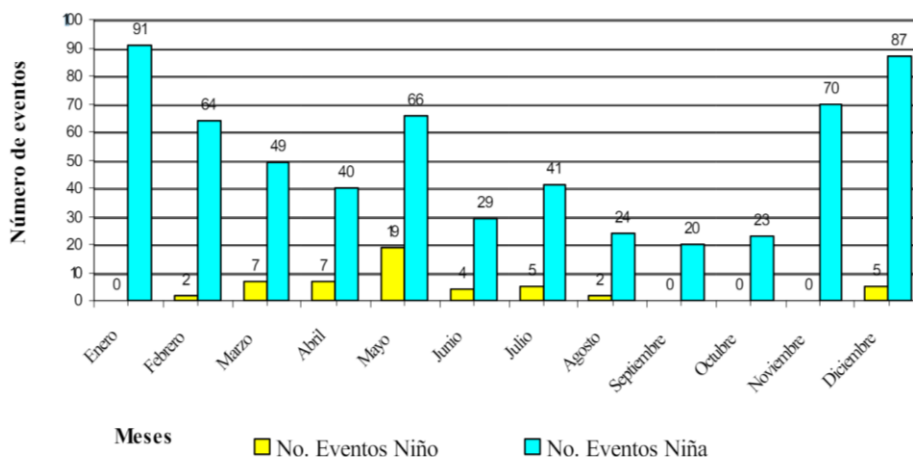


Figura 10: Distribución mensual de los movimientos en masa ocurridos en Colombia durante los fenómenos cálido 1997-1998 y frío 1998-2000 del Pacífico

La primera conclusión que se destaca de esta figura es el aumento considerable en el número de eventos de movimientos en masa durante La Niña en comparación con el número de eventos durante El Niño en el lapso de los años de estudio. Esto podría llevar a concluir que efectivamente hay una incidencia o una relación entre el fenómeno de La Niña y los eventos de movimientos en masa

11. En la investigación “Incidencia del fenómeno ENSO en la hidroclimatología del valle del río Cauca-Colombia” (Carvajal E. et al., 1998), se analizaron algunas de las manifestaciones del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur, en el cual se analizan las fases extremas de este fenómeno para los últimos 50 años. Concluyen que existe una relación entre la fase cálida (El Niño) con los caudales mínimos y la fase fría (La Niña) y los caudales máximos, haciendo la aclaración de que esta relación no es lineal. También se analizan efectos consecuentes en el sector eléctrico,

pecuario, agrícola, en incendios forestales y en la salud. La Tabla 1 muestra el registro de caudales medios en periodos de La Niña y El Niño en sus rangos máximos, medios y mínimos evidenciando que para eventos de El Niño incluso el máximo promedio es inferior al del resto de los registros, contrario al máximo en eventos de La Niña cuyo valor es superior a el resto de los registros.

Tabla 1: Comportamiento de caudales máximos, medios y mínimos medios anuales en algunos ríos del Valle del Río Cauca

Río	Período	Años	Registro Total			Período de El Niño			Período La Niña		
			Caudal medio (m3/s)			Caudal medio (m3/s)			Caudal medio (m3/s)		
			Max	Med	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Min
Amáime	1984-1994	10	8,2	5,0	1,6	3,4	2,5	1,6	7,4	7,4	7,4
Bolo	1960-1994	34	12,0	4,0	0,8	5,0	2,3	0,8	8,7	7,2	5,1
Bugala Gde	1976-1994	18	23,3	13,9	8,2	12,4	10,3	8,2	19,4	19,4	19,4
Desbaratado	1972-1994	22	5,8	2,6	0,8	4,0	1,9	0,5	5,3	4,1	3,1
Fraile	1961-1994	33	10,2	6,3	1,8	7,0	4,3	1,8	10,4	8,3	5,4
Garrapatas	1979-1994	15	19,0	13,0	8,1	10,9	9,7	8,1	15,8	15,8	15,8
Jamundi	1946-1994	48	7,3	4,2	1,5	4,7	3,8	2,9	8,0	7,1	5,0
La Vieja	1946-1994	48	152,0	88,0	47,0	75,6	60,4	47,0	156,0	127,6	83,3
Ovejas	1964-1994	30	28,4	18,4	11,1	19,5	13,8	8,3	28,3	23,8	16,4
Palo	1946-1994	48	33,6	15,3	4,7	12,0	9,1	4,7	23,1	19,5	15,0
Quinamayo	1970-1994	24	7,3	4,2	1,5	3,9	2,5	1,5	6,7	6,3	5,6
Timba	1946-1994	48	29,9	20,6	12,6	23,9	16,3	12,7	30,7	27,4	24,3
Tulua	1945-1994	49	29,8	15,4	8,6	14,9	11,7	9,1	29,4	22,8	19,4
Cauca	1946-1994	48	301,0	193,0	113,0	184,0	146,0	112,8	350,6	268,6	178,9
Cauca	1961-1994	33	673,0	399,0	188,0	319,1	267,0	198,0	713,0	617,3	518,0
			89,4	53,5	27,3	46,7	37,4	27,9	94,2	78,8	61,5

- En “Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia” (Poveda & Mesa, 1996), los autores presentaron diversos análisis para cuantificar la relación entre los caudales medios en Colombia con el fenómeno El Niño – Oscilación del Sur y sus fases extremas. También se analizan diversas maneras de predecir este fenómeno en busca de encontrar una relación hidrológica con la ocurrencia e intensidad de este fenómeno, concluyendo que las anomalías en los fenómenos hidrológicos están supeditadas a aquellas de los fenómenos oceánicos y atmosféricos. Sin embargo, el sistema océano-tierra-atmósfera es un sistema acoplado en donde no es posible definir inequívocamente el principio y el fin en las cadenas de causalidad.

Se destaca de la revisión de antecedentes, que hay una relación clara entre precipitaciones y movimientos en masa. Según Moreno et al. (2006), La Niña, especialmente en la región Andina, incrementa el riesgo de deslizamientos debido a la acumulación de lluvias, fenómeno que también es congruente con los datos presentados por Vargas Cediell (2020), donde los meses de mayor precipitación en Nariño coincidieron con el aumento de eventos de MM. Dado que esta relación está ampliamente documentada, es importante aclarar que el objetivo de la presente investigación no es

analizar directamente la correlación entre precipitaciones y movimientos en masa, sino examinar la influencia del fenómeno ENOS tanto sobre los movimientos en masa como sobre la precipitación.

Con base en esto, se identificó que la investigación de (Naranjo Bedoya et al., 2019) citada en el numeral 6, es especialmente relevante, ya que, al igual que este trabajo, tiene como objetivo analizar la influencia del fenómeno ENOS en los movimientos en masa. Teniendo en cuenta lo anterior, se ha tomado dicha investigación como principal referencia para el planteamiento metodológico de este estudio incluyendo:

- El uso del MEI.v2 como variable representativa del ENOS que coincide con lo mencionado en el marco teórico donde se considera como el índice más completo para monitorear el ENOS (Mazzarella et al., 2013).
- DesInventar como base de datos para los registros de MM.
- Polígonos de Thiessen para determinar el área de influencia de las precipitaciones según las estaciones meteorológicas.

Además, se intuye que la influencia de ENOS en los movimientos en masa no es geográficamente homogénea. Según Canchala et al. (2020), la región Andina de Nariño está más influenciada por el fenómeno ENOS que la región Pacífica.

Cabe mencionar que varios autores coinciden en utilizar el coeficiente de Pearson para hallar el grado de relación entre dos eventos, teniendo en cuenta lo anterior, esta investigación utilizará el mismo coeficiente para obtener los resultados de su estudio.

Finalmente, los avances científicos relacionados con la analítica de datos, por medio de la estadística y en general los algoritmos de programación han permitido aumentar el conocimiento que se tiene sobre el comportamiento climático de la región, incluso permitiendo anticiparse a dichos eventos.

3. METODOLOGÍA

Esta sección presenta, en orden secuencial, los procesos desarrollados para llevar a cabo la investigación. En primer lugar, se recopilieron las bases de datos de las variables de estudio a partir de diversas fuentes, incluyendo IDEAM, DesInventar y NOAA, que proporcionaron, respectivamente, información sobre la precipitación mensual en Nariño, los registros de movimientos en masa en la región y los valores mensuales del Índice Multivariado de El Niño (MEI.V2). Estos datos sirvieron como insumo para el análisis posterior, en el cual se generaron las series de tiempo y, finalmente, se determinó el coeficiente de correlación de Pearson entre todas las variables.

3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

3.1.1. Base de Datos Historial de Movimientos en Masa

La base de datos de los registros de movimientos en masa ocurridos en el departamento de Nariño se obtuvo de la página web de DesInventar⁹ (Sistema de Inventario de Desastres). (Sistema de Inventario de Desastres). DesInventar es una herramienta conceptual y metodológica para la construcción de bases de datos de pérdidas, daños o efectos ocasionados por emergencias o desastres. Lo primero que se realizó fue acceder a la sección de “Bases de datos”. Al seleccionar esta opción, el usuario es dirigido a la vista de la herramienta principal. Allí se encuentra el listado de los registros de eventos geológicos clasificados por país. En esta página el usuario deberá seleccionar el país de interés, en este caso “Colombia”.

Una vez se ha seleccionado el país de interés, se puede observar el resumen de actividades geológicas por medio de mapas, tablas y gráficos, los cuales darán al usuario un entendimiento inicial de los efectos de muchos tipos de fenómenos ocurridos en la región. Lo siguiente es dirigirse a la pestaña de “Quary” (consulta), que se encuentra en la cinta de opciones de la parte inferior del encabezado. Se abrirá una página similar a un formulario. En esta ocasión, el usuario puede filtrar toda la información contenida en la herramienta de acuerdo con sus necesidades. En este caso, se seleccionó de la primera columna de opciones que corresponde a los diferentes tipos de eventos o amenazas geológicas, la opción de “LANDSLIDE” o “movimientos en masa” en español. En la segunda columna, se selecciona el departamento de interés, que en este caso corresponde al departamento de Nariño. Ahí se activará la información de la tercera columna que corresponde a los diferentes municipios del departamento. Como este estudio contempla la información de todo el departamento no se debe seleccionar nada en esta columna de opciones. Finalmente se genera la base de datos dando clic en el botón que se encuentra en la parte inferior derecha “View Data”.

Se generará una tabla con la información seleccionada como se muestra en la Figura 11. La información que se genera incluye 945 registros organizado en las columnas de: Serial, tipo de evento, Departamento, Municipio, fecha, localización exacta, Número de muertos, Numero de heridos, número de desaparecidos, Viviendas destruidas, Viviendas damnificadas, si fue afectación directa o indirecta, número de reubicaciones, número de evacuaciones, el valor de las pérdidas económicas, valor de las pérdidas económicas locales, centros educativos, hospitales, Daños en cultivos, pérdida de ganado, metros lineales de daños en vías, GLIDEnumbe y comentarios.

⁹ <https://www.desinventar.org/>

The screenshot shows the 'DesInventar Sendai' web application. At the top, there's a navigation bar with 'HOME', 'ANALYSIS', 'ADMINISTRATION', 'DOWNLOAD', 'ABOUT', and 'GET BOOKMARK'. Below this is a 'Data: Query Results' section with a table of landslide events. The table has columns for Serial, Event, Departamento, Municipio, Date, Location, Deaths, Injured, Missing, and Houses. The data is filtered for 'Region Colombia' and 'Event LANDSLIDE'. The table shows various records from 1938 to 2017, all categorized as 'LANDSLIDE' events. The interface also includes a search bar, a 'View data' button, and a 'View map' button.

Serial	Event	Departamento	Municipio	Date	Location	Deaths	Injured	Missing	Houses
1939-0264	LANDSLIDE	Nariño	Barbacoas	1939/08/18					
1939-0809	LANDSLIDE	Nariño	Magüí	1939/01/18	C. San Luis				
1939-1152	LANDSLIDE	Nariño	Tuquesne	1939/12/20					
1971-0790	LANDSLIDE	Nariño	Pasto	1971/07/07					
UNGRD-01874	LANDSLIDE	Nariño	Barbacoas	2013/06/01					
1982-0044	LANDSLIDE	Nariño	Pasto	1982/01/15					
DGR-2010-02050	LANDSLIDE	Nariño	Pasto	2010/12/27					
DGR-2011-00096	LANDSLIDE	Nariño	Sandoná	2011/04/29					
DGR-2011-01371	LANDSLIDE	Nariño	Albán	2011/06/07					
DGR-2011-02021	LANDSLIDE	Nariño	Potosí	2011/11/16	POTOSÍ				
DGR-2011-02679	LANDSLIDE	Nariño	El Rosario	2011/12/05	EL ROSARIO				
DGR-2011-02706	LANDSLIDE	Nariño	Contadero	2011/12/07	CONTADERO				
DGR-2011-02801	LANDSLIDE	Nariño	Leiva	2011/12/17	LEIVA				
DGR-2011-02828	LANDSLIDE	Nariño	Sapuyes	2011/12/22	SAPUYES				
UNGRD-2012-0009	LANDSLIDE	Nariño	Sandoná	2012/01/09					
UNGRD-2012-0011	LANDSLIDE	Nariño	Pasto	2012/01/17	VEREDAS MAPACHICO Y SANTA HELENA				

Figura 11: DESINVENTAR, vista de página con base de datos de interés.

Esta base de datos es exportada a un archivo CSV para su posterior análisis. De la información obtenida cabe mencionar varios puntos relevantes:

1. Las fechas de los registros de esta base de datos van desde el año 1938 hasta el año 2017.
2. No aparece clasificado el tipo específico de MM para el evento. Todos se registran como “LANDSLIDE”.
3. No contiene información sobre la ubicación geográfica exacta o coordenadas del lugar donde ocurrió el evento; la ubicación geográfica que se encuentra registrada corresponde al nombre del municipio. En algunos registros se especifica en la parte de “notas” la vereda, o la vía afectada del municipio, es decir, una referencia aproximada al lugar del evento. Esta situación implicó la creación de una base de datos de los MM del departamento con coordenadas aproximadas levantadas por el autor teniendo en cuenta la descripción de cada registro. Lo anterior se explicará más adelante.

Se podría pensar que a raíz de estas inconsistencias la base de datos de DesInventar resulte poco conveniente para el estudio. Sin embargo, la otra opción que corresponde a la base de datos del SIMMA es todavía más inconsistente, esta base no presenta la temporalidad de los datos de manera correcta. Mostrando agrupaciones anormales de datos, con periodos de tiempo llanos como contraparte. La Figura 12 corresponde a la captura de pantalla de los registros de la base de datos del SIMMA donde se puede evidenciar que 10 eventos de distintas locaciones se registraron en un mismo día. Desafortunadamente esta situación se presenta frecuentemente afectando el desarrollo de este tipo de trabajos (Burbano Lopez, 2025) Debido a esta situación, se descartó el uso de esta base de datos.

Deslizamiento	01/08/2002	NARIÑO	POTOSÍ	POTOSÍ
Deslizamiento	01/08/2002	NARIÑO	POTOSÍ	POTOSÍ
Flujo	01/08/2002	NARIÑO	POTOSÍ	POTOSÍ
Deslizamiento	01/08/2002	NARIÑO	POTOSÍ	POTOSÍ
Flujo	01/08/2002	NARIÑO	POTOSÍ	POTOSÍ
Reptación	01/08/2002	NARIÑO	MALLAMA (Piedrancha)	MALLAMA (Piedrancha)
Reptación	01/08/2002	NARIÑO	MALLAMA (Piedrancha)	MALLAMA (Piedrancha)
Reptación	01/08/2002	NARIÑO	MALLAMA (Piedrancha)	MALLAMA (Piedrancha)
Reptación	01/08/2002	NARIÑO	MALLAMA (Piedrancha)	MALLAMA (Piedrancha)
Reptación	01/08/2002	NARIÑO	MALLAMA (Piedrancha)	MALLAMA (Piedrancha)

Figura 12: SIMMA, vista base de datos registros de MM.

Continuando con la recopilación de información obtenida de DesInventar. Fue necesario un preanálisis de la base de datos de los MM de Nariño con el fin de establecer el periodo de estudio considerando los niveles de incertidumbre en las ventanas temporales de la observación. Para tal fin, se adecuó la información obtenida por cada mes de cada año versus el total de eventos en todo el departamento. Los datos de cantidad de MM versus el año registrado se muestran en la Figura 13.

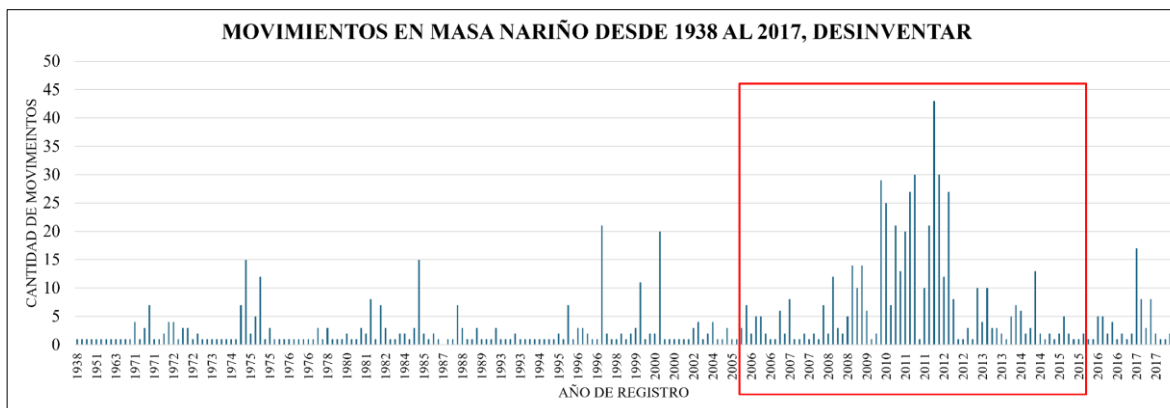


Figura 13: Cantidad de Movimientos en Masa en Nariño vs. Año de registro.

La observación del gráfico de la Figura 13 permite identificar la ventana temporal más conveniente para realizar el análisis enmarcada en un recuadro rojo que contempla un periodo de 10 años. El máximo de todos los registros se encuentra en el periodo 2012-01 con un total de 43 registros. Los siguientes 4 máximos ocurrieron en periodos cercanos: 30 eventos registrados en 2011-06 y 2012-02, 29 eventos en 2010-11, 27 en 2011-6 y 2012-4, 25 en 2010-12. Con base en esos comportamientos, resulta interesante estudiar el período del 2010 al 2012, por lo anterior se eligió una ventana temporal de observación desde el año 2006 al 2015 correspondiente a 10 años de estudio.

Cabe mencionar que, de los 945 registros de MM en Nariño, el 57% (543) de los datos se concentran en esta ventana temporal. Esta ventana temporal proporciona el intervalo de tiempo en el que se centrará el estudio. Por lo tanto, solo se obtendrán los datos de ENOS y de precipitación de este periodo de tiempo. Finalmente, considerando que la lluvia es el principal factor detonante de movimientos en masa en ambientes tropicales y zonas de montaña (Aristizábal et al., 2022) y debido a que las bases de datos no especifican el factor detonante del movimiento, se asume para el presente estudio que todos los eventos fueron desencadenados por lluvia.

Una vez identificada la ventana temporal de interés para el estudio (incluye 543 registros en el departamento), se procedió a obtener las coordenadas geográficas de cada registro. Para ello se realizó la lectura de la descripción de cada registro de DesInventar con el fin de ubicar aproximadamente el evento y asignar su respectiva coordenada. En los casos en que la ubicación no estaba especificada, se utilizó la coordenada del centro del casco urbano del municipio. Por otro lado, había registros que hacían referencia a múltiples eventos. Es decir, un registro en DesInventar no necesariamente se relaciona con un único evento. Frecuentemente se notificaban varios eventos en distintas ubicaciones dentro de un solo registro. Esta situación implicó que la base de datos creada con las coordenadas de los eventos pasara de 543 eventos a 745 eventos. A continuación, se presentan algunas situaciones relevantes a tener en cuenta:

1. La ubicación de las coordenadas de los eventos se obtuvo de manera aproximada de acuerdo con la descripción contenida en el campo de “Comments” de cada registro. Esta información se

localizaba en Google Maps y la coordenada arrojada se asignaba al registro. Por ejemplo. Un registro podía tener la siguiente notación:

“cdgrd de Nariño; informa; por deslizamiento; vía Junín - barbacoas cerrada en los puntos jaboncillo y tinajillas; situación en desarrollo. -111 cdgrd de Nariño informa vía e-mail: como consecuencia de las lluvias presentadas en los últimos días el municipio de barbacoas reporta deslizamientos en la vía Junín - barbacoas en los sectores: vereda jaboncillo - chunun - la florida - el descanso - tinajillas no hay paso para ningún tipo de vehículos; reporta cuerpo de bomberos voluntarios y coordinador cmgrd barbacoas. -115”

De esta lectura, se busca la palabra “jaboncillo” o “Tinajillas” junto al nombre del municipio, en este caso *Barbacoas*. Posteriormente, en el buscador de Google Maps se asigna la coordenada arrojada como la correspondiente al evento de dicho registro.

2. Hubo eventos que se describen en los registros que no pudieron ser ubicados geográficamente pues el nombre con el que se referenciaba no se encontró relacionado en Google Maps.
3. Es posible que la ubicación asignada aproximadamente no sea la real si en Google Maps está mal asignado el nombre de las ubicaciones.

Para más información, revisar la Tabla 4 del Anexo 1 donde se relaciona el nombre del municipio, el número de registros (es decir, la cantidad de registros contenidos en la base de datos de DesInventar) y el número de eventos identificados para cada municipio.

3.1.2. Base de Datos Variable ENOS

Como se mencionó en la revisión de antecedentes se eligió el índice del MEI.V2 a escala mensual para estudiar la relación entre ENOS y los MM. Los registros MEI.V2 de la ventana temporal de interés se obtuvieron de la página Physical Sciences Laboratory del NOAA¹⁰. La Figura 14 presenta la vista de la página principal del servicio, en esta posición se selecciona la pestaña que se ve en la parte inferior de la ilustración correspondiente a “MEI.v2 Values”. Esta opción le mostrará la tabla de los registros mensuales del MEI.V2 desde el año 1979 como aparece en la Figura 15.

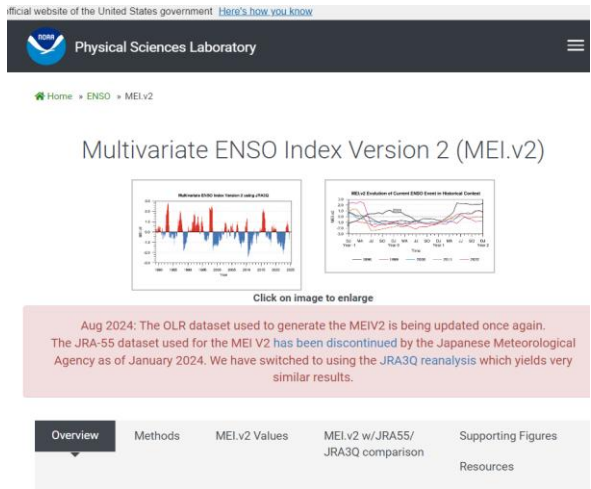


Figura 14: NOAA, Vista página principal

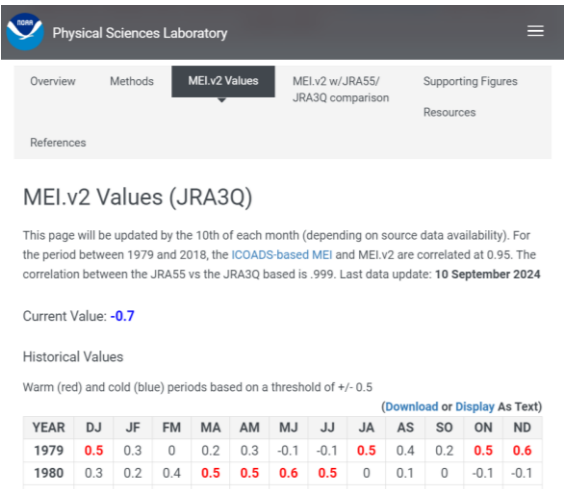


Figura 15: NOAA, Vista de registros

Los valores grises de la tabla corresponden a meses fase neutra y van de -0.5 a 0.5, los azules a meses La Niña y van del -0.5 al -3, finalmente los meses El Niño van entre el 0.5 y el 3. La Figura 16

¹⁰ <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>

presenta los valores del MEI.V2 en la ventana temporal de estudio por cada mes (para más información ver Anexo 4).

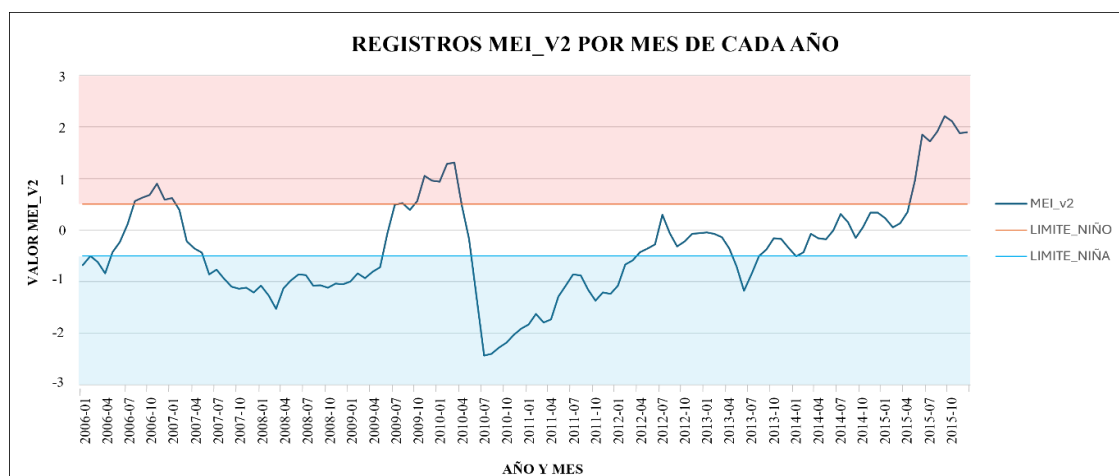


Figura 16: Valores MEI.V2 mensuales en la ventana temporal de estudio

3.1.3. Base de Datos Información Climatológica

De acuerdo con el periodo de estudio escogido con base en los datos de movimientos en masa, se obtuvo la base de datos hidrometeorológica de la zona de interés. Esta información se extrajo de la página web del IDEAM¹¹, desde el portal DHIME que permite el acceso a las herramientas de gestión de series temporales, datos de laboratorio, acceso bajo demanda a datos oficiales, apoyado en mapas inteligentes, herramientas analíticas y geoinformación del IDEAM.

Para acceder a este portal se debe hacer clic sobre la opción “Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos” que se encuentra en la parte izquierda de la página. Este clic dirige al usuario al portal que se abre en una nueva pestaña. Después de que el usuario acepte los términos del Banco de Datos, se debe especificar la información adecuada para la consulta, donde se requieren campos como fecha inicial, fecha final, parámetro de búsqueda, frecuencia de los datos (si es precipitación diaria, mensual, anual, etc.). Resulta importante hacer la aclaración sobre la frecuencia de datos usada en este estudio. Ya que la escala temporal del MEI.V2 es mensual y teniendo en cuenta que se busca confrontar las bases de datos ENOS-Precipitaciones, se decidió trabajar con una frecuencia mensual. Sin embargo, para objetivos relacionados con el estudio de la lluvia como detonante de los MM la escala temporal debe ser diaria, y se recomienda hacer un análisis de lluvias antecedentes como lo menciona (Moreno et al., 2006). La información ingresada en los campos de búsqueda de DHIME para la obtención de resultados esperados se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Resumen datos ingresados en base de datos DHIME del IDEAM para obtener información de la precipitación en estaciones meteorológicas del departamento de Nariño

Periodo	Fecha Inicial	01/01/2006
	Fecha Final	31/12/2015
Serie de Tiempo y Frecuencia	Parámetro	Precipitación
	Variable	Lista completa
	Descripción	Precipitación total mensual
Datos Estación	Departamento	Nariño
	Municipio	Todo

¹¹ <http://dhime.ideam.gov.co/webgis/home/>

Con estos parámetros, se obtuvo el listado de las estaciones meteorológicas de todo el departamento de Nariño incluyendo, código de la estación, nombre, fecha inicio, fecha fin y cantidad probable de datos. Del listado, se identificaron las estaciones cuyo valor en la columna "Cantidad Probable" correspondía a 121, lo que indicaba que dichas estaciones probablemente habían registrado datos de precipitaciones para la totalidad de los meses contemplados en el estudio (121 meses en total). Este criterio de selección fue fundamental para asegurar la consistencia y continuidad de los datos, ya que estaciones con registros incompletos podrían afectar la precisión y representatividad del análisis. Como resultado de este proceso de filtrado, se descartaron 43 estaciones, seleccionando finalmente un total de 57 estaciones.

Finalmente, para escoger las estaciones a utilizar en la investigación, se implementó la metodología de los polígonos de Thiessen generados en ArcGis, el cual se basa en la creación de polígonos que representan áreas de influencia exclusiva alrededor de cada estación o punto de medición. La línea que divide dos polígonos adyacentes se encuentra equidistante entre las estaciones vecinas. Sin embargo, se reconoce que este método no tiene en cuenta la elevación del terreno y no consideran estrictamente las características hidrometeorológicas locales o la variabilidad espacial de las lluvias en la región (Aristizábal et al., 2011). Este método se utiliza dado los antecedentes de naranjo, pero se reconoce que para una zona montañosa hay métodos más apropiados como el de las isoyetas.

En primera instancia se obtuvo el archivo shapefile correspondiente a los puntos geográficos de las 57 estaciones con sus respectivas coordenadas geográficas. Este archivo se superpuso sobre el mapa del departamento de Nariño, lo que permitió generar los polígonos de Thiessen correspondientes. El análisis mostró un exceso de estaciones en la Zona Andina, lo que resultó en algunos polígonos con áreas de influencia poco significativas. Con base en esto, se seleccionaron las estaciones mejor distribuidas (diez de la Zona Pacífica y diecisiete de la Zona Andina) para un total de 27 estaciones. La Figura 17 corresponde al mapa de los polígonos de Thiessen de las estaciones elegidas para el estudio.

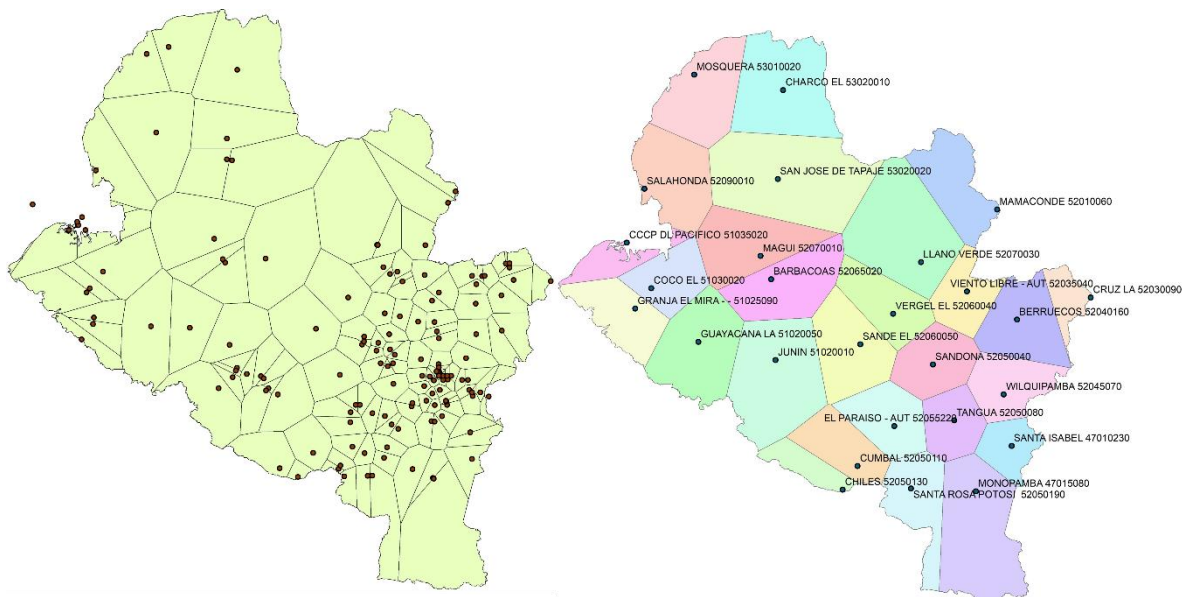


Figura 17: Comparación polígonos de Thiessen entre el total de las estaciones meteorológicas (57) versus estaciones escogidas (27)

3.2. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Esta sección describe la metodología utilizada para procesar y analizar los datos en bruto obtenidos previamente en el capítulo 3.1. El análisis se desarrolló a través de tres enfoques: espacial, series de tiempo y correlación de Pearson. Es importante destacar que este capítulo se centra en la descripción detallada de los procedimientos empleados, sin presentar resultados, los cuales serán abordados en la sección 4.

3.2.1. Análisis Espacial

Para ordenar la información entre lluvias y los eventos de MM ocurridos en Nariño, se sobrepuso en el mapa de polígonos de Thiessen (que se obtuvieron para identificar el área de influencia de las estaciones meteorológicas seleccionadas para el estudio de Nariño), los puntos geográficos de los eventos en todo el periodo de estudio. Con esto se asignó a cada evento, el polígono de Thiessen al que corresponde. Este paso es necesario para asignar efectivamente el número de eventos a cada zona de estudio que finalmente se graficarán en las series de tiempo. El mapa también es importante pues con él se identifica la distribución de las densidades de eventos de MM del departamento.

Al realizar la superposición de información eventos/polígonos de Thiessen, se identificó que los MM no coincidieron con al menos 5 estaciones de la Zona Pacífica y una estación de la Zona Andina en el periodo de estudio. Razón por la cual se eliminaron del análisis los 6 polígonos mencionados quedando un total de 21 estaciones relevantes para el estudio. Las estaciones excluidas del estudio por no contener en su área de influencia, registros de eventos, corresponden a: Santa Isabel de la región Andina; El Coco, Granja El Mira, La Guayacana, Salahonda y San José del Tapaje de la región Pacífica. De este análisis también se identificó que hay una densidad muy superior en cuanto a los eventos ocurridos en la región Andina versus la región Pacífica. Se decide por lo tanto realizar tres análisis: por un lado, la región Andina, por otro la región Pacífica y finalmente, el análisis de todo el departamento. La Figura 18 corresponde al mapa de superposición de eventos/polígonos de Thiessen de Nariño.

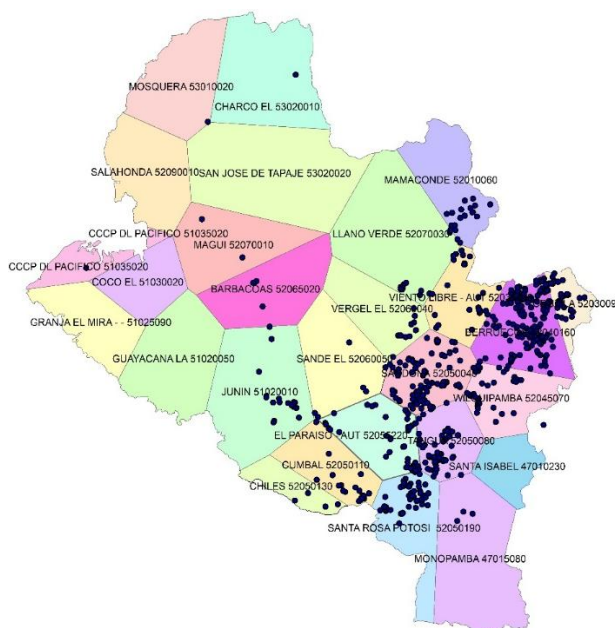


Figura 18: Mapa polígonos de Thiessen 27 estaciones meteorológicas – eventos de MM

Finalmente, en la Tabla 3 se presentan las 21 estaciones escogidas, el número de eventos por cada estación para el área Pacífica y Andina de Nariño respectivamente con sus respectivas coordenadas geográficas y el área de influencia de cada polígono generado. El valor del área de influencia de cada estación se requerirá para el cálculo del promedio ponderado de precipitaciones de cada región.

Tabla 3: Listado de las 21 estaciones meteorológicas finales del departamento de Nariño; coordenadas y área de influencia de su respectivo polígono de Thiessen asociado.

REGION	NÚMERO	ESTACIÓN	Nº EVENTOS	LATITUD	LONGITUD	AREA [Km²]
PACIFICA	1	BARBACOAS	4	1,67	-78,14	1527,834046
	2	CCCP DL PACIFICO	1	1,81916667	-78,73	2965,425006
	3	CHARCO EL	2	2,44188889	-78,0913333	2807,812932
	4	MAGUI	2	1,765	-78,1838889	2801,918622
	5	MOSQUERA	2	2,50508333	-78,45452778	1852,205218
ANDINA	6	BERRUECOS	194	1,50527778	-77,13530556	1170,483853
	7	CHILES	5	0,81166667	-77,84833333	454,267721
	8	CRUZ LA	21	1,59527778	-76,83416667	384,17398
	9	CUMBAL	59	0,908	-77,78711111	849,266696
	10	EL PARAISO	22	1,07061111	-77,63688889	938,317947
	11	JUNÍN	39	1,34027778	-78,12233333	3088,457344
	12	LLANO VERDE	20	1,73972222	-77,52777778	2315,591254
	13	MAMACONDE	23	1,95463889	-77,21638889	1083,559705
	14	MONOPAMBA	4	0,80491667	-77,30361111	2239,813754
	15	SANDE EL	9	1,40472222	-77,77583333	1255,994055
	16	SANDONA	129	1,32225	-77,47919444	945,095112
	17	SANTA ROSA POTOSI	52	0,81625	-77,56852778	1001,726843
	18	TANGUA	60	1,09416667	-77,39197222	804,007123
	19	VERGEL EL	24	1,52916667	-77,64169444	956,427392
	20	VIENTO LIBRE	33	1,62	-77,34	754,579574
	21	WILQUIPAMBA	40	1,19999833	-77,19	1167,469919

Se generaron nuevamente los polígonos de Thiessen, esta vez considerando solo 21 estaciones, con el objetivo de determinar su nueva área de influencia. La Figura 19 muestra el mapa del departamento de Nariño con los polígonos de Thiessen resultantes.

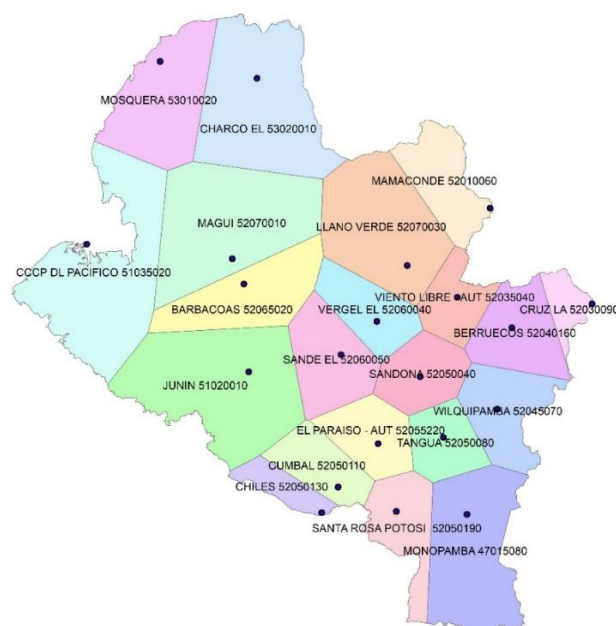


Figura 19: Mapa polígonos de Thiessen 21 estaciones meteorológicas – eventos de MM

3.2.2. Series de Tiempo

Para generar los gráficos de las series de tiempo se debió adecuar las bases de datos de las tres variables de estudio. los periodos de tiempo anuales y mensuales corresponden a calendario.

Se calculó un valor anual del MEI.V2 a partir de los valores mensuales originales, promediando los registros de enero a diciembre. Paralelamente, se determinó el estado predominante del ENOS en cada año (El Niño, La Niña o Neutro) según la fase que presentó mayor frecuencia. Ambos análisis coincidieron en la asignación anual de la Fase ENOS. Para las gráficas de series de tiempo, los años y meses con fase El Niño se representaron con un punto rojo, los de La Niña con un punto azul y los Neutros con un punto blanco.

En la base de datos de los movimientos en masa, se contabilizó el total de eventos por zona (Andina, Pacífica y Nariño), sumando los registrados de cada estación dentro de ella. Posteriormente, se desglosó el número de eventos por zona a nivel mensual y anual. Esta información se graficó en diagramas de barra para las series de tiempo.

Finalmente, a la base de datos de precipitaciones mensuales se le aplicó un Extraction, transformer y load de datos (ETL) o limpieza de datos. Esto consistió en:

1. Identificar, dentro de los registros mensuales de cada estación, aquellos que no contienen valores de precipitación.

Ya que los vectores para calcular correlaciones requieren información completa en cada uno de sus índices y con el fin de evitar imputar valores ceros o nulos se calcularon valores para los registros mensuales vacíos a partir del promedio entre los valores de precipitación del mismo mes de las estaciones más próximas. Por ejemplo, si en el mes de marzo del año 2009 la estación 4 (Magui - 52070010) no tenía valor registrado de precipitación. Se calcula dicho faltante promediando la lluvia registrada para ese mismo mes de las estaciones más próximas que corresponden a las estaciones de barbacoas y el coco (ver Anexo 3). La Figura 20 presenta el diagrama de Red de estaciones de Nariño creado a partir de la topología de adyacencias que se plantea en la

3.3. ANEXO 3

La Tabla 7 muestra las estaciones relacionadas en la obtención de un valor faltante.

2. Tabla 7.

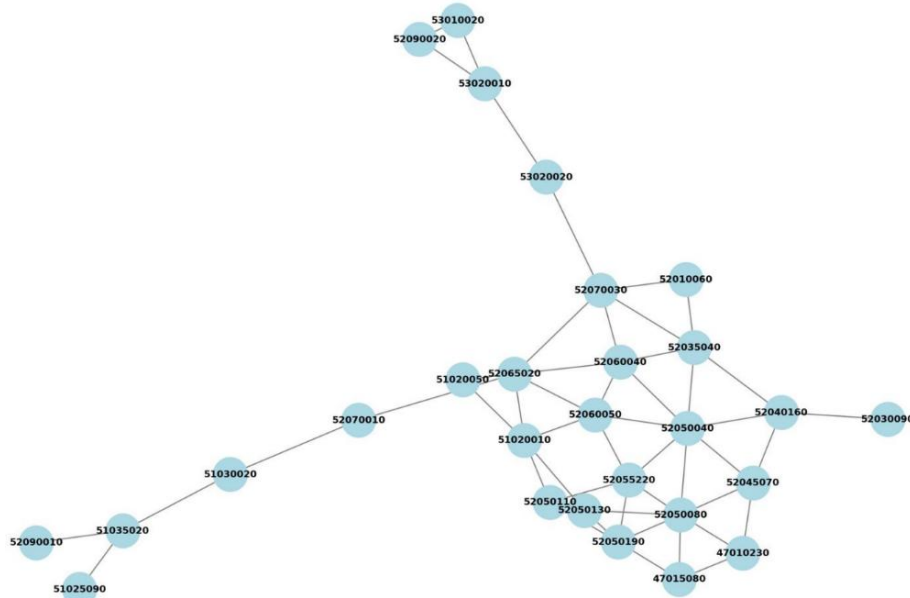


Figura 20: Diagrama de red de estaciones meteorológicas del departamento de Nariño

3. Promediar el valor de las precipitaciones por zona mensual y por zona anual según las estaciones pertenecientes a las respectivas zonas. Debido a que las series de tiempo incluyen los datos de 120 meses de estudio de las 21 estaciones meteorológicas, los valores de precipitación de cada mes se obtuvieron del promedio ponderado entre las estaciones de interés según el área de inferencia de cada una. La Ecuación 1 corresponde al cálculo para obtener el promedio ponderado mensual de precipitación de cada región.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * X_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Ecuación 1

$\bar{P}$: precipitación media mensual

X_i : Precipitación de la estación i

A_i : Área de la estación i

n: Número de estaciones meteorológicas

Al finalizar el proceso de adecuación de cada base de datos, se graficó la información usando la herramienta para plots de MATLAB. En el eje X se establecen la ventana temporal, en el eje Y derecho los valores discretos de número de movimientos en masa y en el eje Y izquierdo los valores de precipitación en mm columna de agua.

3.3.1. Coeficiente de Correlación

Cuando los datos ya se han estructurado, limpiado y organizado, se procede a obtener el valor cuantitativo de la influencia del ENOS sobre la precipitación y los MM de Nariño. Para ello se utiliza la función `numpy.corrcoef`¹² de la librería de NumPy para Python que devuelve los valores de los coeficientes de correlación producto-momento de Pearson. Estos valores conocidos como R se encuentran entre -1 y 1. La función recibe dos *arrays* y calcula el coeficiente entre ellas.

¹² <https://numpy.org/doc/2.2/reference/generated/numpy.corrcoef.html>

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de la influencia del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en las precipitaciones y los movimientos en masa (MM) en el departamento de Nariño. Los hallazgos se organizan en dos regiones principales: la región Andina y la región Pacífica, debido a sus diferencias geográficas y climáticas. Se analizan las series de tiempo de precipitaciones y MMA, así como la correlación entre estas variables y las fases del ENOS (El Niño, La Niña y fase neutra).

4.1. SERIES DE TIEMPO

En general, las gráficas de series de tiempo de las variables de estudio se presentan de la siguiente manera: el eje Y izquierdo representa el número de deslizamientos, representados con barras naranjas, mientras que el eje Y derecho muestra la precipitación promedio en milímetros (mm) mediante una línea negra. El eje X indica el tiempo en intervalos mensuales o anuales, abarcando desde 2006 hasta finales de 2015. La línea punteada anaranjada señala el promedio de deslizamientos a lo largo del período y la línea punteada gris representa el promedio de la precipitación. Finalmente, la fase ENOS correspondiente a cada periodo se indica con un punto sobre la línea de precipitación: rojo para El Niño, azul para La Niña y blanco para condiciones neutras. (Julieth Alejandra Achicanoy, 2017)

4.1.1. Análisis Zona Andina

En las zonas montañosas, especialmente en la región andina, las pendientes pueden superar el 50%, como se observa en sectores como Sotomayor, donde predominan peñascos abruptos y depresiones fluviales pronunciadas. Estas áreas de alta pendiente están asociadas a procesos geomorfológicos activos, incluyendo domos estructurales quebrados, frentes escarpados y formas torrenciales, lo que contribuye a la inestabilidad del terreno y a la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa (Julieth Alejandra Achicanoy, 2017).

4.1.1.1. Análisis Mensual

La Figura 21 corresponde al gráfico de precipitación, ENOS y MM mensual de la Zona Andina de Nariño, donde se evidencia una relación estrecha entre la cantidad de lluvia y la ocurrencia de MM. Se destaca un máximo de precipitación de 373.5 mm en noviembre de 2010, coincidiendo con una fase “La Niña” y un notable incremento en la cantidad de MM reportados. Este comportamiento es recurrente entre finales de 2010 y mediados de 2012, donde se observa un aumento significativo en los deslizamientos, con picos que superan los 80 eventos en un solo mes. La tendencia general sugiere que el incremento en la precipitación suele estar acompañado de un aumento en los MM, mientras que en los meses sin reportes de deslizamientos, la precipitación presenta una caída abrupta. Sin embargo, hay meses con precipitaciones elevadas donde no se reportan deslizamientos significativos, lo que indica que otros factores, como la acumulación de humedad en el suelo, la geología y la intervención humana, pueden influir en la activación de estos eventos.

Por otro lado, el análisis de los periodos de El Niño muestra una reducción en la cantidad de MM lo que podría estar asociado con una menor cantidad de lluvia y una mayor estabilidad en los suelos. Los periodos Neutros presentan una variabilidad considerable, sin un patrón claro que relacione directamente la precipitación y la ocurrencia de deslizamientos. Sin embargo, en general los eventos de La Niña están ligados a precipitaciones extremas y a un aumento en los MM, mientras que El Niño tiende a generar condiciones más secas, reduciendo la ocurrencia de estos fenómenos.

En contraste con el máximo de precipitación, el mínimo registrado en la gráfica es de 42 mm, un valor que se presenta en un periodo sin reportes de MM. Esto refuerza la idea de que la precipitación juega un papel determinante en la activación de los movimientos en masa, pero también sugiere que otros factores, como la acumulación de humedad en el suelo, la geología del terreno y la intervención humana, pueden influir en estos eventos.

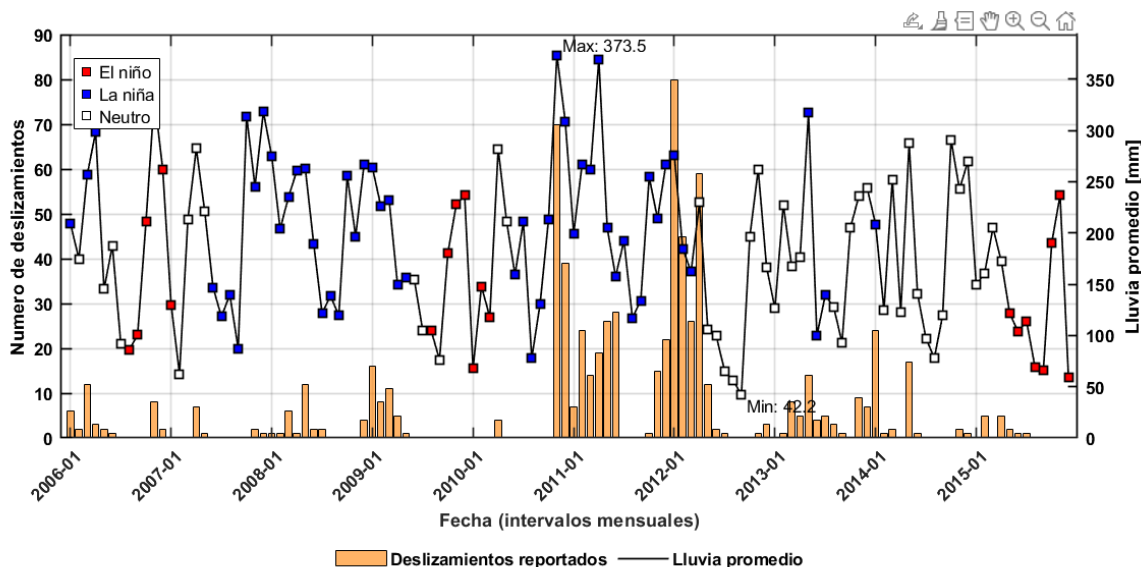


Figura 21: Gráfico de precipitación, ENOS y MM mensual de Zona Andina del departamento de Nariño

El análisis general de la gráfica confirma la influencia del fenómeno ENOS en la ocurrencia de deslizamientos en la Zona Andina de Nariño. Esto subraya la importancia de implementar estrategias de monitoreo y prevención en los periodos de mayor riesgo, considerando no solo los niveles de precipitación mensual, sino también su acumulación en el tiempo y otros factores ambientales que pueden incidir en la estabilidad del terreno.

4.1.1.2. Análisis Anual

La Figura 22 corresponde a la gráfica de precipitación, ENOS y MM anual de la Zona Andina de Nariño. Se observa una clara relación entre la cantidad de lluvia y la ocurrencia de MM, con un patrón de incremento y disminución simultáneo en ambas variables a lo largo del tiempo. El valor máximo de precipitación se registró en el año 2012 con 219.8 mm, coincidiendo con el mayor número de MM reportados en un periodo La Niña, lo que indica que la presencia de precipitaciones intensas contribuyó significativamente a la inestabilidad del suelo y al aumento en la cantidad de MM. Por otro lado, el valor mínimo de precipitación se presentó en 2015 con 137.3 mm, año en el que también se registró el segundo menor número de MM.

Este periodo estuvo marcado por la presencia del fenómeno El Niño, caracterizado por condiciones climáticas más secas y una menor acumulación de humedad en el suelo. La reducción de las lluvias se tradujo en una disminución significativa en la cantidad de MM, resaltando la influencia directa de la precipitación en la ocurrencia de estos eventos. El promedio de precipitación a lo largo del periodo de estudio se mantiene relativamente estable, oscilando entre los 150 y 200 mm anuales. Sin embargo, los años con valores superiores a este rango, como 2010, 2011 y 2012, presentan un aumento considerable en la cantidad de MM. De manera similar, el promedio de MM muestra un

comportamiento ascendente hasta 2012, seguido de una disminución progresiva en los años posteriores, en concordancia con la reducción de la precipitación.

Una situación interesante se presenta en el año 2012, donde se aprecia una notable caída de precipitación siendo un año ENOS neutro, pero justo ocurre el mayor número de eventos de MM. En este punto cabe retroceder al análisis mensual de la serie de tiempo. Bajo esta granularidad se puede entender mejor el fenómeno. Se debe tener en cuenta que el año 2012 se consideró año neutro pues 9 de los 12 meses fueron períodos neutros, excluyendo enero, febrero y marzo que fueron periodos La Niña, siendo justamente el mes de enero el pico con mayor ocurrencia de MM de toda la ventana de estudio de los 10 años con valores de precipitación superiores al promedio de la zona (183.2 mm). Esta situación propicio el comportamiento observado del año (ver Figura 22).

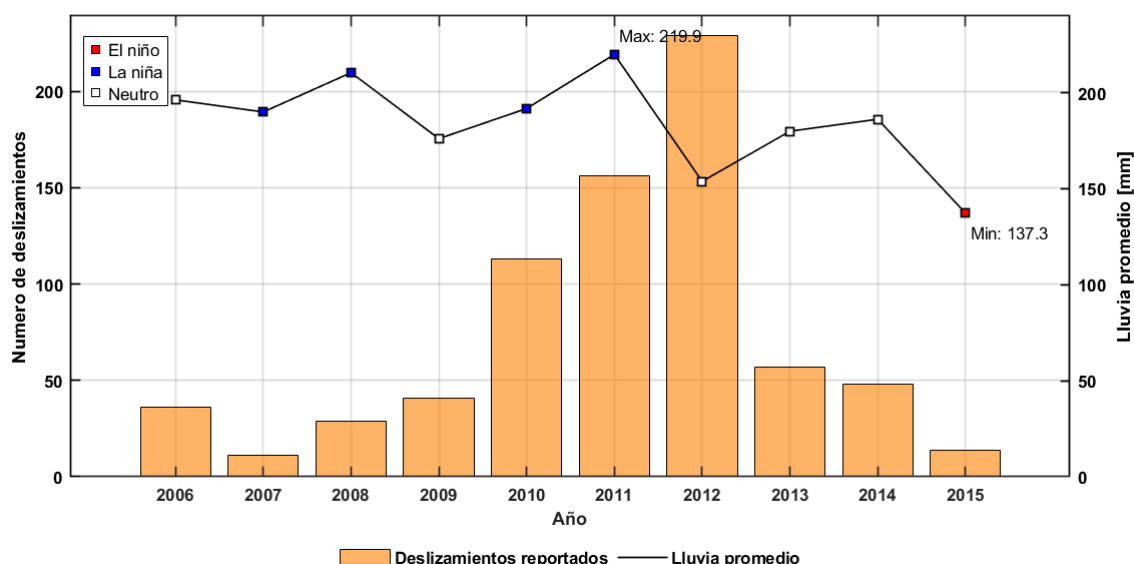


Figura 22: Gráfico de precipitación, ENOS y MM anual de Zona Andina del departamento de Nariño

En general, la gráfica confirma la fuerte influencia del régimen de lluvias en la ocurrencia de deslizamientos en la Zona Andina de Nariño. La presencia del fenómeno de “La Niña”, genera condiciones propicias para la activación de MM debido a la saturación de los suelos, mientras que El Niño se asocia con una reducción en la cantidad de eventos. Estos resultados resaltan la importancia de monitorear las precipitaciones y desarrollar estrategias de mitigación en años con pronósticos de lluvias intensas, con el fin de prevenir desastres y reducir el impacto de los movimientos en masa en la región.

4.1.2. Análisis Zona Pacífica

La zona pacífica presenta una geomorfología diversa que incluye llanuras aluviales, colinas onduladas y zonas montañosas. Las altitudes varían desde el nivel del mar en las zonas costeras hasta aproximadamente 1.500 metros sobre el nivel del mar en las áreas más elevadas. Las pendientes en esta región son generalmente suaves en las llanuras costeras, pero pueden alcanzar inclinaciones moderadas a fuertes en las zonas montañosas y colinas, lo que influye en los procesos de erosión y sedimentación. Esta diversidad geomorfológica afecta la distribución de la vegetación y los usos del suelo (Ojeda, 2023).

4.1.2.1. Análisis Mensual

La gráfica de la Zona del Pacífico de Nariño presentado en la Figura 23, muestra una variabilidad significativa en la precipitación con picos extremos como el registrado en 2007, donde se alcanzó un máximo de 962.3 mm, y mínimos como el de 41.5 mm, lo que evidencia la alternancia entre periodos de lluvias abundantes y meses relativamente secos. En general, los eventos de La Niña (puntos azules) coinciden con los valores más altos de precipitación, mientras que los periodos de El Niño (puntos rojos) presentan valores más bajos.

Aunque la máxima precipitación registrada en el estudio ocurrió en la región Pacífica de Nariño, con un pico de 926.8 mm columna de agua durante un mes con ENOS neutro y el promedio de lluvias en esta región (cerca de 400 mm) fue significativamente mayor que en la región Andina (aproximadamente 200 mm), la cantidad de movimientos en masa en la región Pacífica fue notablemente inferior en comparación con la región Andina. Solo el pico de precipitación en el 2012 en un mes ENOS de La NIÑA coincide con un pico de eventos de MM.

La apreciación es clara en esta zona, la ocurrencia de MM parece no estar tan estrechamente relacionada con la cantidad de precipitación. Aunque la mayoría de los eventos reportados ocurren en meses con lluvias intensas, lo que sugiere una relación con la precipitación **extrema** y la inestabilidad del suelo. Sin embargo, también hay meses con altos niveles de precipitación donde no se registran deslizamientos, lo que podría indicar que son otros factores los que pueden influir en su activación. Durante los periodos de El Niño, las precipitaciones tienden a ser más bajas, lo que probablemente contribuye a una menor ocurrencia de estos eventos. Los periodos Neutros presentan una variabilidad en la precipitación, pero su influencia en los deslizamientos no es tan evidente.

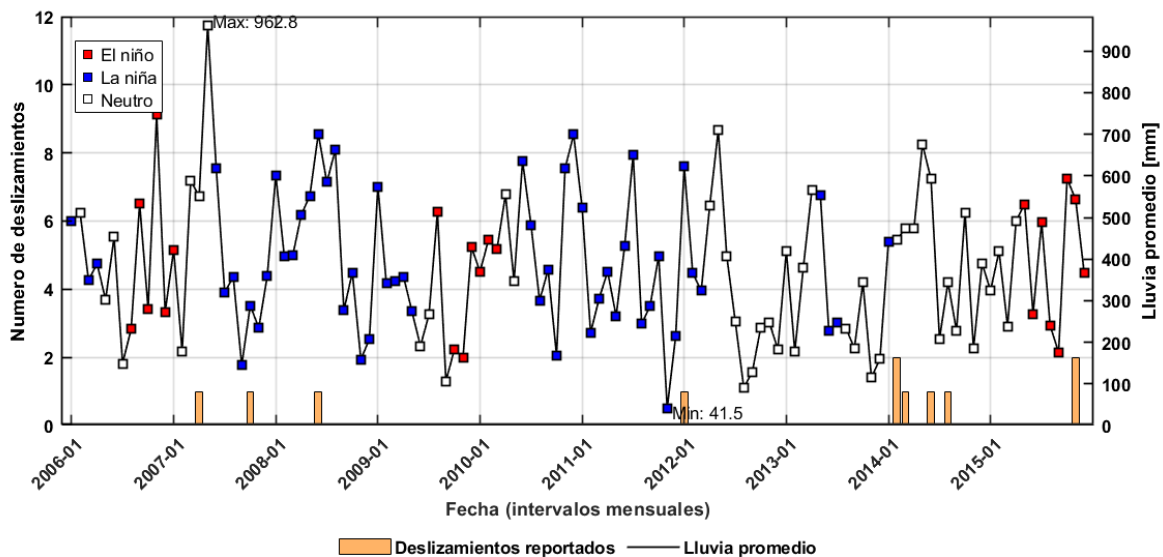


Figura 23: Gráfico de precipitación, ENOS y MM mensual de Zona Pacífica del departamento de Nariño

En términos generales, aunque los deslizamientos no ocurren en todos los meses lluviosos, si hay una correlación entre la cantidad de lluvia y la probabilidad de estos eventos.

4.1.2.2. Análisis Anual

La gráfica de la Figura 24 muestra una desvinculación entre los MM, la precipitación y los periodos ENOS en la Zona Pacífica del departamento de Nariño. La precipitación promedio anual varía

significativamente a lo largo del periodo de estudio, alcanzando su valor máximo en 2008 (453 mm) y el mínimo en 2013 (300.9 mm). Sin embargo, no se observa una correlación clara entre la cantidad de lluvia y los deslizamientos. Por ejemplo, durante los picos de lluvia registrados en 2008 y 2010, los movimientos en masa fueron mínimos o incluso inexistentes. Sin embargo, en 2014, con un nivel de precipitación moderado, se observó un incremento significativo en estos eventos. Esto sugiere que, más allá de la cantidad de lluvia, existen otros factores que influyen en la ocurrencia de movimientos en masa, lo que indica una baja correlación directa entre las precipitaciones y estos fenómenos.

Respecto a la influencia del ENOS, los años dominados por La Niña (2008, 2010 y 2011) presentan valores elevados de precipitación, pero no muestran un incremento significativo en los MM. Mientras que, en el año 2015, bajo la influencia de El Niño se observa una precipitación relativamente alta con un número moderado de deslizamientos.

La región Pacífica del departamento de Nariño es una zona altamente húmeda no solo en el país sino también en el planeta. Es decir que hay una frecuencia sustancialmente alta de precipitación en esta región frente a otras zonas, sin embargo, el relieve de la región al ser una planicie o llanura no presenta riesgo significativo frente a eventos de MM debido a la ausencia de pendientes pronunciadas. Recordemos que estos eventos ocurren cuando la gravedad supera la resistencia del suelo o la roca, lo que suele suceder en terrenos inclinados donde la fuerza gravitacional facilita el desplazamiento de material. En una llanura, las pendientes son bajas, lo que impide que los materiales sueltos se desplacen de manera abrupta. Además, en una llanura, la infiltración del agua en el suelo es más uniforme, reduciendo la acumulación de humedad en puntos específicos que podrían debilitar la estabilidad del terreno.

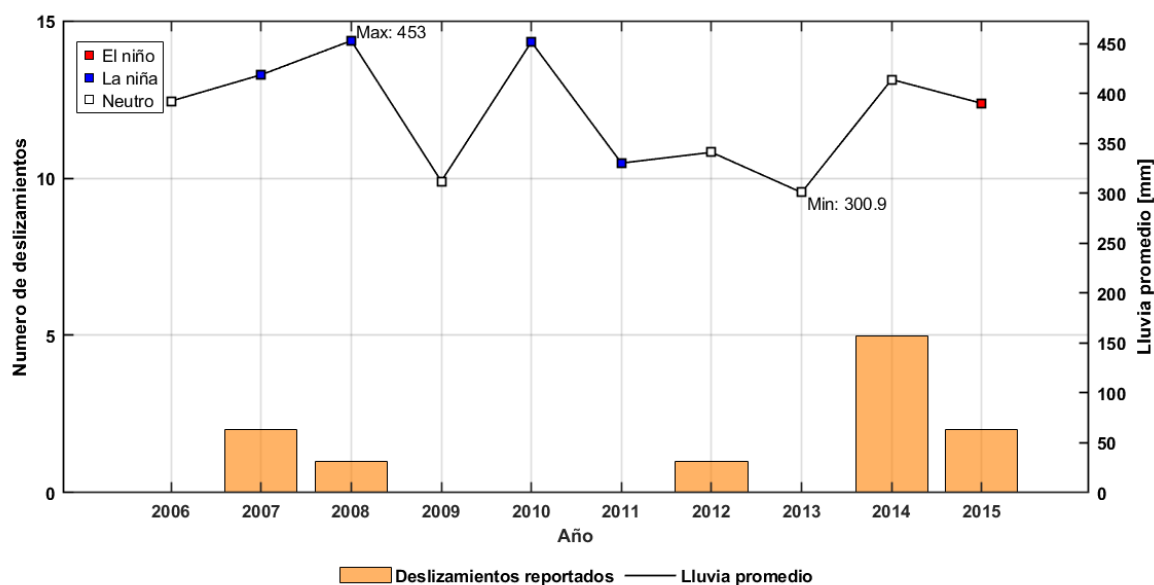


Figura 24: Gráfico de precipitación, ENOS y MM anual de Zona Pacífica del departamento de Nariño

4.1.3. Análisis Nariño

4.1.3.1. Análisis Mensual

La gráfica de la Figura 24 muestra el comportamiento de los MM, la precipitación y los periodos ENOS mensuales de todo el departamento de Nariño. La gráfica de la precipitación y los MM en el

departamento de Nariño muestra una relación significativa entre estos fenómenos y las fases del ENOS. Se observa que el valor máximo de precipitación registrado en el periodo de estudio es de 442.7 mm, alcanzado en un periodo de El Niño con pocos eventos de MM. Teniendo en cuenta que esta información se obtiene de la conjunción de datos entre la Zona Pacífica y la Zona Andina del departamento, se puede pensar que esta situación corresponde al comportamiento presentado exclusivamente la Zona Pacífica que arrastró el extremo general del departamento. Por otro lado, el valor mínimo de precipitación registrado es de 64.5 mm, lo que contrasta fuertemente con los picos de lluvia. Este periodo de baja precipitación se presenta durante una fase Neutra del ENOS y coincide con una disminución en el número de MM reportados, lo que sugiere que la falta de precipitaciones contribuye a una mayor estabilidad del terreno.

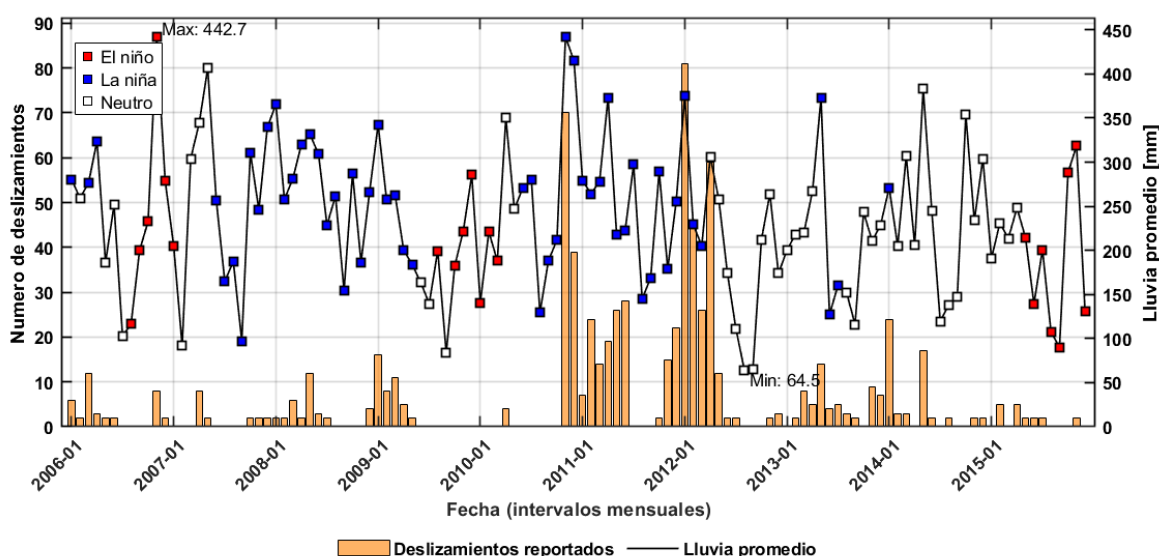


Figura 25: Gráfico de precipitación, ENOS y MM mensual del departamento de Nariño

El comportamiento promedio de las precipitaciones y los MM a lo largo del tiempo refleja una tendencia en la que los eventos de La Niña están asociados a incrementos en ambos parámetros, mientras que, en los periodos de El Niño, la cantidad de deslizamientos disminuye debido a la reducción de las lluvias. Sin embargo, existen meses con precipitaciones elevadas donde no se reportan deslizamientos significativos, lo que indica la influencia propia de la Zona Pacífica o de otros factores.

Entre 2010 y 2012 se evidencia un aumento significativo tanto en la precipitación como en los deslizamientos, lo que podría estar asociado a un evento fuerte de La Niña. Estos datos confirman la influencia del ENOS en la ocurrencia de deslizamientos, ya que La Niña favorece eventos de precipitación extrema y, en consecuencia, un incremento en los deslizamientos, mientras que El Niño tiende a generar condiciones más secas y mayor estabilidad en los suelos.

En general, la gráfica sugiere que el departamento de Nariño es altamente susceptible a los MM, especialmente en los periodos de precipitaciones extremas asociadas a La Niña.

4.1.3.2. Análisis Anual

La gráfica anual de MM y precipitación en el departamento de Nariño de la Figura 26 revela una relación entre estos fenómenos y las fases del ENOS. Se observa que el valor máximo de precipitación registrado en el periodo de estudio es de 270.9 mm, alcanzado en un año asociado a La Niña. Este aumento en la lluvia coincide con un incremento en la cantidad de deslizamientos reportados, frente al año anterior, sin embargo, el pico de precipitación no coincide con el pico de MM. A lo mejor por lo discutido anteriormente sobre la influencia del comportamiento de la región Pacífica donde llueve de forma abundante pero no presenta MM.

Por otro lado, el pico de eventos de MM se dio en el 2012 superando los 200 eventos en un solo año en un periodo neutro con precipitaciones inferiores a la media. Esta situación también se explica teniendo en cuenta la influencia del comportamiento de la Zona Andina de este periodo que se explicó previamente.

Por otro lado, el valor mínimo de precipitación registrado es de 197.7 mm, el cual se presenta en un año correspondiente a El Niño. Este periodo de menor precipitación se refleja en una notable reducción en la cantidad de deslizamientos, lo que sugiere que la menor disponibilidad de agua contribuye a una mayor estabilidad del suelo. Este comportamiento confirma la tendencia observada en análisis previos, donde los años de El Niño suelen estar asociados con una menor frecuencia de deslizamientos debido a la disminución en la saturación de los suelos.

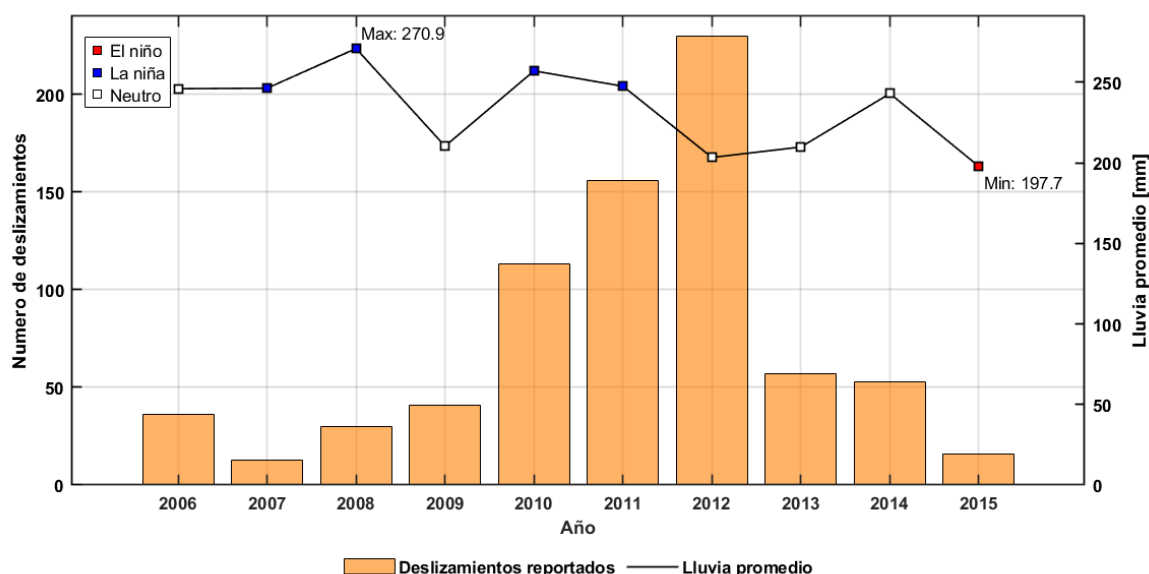


Figura 26: Gráfico de precipitación, ENOS y MM anual del departamento de Nariño

El análisis del comportamiento promedio de la precipitación y los deslizamientos muestra una fuerte correspondencia entre los periodos de mayor lluvia y el aumento de MM, particularmente en los años 2010, 2011 y 2012 que corresponden a fases “La Niña”. En estos años se reporta un número considerablemente mayor de deslizamientos en comparación con otros periodos, lo que refuerza la hipótesis de que la saturación de los suelos juega un papel determinante en la ocurrencia de estos fenómenos. Sin embargo, hay años con precipitaciones elevadas donde no se registran picos significativos de MM, lo que sugiere que otros factores, como la geología local, el uso del suelo y la acumulación progresiva de humedad, pueden influir en la activación de los deslizamientos.

4.2. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

Aunque se pudo percibir la relación entre las variables de estudio en los gráficos de series de tiempo, es importante cuantificar esta relación y definir claramente qué tanto influye el ENOS en las lluvias y en los eventos de MM del departamento de Nariño. Por esta razón en el siguiente análisis se trata de establecer cuantitativamente dicha influencia.

Como se ha podido concretar a lo largo de esta investigación y coincidiendo con lo estudiado por otros autores (Canchala, Alfonso-Morales, Carvajal-Escobar, et al., 2020; Canchala, Alfonso-Morales, Cerón, et al., 2020), se decide obtener la correlación entre las variables de interés únicamente para la región andina de Nariño. Esto de acuerdo con lo obtenido en las gráficas de cajas y bigotes de las Figura 27 y 35, donde se relaciona precipitación – fase ENOS y MM - ENOS respectivamente. Como se observa en las figuras, para esta zona la precipitación parece ser alta de manera consistente en todas las fases de ENOS, aunque con una leve tendencia a aumentar en fases “La Niña”. Mientras que los movimientos en masa parecen no estar significativamente influenciados por las fases de ENOS, manteniéndose en un nivel bajo y estable.

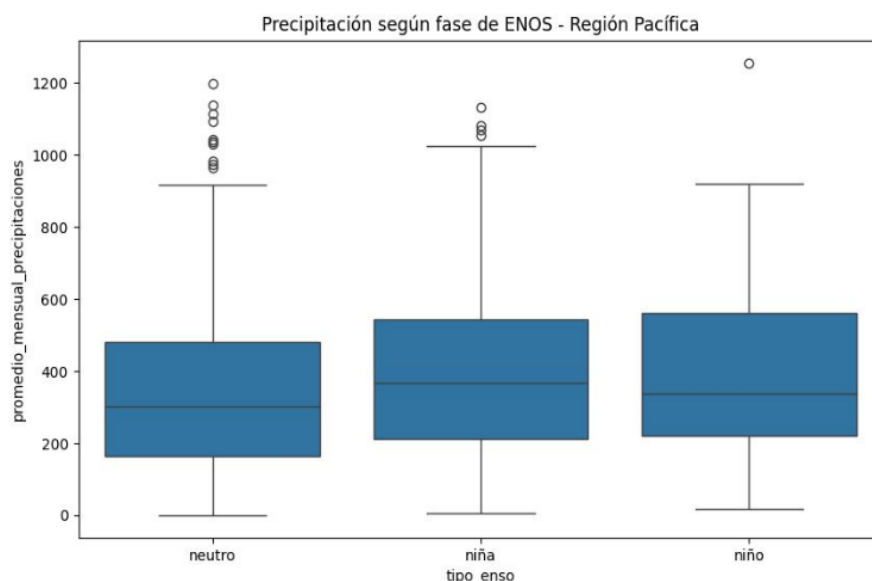


Figura 27: Diagrama de cajas y bigotes entre las variables de estudio para la Zona Pacífica del departamento de Nariño

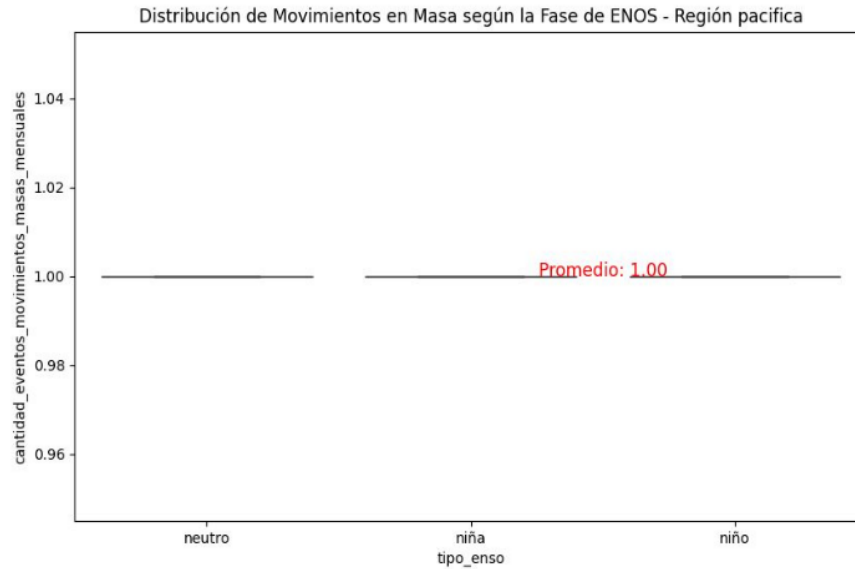


Figura 28: Distribucion de MM según la fase de ENOS en la Zona Pacífica del departamento de Nariño

Debido a que se ha detectado la poca influencia entre ENOS y las otras variables en la región Pacífica de Nariño, se decide encontrar la correlación únicamente para la Zona Andina de Nariño. Los valores obtenidos de la correlación de Pearson son presentados en la Figura 29. La matriz de correlación de Pearson presentada en la Figura 29 muestra las relaciones lineales entre tres variables, donde los valores positivos se representan en tonos rojizos y los negativos en tonos azulados, con intensidades proporcionales a la magnitud de la correlación. La diagonal principal de la matriz contiene valores de 1.00, lo que indica que cada variable tiene una correlación perfecta consigo misma, una propiedad inherente a este tipo de matrices. De los coeficientes obtenidos se puede definir que existe una fuerte correlación negativa de -0.85 entre precipitación y ENOS, lo que significa que, cuando el valor MEI_v2 aumenta, las precipitaciones tienden a disminuir, y viceversa, esto significa que la fase ENOS que atraviesa la región definitivamente influye en la cantidad de lluvias. Por otro lado, hay una correlación negativa moderada entre el valor MEI_v2 y la cantidad de MM mensuales de -0.38, lo que sugiere que cuando el valor MEI_v2 es alto la cantidad de eventos MM tiende a disminuir, aunque no de manera evidente como en el caso anterior. Finalmente, no se encontró correlación entre precipitación y MM, esto podría indicar que otros factores (no analizados en este estudio) influyen más en la ocurrencia de estos eventos o que la granularidad de la información no permite determinar claramente la relación.

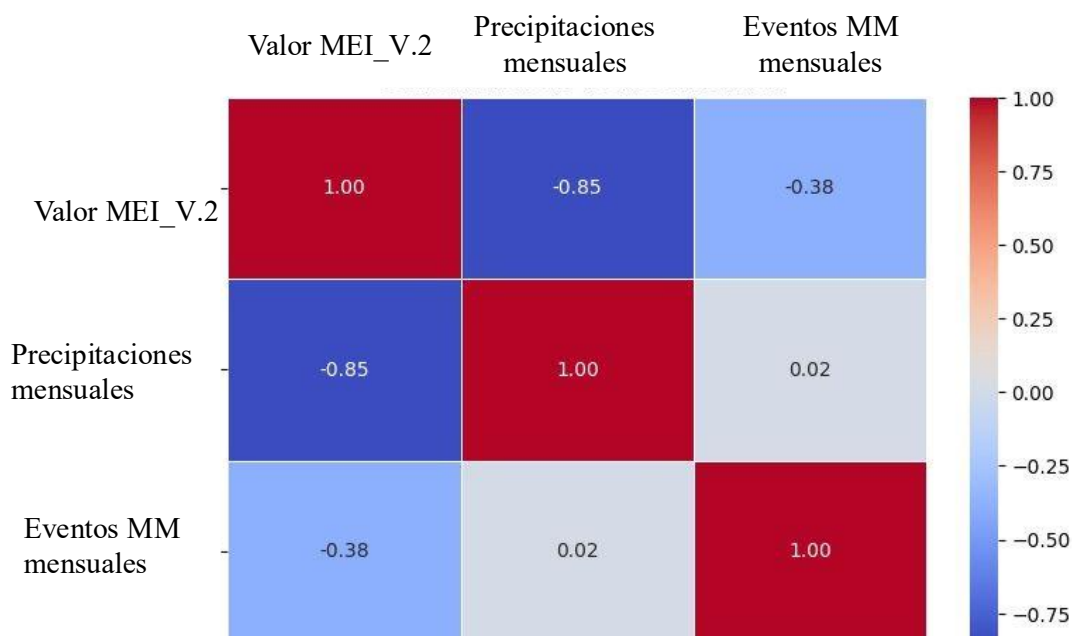


Figura 29: Matriz de correlación de Pearson entre las variables de estudio con datos completos

Con base en los resultados anteriores, se decidió definir la relación en el sentido MM-Precipitación. Es decir, se encontró la correlación únicamente de los datos mensuales con valores de MM donde ocurrieron al menos un evento. La grafica de la Figura 30 corresponde a los nuevos valores de R encontradas donde ocurrieron eventos.

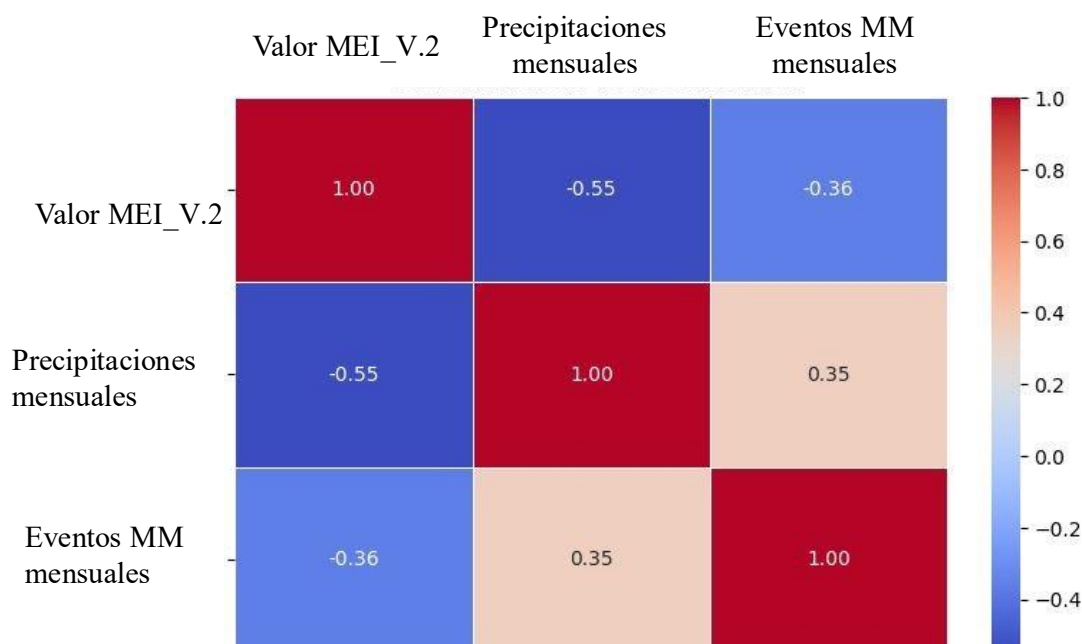


Figura 30: Matriz de correlación de Pearson entre las variables de estudio con solo los datos de precipitación cuando ocurre al menos un evento

El análisis de las correlaciones revela que la primera y la segunda variable tienen una relación negativa moderada con un coeficiente de -0.55, lo que indica que a medida que una de ellas aumenta,

la otra tiende a disminuir. Esta relación inversa es significativa, aunque no determinante y si estas variables representan, por ejemplo, la precipitación y el índice ENOS, esto sugeriría que eventos de El Niño están asociados con menores precipitaciones en la región estudiada. Asimismo, la primera y la tercera variable muestran una correlación negativa de -0.36, lo que sugiere una relación inversa más débil pero aún presente, indicando que un aumento en una de ellas podría estar acompañado de una disminución en la otra, aunque con mayor variabilidad en los datos.

Por otro lado, la correlación precipitación y MM es de 0.35, siendo la única relación positiva fuera de la diagonal principal. Este valor indica una asociación positiva moderada, lo que significa que cuando una de estas variables aumenta, la otra también tiende a hacerlo (Cuando aumenta las lluvias aumentan los MM). Aunque la relación no es particularmente fuerte, sugiere que pueden compartir un mecanismo común que las vincule.

En términos generales, los resultados indican que la primera variable tiene relaciones inversas con las otras dos, mientras que la segunda y la tercera presentan una asociación positiva moderada. Si estas variables representan factores climáticos y de deslizamientos, podríamos inferir que los eventos de El Niño reducen la precipitación y posiblemente, afectan la frecuencia de movimientos en masa. Estos hallazgos pueden ser útiles para evaluar la influencia de factores climáticos en la ocurrencia de deslizamientos y para desarrollar modelos predictivos que permitan anticipar escenarios de riesgo con base en estas correlaciones.

5. CONCLUSIONES

Recolectar información de las bases de datos oficiales sobre períodos de ENOS (NOAA), precipitaciones (IDEAM) y movimientos en masa (DESINVENTAR), disponibles para la zona de estudio.

- La calidad y consistencia de los datos de movimientos en masa y precipitaciones son limitadas, lo que afecta la precisión del análisis. Se recomienda mejorar los sistemas de registro y monitoreo, especialmente en la Zona Pacífica, donde los datos son escasos.
- Es necesario realizar estudios más detallados que incluyan otros factores detonantes, como la sismicidad, la actividad volcánica y el uso del suelo, para comprender mejor la dinámica de los movimientos en masa en el departamento de Nariño

Estudiar la relación entre los ciclos del ENOS en sus fases extremas, movimientos en masa, y precipitaciones en el departamento de Nariño con base en la información obtenida de las diferentes bases de datos.

- La región Andina de Nariño es altamente susceptible a los movimientos en masa, especialmente durante eventos de La Niña, donde se observa un aumento significativo en las precipitaciones y, en consecuencia, en la ocurrencia de estos fenómenos. Esto se debe a la combinación de factores como la topografía de pendientes elevadas, la saturación de los suelos y la acumulación de humedad durante periodos prolongados de lluvia.
- Durante los eventos de El Niño, se observa una disminución en la frecuencia de movimientos en masa debido a la reducción de las precipitaciones y la mayor estabilidad del suelo.
- Aunque la región Pacífica de Nariño presenta altos niveles de precipitación, especialmente durante eventos de La Niña, la ocurrencia de movimientos en masa es significativamente menor en comparación con la región Andina. Esto se debe principalmente a su relieve plano, que reduce la influencia de la gravedad en el deslizamiento de materiales. Las pendientes bajas en esta región limitan la ocurrencia de movimientos en masa, a pesar de las condiciones climáticas extremas.
- La cantidad de eventos de movimientos en masa no parece depender directamente de la precipitación mensual en términos lineales, por lo que podría ser útil explorar correlaciones no lineales u otros factores que expliquen los movimientos de masas; por ejemplo, un análisis a nivel de lluvias diarias o análisis de lluvia antecedente.

Determinar la influencia de los ciclos ENOS en sus fases extremas con las precipitaciones y la ocurrencia de movimientos en masa en el departamento de Nariño.

- El análisis de correlación mostró una fuerte relación negativa entre el índice ENOS (MEI.V2) y las precipitaciones (-0.85), lo que confirma que las fases de El Niño están asociadas con menores precipitaciones, mientras que La Niña está relacionada con lluvias abundantes. Sin embargo, la correlación entre las precipitaciones y los movimientos en masa fue moderada, lo que sugiere que otros factores, como la geología local, la acumulación de humedad en el suelo y la intervención humana, también juegan un papel importante en la activación de estos eventos.

6. REFERENCIAS

- Aristizábal, E., González, T., Montoya, J. D., Ignacio Vélez, J., Martínez, H., & Guerra, A. (2011). Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia. In *Revista EIA*. <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n15/n15a09.pdf>
- Aristizábal, E., Riaño, F., & Jiménez-Ortiz, J. (2022). Rainfall thresholds as triggering factor in the Central cordillera of the Colombian Andes. *Boletín de Geología*, 44(2), 183–197. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n2-2022009>
- Ávila, G., Cubillos, C., Granados, A., Medina, E., Rodríguez, É., Rodríguez, C., & Ruiz, G. (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, Escala Detallada. Colección Guías y Manuales. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9, pp. 1–182).
- Brockwell, P. J., & Davis, R. A. (2016). *Introduction to Time Series and Forecasting* (Springer Nature, Ed.; Third). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29854-2>
- Burbano Lopez, D. P. (2025). *Influencia de las lluvias en la ocurrencia y magnitud de los movimientos en masa en el municipio de Jamundí (Valle del Cauca)*. Universidad del Valle.
- Canchala, T., Alfonso-Morales, W., Carvajal-Escobar, Y., Cerón, W. L., & Caicedo-Bravo, E. (2020). Monthly Rainfall Anomalies Forecasting for Southwestern Colombia Using Artificial Neural Networks Approaches. *Water*, 12(9), 2628. <https://doi.org/10.3390/w12092628>
- Canchala, T., Alfonso-Morales, W., Cerón, W. L., Carvajal-Escobar, Y., & Caicedo-Bravo, E. (2020). Teleconnections between monthly rainfall variability and large-scale climate indices in Southwestern Colombia. *Water (Switzerland)*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/w12071863>
- Carvajal E., Y., Materón, H., & Jiménez E., H. (1998). Incidencia del fenómeno ENSO en la hidroclimatología del valle del río Cauca-Colombia. *Bulletin de l'Institut Français d'études Andines*, 27(3), 743–751. <https://doi.org/10.3406/bifea.1998.1327>
- Climate.gov. (2024, March). *SST - ENSO Region, Monthly Difference from Average*. <https://www.climate.gov/maps-data/data-snapshots/data-source/sst-enso-region-monthly-difference-average#:~:text=measurements%20come%20from%3F-A%3A,the%20ocean%20at%20different%20wavelengths>.
- Corporación Autónoma Regional de Nariño. (2002). *Plan de Gestion Ambiental Regional Nariño*.
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 43(1), 27–29. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- Deser, C., Trenberth, K., & National Center for Atmospheric Research Staff. (2022, September 9). *The Climate Data Guide: Pacific Decadal Oscillation (PDO): Definition and Indices*. National Center for Atmospheric Research. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/pacific-decadal-oscillation-pdo-definition-and-indices>
- Díaz Collazos, A. M. (2015). *Desarrollo sociolingüístico del voseo en la región andina de Colombia*.

- Duque Escobar, G. (2022). *Manual de Geología para Ingenieros* (pp. 1–499). Universidad Nacional de Colombia.
- Emberson, R., Kirschbaum, D., & Stanley, T. (2021). Global connections between El Niño and landslide impacts. *Nature Communications*, 12(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22398-4>
- Euscategui, C., & Hurtado, G. (2011). Análisis del impacto del fenómeno “LA NIÑA” 2010-2011 en la hidroclimatología del país. *II Congreso Internacional Del Clima*, 571, 32. <https://bit.ly/2no145b>
- GEMMA, G. de E. para M. en M. (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina. In *Publicación Geológica Multinacional* (Vol. 4). <http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/2792>
- Gomez, G., & Ortega, C. (2022, April 21). *Balance de los daños ocasionados por las fuertes lluvias en Nariño*. Caracol Radio. https://caracol.com.co/programa/2022/04/21/6am_hoy_por_hoy/1650546304_882283.html
- Gutiérrez Torres, R. E. (2019). Evaluación del riesgo de inundaciones y movimientos en masa asociado al fenómeno de La Niña en el departamento de Santander [Universidad Santo Tomás]. In *Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación*. <https://doi.org/10.1080/00033799300200371>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3–4), 239–267. <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>
- IGAC. (2019). *Guía Metodológica de la Operación Estadística Variables Meteorológicas*. <http://www.ideam.gov.co/documents/10182/557765/Definiciones+CNE.pdf/25e1cca5-ee47-4eaf-86c0-c4f5192a9937#:~:text=Estación Mareográfica%3A Estaciones para observación,salinidad de las aguas marinas.&text=Estación Pluviométrica%3A Es una estación,caída entr>
- INGEOMINAS, I. C. de G. y M. (2010). *Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:500.000*. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B8/21003050024427/Documento/Pdf/2105244271101000.pdf>
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). An Introduction to Statistical Learning. In *Current medicinal chemistry* (Vol. 7, Issue 10). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1418-1>
- Javier Fernandez, J. (2022). Código Python para el análisis de datos históricos de Precipitación de la Provincia de Misiones. *XXVII Jornada de Pesquisa*, 0(226 mm), 1–9. <https://www.bing.com/ck/a?!&&p=7b465d409c506477JmltdHM9MTcwMDUyNDgwMCZpZ3VpZD0zODE3NGRhYS02MjE2LTY2MzMtM2Y0Ni01ZDYyNjYxNjYwYTImaW5zaWQ9NTE5OA&ptn=3&ver=2&hsh=3&fclid=38174daa-6216-6633-3f46-5d62661660a2&psq=Código+Python+para+el+análisis+de+datos+históric>
- Julieth Alejandra Achicanoy. (2017). *Mapa de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa en el municipio de Sandoná, Nariño*. [Universidad de Nariño]. https://sired.udenar.edu.co/9174/1/92371.pdf?utm_source=chatgpt.com

- Lindsey, R. (2021). *El Niño & La Niña (El Niño-Southern Oscillation)*. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.climate.gov/enso>
- Martínez, A. G. (2019, February 21). *Relieve Departamento de Nariño*. TODA COLOMBIA. <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/narino/relieve.html>
- Mazzarella, A., Giuliacci, A., & Scafetta, N. (2013). Quantifying the Multivariate ENSO Index (MEI) coupling to CO₂ concentration and to the length of day variations. *Theoretical and Applied Climatology*, 111(3–4), 601–607. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0696-9>
- Mehdizadeh, S. (2019). Using AR, MA, and ARMA Time Series Models to Improve the Performance of MARS and KNN Approaches in Monthly Precipitation Modeling under Limited Climatic Data. *Water Resources Management*, 34(10), 263–282. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02442-1>
- Montero Olarte, J. (2017). Clasificación de Movimientos en Masa y su Distribución en Terrenos Geológicos de Colombia. In L. E. Vásquez Salamanca (Ed.), *Publicaciones Especiales Geológicas*. Imprenta Nacional de Colombia. <http://www.nber.org/papers/w16019>
- Moreno, H., Vélez, M., Montoya, J., & Rhenals, R. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: Análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*, 5(June), 59–69. <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/147/146>
- Naranjo Bedoya, K., Aristizábal Giraldo, E. V., & Morales Rodelo, J. A. (2019). Influencia del ENSO en la variabilidad espacial y temporal de la ocurrencia de movimientos en masa detonados por lluvias en la región Andina. *Ingeniería y Ciencia*, 15(29), 11–42. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.15.29.1>
- NOAA Physical Sciences Laboratory. (n.d.). *Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2)*. Retrieved April 24, 2024, from <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>
- Ogura, A., & Soares Macedo, E. (2005). Procesos y riesgos geológicos. *Ii Curso Internacional De Aspectos Geológicos De Protección Ambiental.*, October, 112–135.
- Ojeda, C. C. (2023). *Geomorfología costera en la simulación numérica de la amenaza por tsunami y sus efectos en el sur del Pacífico Colombiano*.
- Parnell, A. C. (2013). Climate Time Series Analysis: Classical Statistical and Bootstrap Methods. *Journal of Time Series Analysis*, 34(2), 281–281. <https://doi.org/10.1111/jtsa.12002>
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Ingeniería Hidráulica En Mexico*, 11(1), 21–37.
- Puertas Orozco, O. L., & Carvajal Escobar, Y. (2008). Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer. *Ingeniería y Desarrollo*, 23, 104–118. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612008000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Python. (2019). *Python For Beginners* | *Python.org*. <https://www.python.org/about/gettingstarted/>

- Sánchez, R., Vargas, G., González, H., & Pabón, D. (2001). *Los fenómenos cálido del Pacífico (el niño) y frío del Pacífico (la niña) y su incidencia en la estabilidad de laderas en Colombia*. 11–12. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18814>
- Serna Cuenca, J. (2021). *Seguimiento al ciclo ENOS*. http://www.ideam.gov.co/documents/21021/113202311/01_ENSO_IFN_ENE_21_2021.pdf/232ea6ed-ab3b-4fdb-853c-01f5b6018a2b
- SGC, S. G. C. (2017). Las amenazas por movimientos en masa de Colombia, una visión a escala 1:100.000. In M. Montes Ferrando (Ed.), *Las amenazas por movimientos en masa de Colombia, una visión a escala 1:100.000* (Primera ed, Vol. 1). <https://doi.org/10.32685/9789589952887>
- SGC, S. G. C., & MinMinas, M. N. de M. y E. (2017). *Guía Metodológica Para La Zonificación De Amenaza Por Movimientos En Masa a Escala 1:25.000*.
- Tarback, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la Tierra Una introducción a la geología física. In *Ciencias de la Tierra. Una introduccion a la geofísica*. Prentice Hall / Pearson.
- Unimedios. (2020, July 18). *Régimen de lluvias unimodal predomina en Colombia*. Eje21. <https://www.eje21.com.co/2020/07/regimen-de-lluvias-unimodal-predomina-en-colombia/#:~:text=En%20la%20mayor%20parte%20de,caracteriza%20por%20dos%20temporadas%20de>
- Vargas Cediél, I. D. (2020). Correlación cronológica entre posibles detonantes climáticos, sísmicos y volcánicos con la ocurrencia de movimientos en masa en el departamento de Nariño. *Universidad de Los Andes*, 1–40.
- Wenzel, K., & Babbie, E. (1994). The Practice of Social Research. In *Teaching Sociology* (Vol. 22, Issue 1). <https://doi.org/10.2307/1318620>

7. ANEXOS

7.1. ANEXO 1

Se presenta la Tabla 4 que relaciona el nombre del municipio, el número de registros (es decir, la cantidad de registros contenidos en la base de datos de DesInventar y el número de eventos identificados para cada municipio, para más información).

Tabla 4: Número final de eventos por municipio obtenidos de los 543 registros de DesInventar.

MUNICIPIO	REGISTROS DESINVENTAR	EVENTOS	MUNICIPIO	REGISTROS DESINVENTAR	EVENTOS
ALBAN	17	23	LEIVA	10	21
ALDANA	1	1	LINARES	10	16
ANCUYA	16	26	LOS ANDES	13	17
ARBOLEDA	21	10	MAGUI	1	1
BARBACOAS	7	7	MALLAMA	10	16
BELÉN	9	12	NARIÑO	5	5
BUESACO	17	29	OLAYA HERRERA	2	2
CHACHAGÜÍ	11	16	OSPINA	7	7
COLON	5	17	PASTO	27	25
CONSACA	10	15	POLICARPA	10	9
CONTADERO	7	8	POTOSÍ	7	6
CORDOBA	8	13	PROVIDENCIA	6	11
CUASPUD	6	11	PUERRES	9	14
CUMBAL	6	12	PUPIALES	1	1
CUMBITARA	10	14	RICAUARTE	13	18
EL PEÑOL	8	10	ROBERTO PAYAN	2	1
EL ROSARIO	9	15	SAMANIEGO	17	16
EL TABLÓN DE GÓMEZ	18	26	SAN ANDRÉS DE TUMACO	1	1
EL TAMBO	7	10	SAN BERNARDO	5	5
FUNES	13	28	SAN LORENZO	15	16
GUACHUCAL	1	1	SAN PABLO	18	20
GUAITARILLA	6	15	SAN PEDRO	6	8
GUALMATAN	4	6	SANDONA	20	21
ILES	9	16	SANTA BARBARA	2	2
IMUES	2	2	SANTA CRUZ	6	7
IPIALES	8	8	SAPUYES	7	6
LA CRUZ	13	24	TAMINANGO	7	9
LA FLORIDA	5	5	TANGUA	11	10
LA LLANADA	7	7	TUQUERRES	6	7
LA UNIÓN	18	53	YACUANQUER	8	7

7.2. ANEXO 2

La Tabla 5 contiene el listado arrojado por la base de datos de las 100 estaciones existentes en el departamento con su respectivo nombre y cantidad de datos probables.

Tabla 5: Lista 100 estaciones meteorológicas del departamento de Nariño obtenidas de la base de datos del IDEAM para el periodo de estudio.

NUMERO	NOMBRE	CANTIDAD PROBABLE	NUMERO	NOMBRE	CANTIDAD PROBABLE
1	AEROPUERTO ANTONIO	121	51	MAMACONDE	121
2	AEROPUERTO LA FLORI	0	52	MATAJE	121
3	AEROPUERTO SAN LUIS	121	53	MONOPAMBA	121
4	AGROYACO	0	54	MOSQUERA	121
5	ALTAQUER - AUT	103	55	NARINO	121
6	APONTE	121	56	OBONUCO	121
7	BARBACOAS	121	57	OSPINA PEREZ	0
8	BATIOJA	0	58	PASANTO	0
9	BERRUECOS	121	59	PENOL EL	121
10	BOMBONA	121	60	PISANDA	121
11	BOTANA - AUT	121	61	POLICARPA	0
12	BUESACO	121	62	PRESA HIDROMAYO	6
13	BUESACO	0	63	PUERRES	121
14	CAMP LA YE	0	64	QUILINSAYACO	0
15	CAMP PILCUAN	0	65	REMOLINO GRANDE	121
16	CANDELILLAS	0	66	RICAU RTE	0
17	CCCP DL PACIFICO	121	67	RICAU RTE	0
18	CHACHAGUI	0	68	RIO BOBO	121
19	CHALET GUAMUES	0	69	ROSAL DEL MONTE	121
20	CHARCO EL	0	70	ROSARIO EL	121
21	CHARCO EL	121	71	SALAHONDA	121
22	CHILES	121	72	SAMANIEGO	121
23	CHIMAYOY	100	73	SAMANIEGO	0
24	COBENAS	0	74	SAN BERNARDO	121
25	COCO EL	121	75	SAN JOSE DE TAPAJE	121
26	COL MARIDIAZ	0	76	SAN RAFAEL	0
27	COL MARIDIAZ	0	77	SANDE EL	121
28	COL SAN FCO JAVIER	0	78	SANDONA	121
29	CRUZ LA I	0	79	SANTA ISABEL	121
30	CRUZ LA	121	80	SANTA ROSA POTOSI	121
31	CUMBAL	121	81	SAUCE EL	0
32	EDIFICIO TUQUERRES	0	82	SINDAGUA	121
33	EL COMUN	106	83	SINDAMANNOY	0
34	EL ENCANO - AUT	121	84	SOTOMAYOR	0
35	EL PARAISO - AUT	121	85	TAMINANGO	1
36	FUNES	76	86	TAMINANGO	121
37	GRANJA EL MIRA	121	87	TANAMA	121
38	GUACHAVES	121	88	TANGUA	121
39	GUALMATAN	121	89	TUQUERRES	0
40	GUASCA LA	121	90	UNION LA	0
41	GUAYACANA LA	121	91	UNION LA	0
42	HIDROMAYO CAMP	121	92	UNION LA	121
43	HIDROMAYO CASA MAQ	0	93	UNIV NARINO	0
44	HOTEL SINDAMANNOY	0	94	UNIVERSIDAD DE NARI	121
45	IMUES	121	95	VERGEL EL	121
46	JUNIN	121	96	VIENTO LIBRE - AUT	121
47	LICEO LA MERCED	0	97	VILLA ROSA	3
48	LLANO VERDE	121	98	VIVERO CORFONAR	0
49	LOS NORTES - AUT	0	99	VIVERO LINARES	121
50	MAGUI	121	100	WILQUIPAMBA	121

Como resultado de este proceso de filtrado, se descartaron 43 estaciones, seleccionando finalmente un total de 57 estaciones (ver Tabla 6)

Tabla 6: Listado de las 57 estaciones meteorológicas del departamento de Nariño con datos en los 121 meses

NUMERO	NOMBRE	CANTIDAD PROBABLE	NUMERO	NOMBRE	CANTIDAD PROBABLE
1	AEROPUERTO ANTONIO	121	29	MONOPAMBA	121
2	AEROPUERTO SAN LUIS	121	30	MOSQUERA	121
3	APONTE	121	31	NARINO	121
4	BARBACOAS	121	32	OBONUCO	121
5	BERRUECOS	121	33	PENOL EL	121
			34	PISANDA	121

6	BOMBONA	121	35	PUERRES	121
7	BOTANA - AUT	121	36	REMOLINO GRANDE	121
8	BUESACO	121	37	RIO BOBO	121
9	CCCP DL PACIFICO	121	38	ROSAL DEL MONTE	121
10	CHARCO EL	121	39	ROSARIO EL	121
11	CHILES	121	40	SALAHONDA	121
12	COCO EL	121	41	SAMANIEGO	121
13	CRUZ LA	121	42	SAN BERNARDO	121
14	CUMBAL	121	43	SAN JOSE DE TAPAJE	121
15	EL ENCANO - AUT	121	44	SANDE EL	121
16	EL PARAISO - AUT	121	45	SANDONA	121
17	GRANJA EL MIRA	121	46	SANTA ISABEL	121
18	GUACHAVES	121	47	SANTA ROSA POTOSI	121
19	GUALMATAN	121	48	SINDAGUA	121
20	GUASCA LA	121	49	TAMINANGO	121
21	GUAYACANA LA	121	50	TANAMA	121
	HIDROMAYO		51	TANGUA	121
22	CAMP	121	52	UNION LA	121
23	IMUES	121		UNIVERSIDAD DE	
24	JUNIN	121	53	NARI	121
25	LLANO VERDE	121	54	VERGEL EL	121
26	MAGUI	121	55	VIENTO LIBRE - AUT	121
27	MAMACONDE	121	56	VIVERO LINARES	121
28	MATAJE	121	57	WILQUIPAMBA	121

7.3. ANEXO 3

La Tabla 7 muestra las estaciones relacionadas en la obtención de un valor faltante.

Tabla 7: Estaciones meteorológicas relacionadas para la obtención de datos faltantes.

N°	ESTACIÓN CON VALOR FALTANTE	CÓDIGO ESTACIÓN PRÓXIMA	NOMBRE ESTACIÓN PRÓXIMA	N°	ESTACIÓN CON VALOR FALTANTE	CÓDIGO ESTACIÓN PRÓXIMA	NOMBRE ESTACIÓN PRÓXIMA
1	53010020 MOSQUERA	53020010 52090020	EL CHARCO REMOLINO GRANDE	11	52045070 WILQUIPAMBA	52040160 52050040 52050080 47010230	BERRUECOS SANDONA TANGUA SANTA ISABEL
2	53020010 EL CHARCO	53010020 53020020 52090020	MOSQUERA SAN JOSE DE TAPAJE REMOLINO GRANDE	12	52030090 LA CRUZ	52040160	BERRUECOS
3	52065020 BARBACOAS	52070010 51020050	MAGUI LA GUAYACANA	13	52035040 VIENTO LIBRE AUT	52070030 52040160 52060040 52050040 52010060	LLANO VERDE BERRUECOS EL VERGEL SANDONA MAMACONDE
4	52070010 MAGUI	52065020 51030020	BARBACOAS EL COCO	14	52060040 EL VERGEL	52070030 52035040 52060050 52050040 52065020	LLANO VERDE VIENTO LIBRE AUT EL SANDE SANDONA BARBACOAS
5	51035020 CCCP DL PACIFICO	52090010 51030020 51025090	SALAHONDA EL COCO GRANJA EL MIRA	15	52010060 MAMACONDE	52035040 52070030	VIENTO LIBRE AUT LLANO VERDE
6	52040160 BERRUECOS	52035040 52050040 52030090 52045070	VIENTO LIBRE SANDONA LA CRUZ WILQUIPAMBA	16	51020010 JUNIN	51020050 52065020 52060050	LA GUAYACANA BARBACOAS EL SANDE
7	52050040 SANDONA	52060050 52060040 52035040 52040160 52045070 52050080 52055220	EL SANDE EL VERGEL VIENTO LIBRE BERRUECOS WILQUIPAMBA TANGUA EL PARAISO	17	52050110 CUMBAL	52050130 52055220 52050190 51020010	CHILES EL PARAISO SANTA ROSA POTOSI JUNIN
8		47010230	SANTA ISABEL	18		52010060	MAMACONDE

	52050080 TANGUA	47015080 52050130 52055220 52050040 52045070	MONOPAMBA CHILES EL PARAISO SANDONA WILQUIPAMBA		52070030 LLANO VERDE	52035040 52060040 53020020 52065020	VIENTO LIBRE AUT EL VERGEL SAN JOSE DE TAPAJE BARBACOAS
9	52055220 EL PARAISO	52050110 52050190 52050080 52050040 52060050	CUMBAL SANTA ROSA POTOSI TANGUA SANDONA EL SANDE	19	52060050 EL SANDE	52050040 52060040 52065020 51020010 52055220	SANDONA EL VERGEL BARBACOAS JUNIN EL PARAISO
10	52050190 SANTA ROSA POTOSI	52050130 52050110 52050080 47015080	CHILES CUMBAL TANGUA MONOPAMBA	20	52050130 CHILES	52050110 52050190 51020010	CUMBAL SANTA ROSA POTOSI JUNIN
				21	47015080 MONOPAMBA	47010230 52050080 52050190	SANTA ISABEL TANGUA SANTA ROSA POTOSI

7.4. ANEXO 4

Este anexo complementa la investigación con detalles técnicos y metodológicos sobre la recopilación, procesamiento y análisis de datos. Incluye información de DesInventar (MM), IDEAM (Precipitaciones) y NOAA (MEI.v2). Contiene un algoritmo para generar series de tiempo y calcular el coeficiente de correlación de Pearson, esencial para analizar tendencias. También presenta scripts de MATLAB para crear gráficos que respaldan los hallazgos del estudio. Todo el material está disponible en el siguiente repositorio de GitHub:

1. <https://github.com/Miguelopezlo/ENOSYMMMA>