UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS.

"Estimación de la susceptibilidad a deslizamientos en la Mancomunidad La Montañona, Chalatenango, aplicando la metodología Mora & Vahrson."

Trabajo de graduación.

Presentado por:

Br. Abelardo Ernesto Hernández Herrera.

Para optar al grado de:

Licenciado en Geofísica.

Docente asesor:

MSc. Guillermo Morán Orellana.

26 de agosto de 2023

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS.

"Estimación de la susceptibilidad a deslizamientos en la Mancomunidad La Montañona, Chalatenango, aplicando la metodología Mora & Vahrson."

Trabajo de graduación.

Presentado por:

Br. Abelardo Ernesto Hernández Herrera.

Para optar al grado de:

Licenciado en Geofísica.

Docente asesor:

MSc. Guillermo Morán Orellana.

26 de agosto de 2023

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS.

"Estimación de la susceptibilidad a deslizamientos en la Mancomunidad La Montañona, Chalatenango, aplicando la metodología Mora & Vahrson."

Trabajo de graduación.

Presentado por:

Br. Abelardo Ernesto Hernández Herrera.

Para optar al grado de:

Licenciado en Geofísica.

Jurado Calificador:

Dr. Luis Alfonso Castillo.

Msc. César Alvarado Batres.

26 de agosto de 2023

Autoridades Universitarias

Rector:

M. Sc. Roger Armando Arias Alvarado.

Vicerrector Académico:

Phd. Raúl Ernesto Azcúnaga López

Vicerrector Administrativo:

Ing. Juan Rosa Quintanilla:

Secretario General:

Ing. Francisco Antonio Alarcón Sandoval

Fiscal General:

Lic. Rafael Humberto Peña Marín.

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas.

Decano:

Lic. Ernesto Américo Hidalgo.

Vicedecano:

M.Sc. Zoila Virginia Guerrero.

Director de la Escuela de Física:

Dr. Rafael Gómez Escoto.

Agradecimientos.

Le agradezco a Dios y a nuestro señor Jesucristo, por brindarme las fuerzas y la oportunidad de haber podido culminar esta etapa, por su guía y por sus sostén en los momentos más difíciles a lo largo de estos años. Que sea el nombre de Jehová bendito.

A mis padres, Abelardo y Alba, por su apoyo y su ayuda, por su infinita paciencia y por nunca rendirse conmigo, porque a pesar de los problemas, de las enfermedades y las adversidades, siempre se sobrepusieron a la situación, por nunca dejarme solo, por forjar quien soy ahora, y porque aún en medio de todos los problemas y la desesperación, nunca dejaron de sonreir y confiar en que las cosas mejorarían.

A mi esposa, Dania, por su amor y comprensión, por nunca dejar de animarme a seguir adelante, por su apoyo y su ayuda, y por siempre motivarme a dar lo mejor de mi.

A mi hermana, Gabriela, por su compañía y motivación. A mis abuelos, José y Victoriana, por siempre tener altas expectativas de mi, por sus consejos y su ayuda, por motivarme a siempre mejorar, por instruirme siempre, por su cariño y sus consideraciones, así como a todos y cada uno de mis tíos, que a pesar de la distancia y la situación, siempre estuvieron ahí para apoyarme. Espero haber podido hacerlo sentir orgulloso, Papi Chepe.

A mi asesor, Lic. Guillermo Morán, por sus consejos y su guía a lo largo de mi tiempo en la universidad. Así como al Ing. Mario Reyes del Ministerio de Medio Ambiente, quien fue un apoyo vital en la realización de esta tesis.

A mis amigos, Valeria, Julio y Lúe, por haber hecho la vida universitaria más alegre, por acompañarme en esas eternas noches de desvelo estudiando, y porque en medio del estrés y de las tareas, siempre hubo razones para reir y para disfrutar.

A la Lic. Alejandra Menjívar, la Lic. Karla Alvarenga, la Geóloga Jessica Hernández y el Ing. Eduardo Zamorano, mis queridos amigos que han sido un enorme apoyo en los últimos años, personas admirables de quienes he podido aprender mucho. Al M.Sc. Kevyn Pineda y al Lic. Jorge Cuadra, por sus consejos y su guía. A Christian y Aquiles, con quienes no solo he compartido vida estudiantil, sino que también ahora me acompañan en la vida laboral, les agradezco por su apoyo y su ayuda, así como por siempre hallar la manera de levantarme los ánimos.

Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en dondequiera que vayas.
-Josué 1:9

Las circunstancias en las que uno nace no tienen importancia, es lo que uno hace con el don de la vida lo que nos dice quienes somos.
-Mewtwo

Además, si un perdedor hace muchos esfuerzos, quizás pueda sobrepasar las habilidades de un guerrero distinguido.
-Son Goku

Resumen

La región de La Montañona en El Salvador presenta una alta susceptibilidad a deslizamientos debido a sus condiciones geológicas y geomorfológicas, poniendo en peligro a las comunidades en crecimiento. Para identificar áreas de mayor riesgo y tomar decisiones de ordenamiento territorial y prevención de desastres, se utilizó la metodología de Mora & Vahrson, evaluando factores intrínsecos del terreno y detonantes de deslizamientos, como la precipitación y la sismicidad.

Los resultados indican que, a primera vista, la sismicidad no influye en la ocurrencia de deslizamientos en la zona analizada. Sin embargo, se recomienda obtener registros acelerográficos para sismos de mayor magnitud y evaluar de manera más detallada la influencia de la sismicidad, tanto regional como local, en la ocurrencia de deslizamientos. La falta de cobertura de las estaciones generó una falta de datos de precipitación, que se cubrió utilizando información de la NOAA. A pesar de ello, se recomienda contar con más información y considerar otros aportes de humedad al terreno.

Es esencial realizar un análisis geológico y geomorfológico in situ para determinar las condiciones del terreno y, si es posible, identificar procesos de movimiento lento y sitios con vestigios de deslizamientos antiguos para identificar zonas con mayor probabilidad de ocurrencia de estos eventos.

En resumen, la metodología de Mora & Vahrson es una herramienta útil y de bajo costo para la identificación de zonas con mayor susceptibilidad a deslizamientos en La Montañona. Se logró obtener mapas de susceptibilidad en escala 1:50,000 utilizando 3 mallas de estudio, de 1 kilómetro cuadrado, de 500 y 100 metros cuadrados. Sin embargo, se deben considerar otros factores y realizar un análisis en campo para una estimación más precisa y aplicar otras técnicas con un mayor componente estadístico. La investigación contribuye al conocimiento de la susceptibilidad a deslizamientos en la región y puede ser de gran utilidad para la toma de decisiones en torno al ordenamiento territorial y la prevención de desastres.

Índice general

1. Introducción **1**

2. Marco de referencia. **3**

2.1. Antecedentes. . . . 3
2.2. Terminología. . . . 4
2.3. Deslizamientos. . . . 5
2.3.1. Tipos de deslizamientos. . . . 5
2.4. Nomenclatura de los movimientos de masas. . . . 9
2.5. Caracterización de deslizamientos. . . . 11
2.6. Susceptibilidad a deslizamientos. . . . 12
2.7. Factores propiciantes de la ocurrencia de deslizamientos. . . . 12
2.8. Etapas de fallamiento. . . . 13
2.9. Física de un deslizamiento. . . . 14
2.10. Clasificación de deslizamientos en base a sus características físicas. . . . 15
2.11. Alos Palsar 19
2.11.1. Características principales: 19
2.11.2. Modelo de elevación digital. . . . 19

3. Descripción del sitio. **20**

3.1. Topografía. . . . 21
3.2. Clima. . . . 22
3.3. Marco geológico regional. . . . 22
3.4. Marco geológico local. . . . 24
3.5. Marco tectónico. . . . 25

4. Metodología. **27**

4.1. Mora y Vahrson. . . . 28
4.1.1. Generalidades 28

4.1.2. Estimación de la susceptibilidad a deslizamientos. 28
4.1.3. Indicadores de Susceptibilidad ($Susc$). 29
4.1.3.1. Factor de pendiente (Sr). 29
4.1.3.2. Factor litológico (Sl). 31
4.1.3.3. Factor de humedad relativa de suelo. (Sh). 32
4.1.4. Factores de disparo (Trig). 33
4.1.4.1. Factor de Intensidad Sísmica (Ts). 33
4.1.4.2. Factor de Intensidad de Precipitaciones (Tp). 33
4.1.5. Adquisición de datos. 36
4.1.5.1. Delimitación del área de estudio. 36
4.1.5.2. Creación de malla. 37
4.1.5.3. Obtención de datos de elevación. 40
4.1.5.4. Obtención de datos meteorológicos. 41
4.1.5.5. Obtención de datos geológicos. 44
4.1.6. Creación de mapas. 45
4.1.6.1. Indicadores de Susceptibilidad. 45
4.1.6.1.1. Factor de pendiente (Sr). 46
4.1.6.1.2. Factor litológico (Sl) 48
4.1.6.1.3. Factor de humedad relativa de suelo (Sh). 50
4.1.6.2. Factores desencadenantes ($Trig$). 52
4.1.6.2.1. Factor de Intensidad Sísmica (Ts). 52
4.1.6.2.2. Factor de Intensidad de precipitaciones (Sh) 57
4.1.6.3. Mapas de susceptibilidad. 60
4.2. Método de índices normalizados. 63
4.3. Validación de mapas de susceptibilidad. 64

5. Análisis y discusión. 67
5.1. Topografía. 67
5.2. Geología y geomorfología. 67
5.3. Sismicidad. 68
5.4. Meteorología. 68
5.5. Mapas de Susceptibilidad. 68
5.6. Ventajas y limitaciones. 69
5.6.1. Ventajas 69
5.6.2. Limitantes. 70

6. Conclusiones. 71

7. Recomendaciones **73**

Bibliografía. **78**

Índice de tablas

I. Glosario de nombres utilizados para la caracterización de movimientos en masa. Obtenido de Suarez Diaz (1998) . . . 9
II. Clasificación de deslizamientos propuesta por Varnes (1984) . . . 11
III. Valores del factor de pendiente Sr para cada rango de pendiente relativa Rr, adaptado de Mora (1994). . . . 30
IV. Clasificación de valores Sr en base a pendiente del terreno. Adaptado de Román (2018) . . . 30
V. Clasificación de distintos tipos de litologías y su correspondiente valor de Sl. Adaptado de Mora (1994). . . . 31
VI. Valores asignados para cada rango de precipitaciones promedio. Adaptado de Mora (1991). . . . 32
VII. Valores del factor Sh para cada valor acumulado de precipitaciones. Adaptado de Mora (1991) . . . 33
VIII. Determinación de factor Ts a partir de valores de intensidad sísmica para un periodo de 100 años. Basados en observaciones de Mora (1994) en Costa Rica y América Central. . . . 34
IX. Clasificación de máximas precipitaciones para un periodo de retorno de 100 años, así como una clasificación para valores anuales máximos. Adaptado de Mora (1994). 34
X. Clasificación de susceptibilidad a deslizamientos basado en los valores de *H*. Adaptado de Mora (1992) . . . 35
XI. Estaciones pluviométricas utilizadas para el análisis de susceptibilidad. Elaboración propia basado en los datos proporcionados por el MARN. . . . 41
XII. Estaciones pluviométricas obtenidas de la NOAA. Elaboración propia basado en datos obtenidos de la NOAA . . . 41
XIII. Precipitación promedio mensual periodo 1970 - 2020 ($\frac{mm}{mes}$). Elaboración propia en base a las estaciones obtenidas del MARN y NOAA . . . 50

XIV. Valores máximos de precipitación para un periodo de retorno de 100 años, calculados a partir del método de Gumbel. Elaboración propia en base a los datos de precipitación de las estaciones provistas por el MARN y la NOAA 58

Índice de figuras

2.1. Caídos de bloques por gravedad. Obtenido de Geertsema et al. (2006) 6
2.2. Representación de volteo o inclinación en el terreno. Obtenido de Suarez Diaz (1998). 6
2.3. Características de efectos sobre el terreno generados por reptación. Obtenido de Laporte Molina (2018) 7
2.4. Representación de deslizamientos de tipo rotacional. Obtenido de Chaverri Molina (2016). 7
2.5. Representación de deslizamientos translacionales. Obtenido de Chaverri Molina (2016). 8
2.6. Esquema de deslizamiento lateral. Obtenido de Suarez Diaz (1998). 8
2.7. Flujos de tierra y de detritos. Obtenido de Geertsema et al. (2006). 9
2.8. Nomenclatura de las partes de un deslizamiento. Obtenido de Suarez Diaz (1998). . 11
2.9. Etapas de fallamiento propuesta por Varnes (1984) 14
2.10. (a) Un diagrama muy simplificado de las fuerzas que actúan cuando un deslizamiento está en movimiento. (b) Modelo conceptual dela física involucrada en la ocurrencia de deslizamientos. Obtenido de Vittorio de Blasio (2011) 15
2.11. Ejemplo de flujo reológico, lahares del volcán Cotopaxi. Obtenido de Vittorio de Blasio (2011). 16
2.12. Depósito de flujo granular en montañas Elbortz, Irán. Obtenido de Vittorio de Blasio (2011). 16
2.13. Caída de rocas en El Salvador. Obtenido de Peñate (2019) 17
2.14. Reptación en el terreno, ejemplo de deslizamientos lentos. Obtenido de ANDINA (2019). 18

3.1. División política y administrativa de la Mancomunidad La Montañona. Adaptado de Morán (2007). 20
3.2. Modelo de elevación digital de la Mancomunidad La Montañona. 21
3.3. Mapa geoestructural de El Salvador. Obtenido de Pineda Ortiz (2019). 23
3.4. Mapa geológico de La Montañona. Obtenido de Laboratorio SIG-UES. 25

3.5. Sistemas de fallas vinculados a la formación y evolución del Graben Central de El Salvador. Obtenido de SNET (2021) 26

4.1. Área de estudio en La Mancomunidad La Montañona. 36
4.2. Malla de estudio de 1 km^2 por celda. 37
4.3. Malla de estudio de 500 m^2 por celda. 38
4.4. Malla de estudio de 100 m^2 por celda. 39
4.5. Mapa de pendientes en el sitio de estudio. 40
4.6. Distribución espacial de las estaciones utilizadas. 42
4.7. Gráficos temporales de precipitaciones promedio mensuales de las estaciones. 43
4.8. Geología de la Mancomunidad La Montañona. 44
4.9. Flujo de trabajo utilizado para la creación de mapas de susceptibilidad. 45
4.10. Distribución de factores Sr calculados en el sitio de estudio para malla de $1km^2$. . . 46
4.11. Distribución de factores Sr calculados en el sitio de estudio para malla de $500m^2$. . . 47
4.12. Distribución de factores Sr calculados en el sitio de estudio para malla de $100m^2$. . . 47
4.13. Distribución de factores Sl calculados en el sitio de estudio para malla de $1km^2$. . . 48
4.14. Distribución de factores Sl calculados en el sitio de estudio para malla de $500m^2$. . . 49
4.15. Distribución de factores Sl calculados en el sitio de estudio para malla de $100m^2$. . . 49
4.16. Distribución temporal de promedio de precipitación mensual. 50
4.17. Valor de factor Sh obtenido en la interpolación. 51
4.18. Factor *Sh* calculado para el área de estudio. 52
4.19. Distribución de sismos registrados para el periodo 2000 - 2021. 53
4.20. Sismos con intensidad perceptible en el sitio de estudio. 54
4.21. Mapa de Aceleración Máxima del Suelo. Obtenido de Molina et al. (2018) 55
4.22. Valores de PGA para el área de estudio (En rojo rodeado por círculo blanco). . . . 56
4.23. Valores de factor Ts. 57
4.24. Distribución espacial de intensidades máximas de precipitación (Tr = 100 años). . . 58
4.25. Valores de factor Tp obtenidos para la interpolación. 59
4.26. Valor de factor Tp 59
4.27. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos con malla de 1 km^2 a escala 1:50,000 . . . 60
4.28. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos con malla de 500 m^2 a escala 1:50,000 . . 61
4.29. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos con malla de 100 m^2 a escala 1:50,000 . . 62
4.30. Mapa de Susceptibilidad aplicando metodología de índice normalizado. Adaptado de Posner (2015) 64
4.31. Mapa de Susceptibilidad aplicando Mora y Vahrson (1994) con malla de 30 m^2 . . . 65
4.32. Comparativa de resultados de cada metodología. 65

Capítulo 1

Introducción

La región de La Montañona, ubicada en el departamento de Chalatenango, presenta condiciones geológicas y geomorfológicas que la hacen susceptible a deslizamientos, las cuales ponen en riesgo a las comunidades presentes en la zona. Además, la presencia de suelos altamente erosionados y la ocurrencia de lluvias intensas incrementan el riesgo de deslizamientos. Debido al crecimiento poblacional constante en la zona, se hace evidente la necesidad de generar herramientas que permitan identificar de manera precisa y oportuna las zonas de mayor riesgo.

Para ello, se han llevado a cabo diversos estudios en la región, como el Estudio de evaluación de amenazas y planes municipales de reducción de riesgos en el municipio de Chalatenango (Morán (2006)), Las Vueltas (Humberto et al. (2006)), Ojos de Agua (Arévalo et al. (2006)), El Carrizal (Morán et al. (2006b)), Concepción Quezaltepeque (Guillén et al. (2006)) y Comalapa (Morán et al. (2006a)), el cual tuvo como objetivo identificar los factores que causan o que pueden llegar a causar desastres, haciendo un enfoque especial en aquellos que afectan directamente a las actividades humanas y las ambientales. Además, se realizó una caracterización de los diferentes tipos de vulnerabilidades a los cuales está expuesta la población y el terreno, incluyendo la social, económica, institucional y ambiental. Este estudio añade una evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos ante precipitaciones intensas, inundaciones e inestabilidades.

Otro de los estudios realizados en La Montañona es el análisis y síntesis del diagnóstico biofísico y condiciones socioambientales, elaborado por Morán (2007), el cual recopila, valora y evalúa los aspectos del riesgo comunitario presentes en la región, incluyendo las amenazas naturales y las de origen humano por igual. Este estudio hace una especial valoración de las vulnerabilidades físicas, ambientales, económicas y sociales y está estructurado a partir de la información recaudada en los estudios de amenazas naturales realizados en los siete municipios que conforman a la Mancomunidad La Montañona.

Además, el Análisis y síntesis de conflicto de uso de suelos en La Montañona hace una recopilación del uso que se le está dando al suelo a lo largo de toda la región, haciendo una comparativa entre

los usos actuales y los usos para los cuales el suelo está capacitado o es apto para realizar, llegando a la conclusión de que no existe correspondencia entre uso y aptitud.

Es recomendable la utilización de métodos de estimación de susceptibilidad que permitan identificar las áreas con mayores índices de riesgo con un bajo costo técnico y económico, permitiendo a los entes responsables tomar decisiones acertadas en términos de ordenamiento territorial y prevención de desastres. La creación de cartografía temática enfocada en la identificación de áreas con mayor susceptibilidad a deslizamientos se vuelve vital para la toma de decisiones en torno al ordenamiento territorial y la reducción de los riesgos de desastres. Aquí yace una de las mayores razones para la utilización de la Metodología de Mora y Vahrson, dado a que es una técnica de bajo o nulo costo y de rápida aplicación que permite identificar las zonas que presentan una mayor susceptibilidad a deslizamientos, considerando los factores intrínsecos del terreno, así como factores detonantes de un deslizamiento.

Sumado a esto, los estudios realizados en La Montañona permiten identificar las amenazas, conflictos y vulnerabilidades a las que se ve influenciada la región, incluyendo la susceptibilidad a deslizamientos ante precipitaciones intensas, inundaciones e inestabilidades.

Por lo tanto, es importante que se continúen realizando estudios y análisis en la región de La Montañona, para tener una mejor comprensión de las amenazas y vulnerabilidades que existen, así como para generar herramientas que permitan reducir los riesgos de desastres y promover un ordenamiento territorial adecuado. Los estudios mencionados anteriormente son una muestra de la importancia de llevar a cabo investigaciones y análisis en la región para poder tomar decisiones informadas en términos de prevención de desastres y desarrollo sostenible.

Esta investigación tiene como objetivo general:

- Identificar y caracterizar las condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrometeorológicas que propicien la ocurrencia de deslizamientos en la Mancomunidad La Montañona aplicando la metodología de Mora & Vahrson.

Y como objetivos específicos:

- Elaborar cartografía temática que permita identificar y caracterizar los niveles de susceptibilidad en la zona de estudio en escala 1 : 50,000.
- Proponer recomendaciones, en términos de ordenamiento territorial, teniendo como la finalidad la reducción de riesgos.
- Determinar los índices de susceptibilidad a deslizamientos en la zona de estudio.

Capítulo 2

Marco de referencia.

2.1. Antecedentes.

Tal como lo expone Paredes et al. (2012) en su trabajo para el Servicio Geológico Colombiano, existen diversos autores que brindan conceptos básicos y fundamentos para los estudios de zonificación de movimientos masivos. Se destaca además el trabajo de Varnes (1984) que condensa los conceptos básicos de zonificación presentados a la UNESCO por un grupo de investigadores de la Comisión de Deslizamientos de la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica (IAEG) en 1984.

Además, Carrara et al. (1998) menciona que, a pesar de las diferencias metodológicas y técnicas, los métodos propuestos suponen que las condiciones geofísicas y geomorfológicas de los deslizamientos futuros deberían ser comparables a las condiciones que llevaron a la inestabilidad de las laderas pasadas y presentes. En consecuencia, la representación de movimientos pasados y recientes, así como la identificación y representación de factores condicionantes o iniciadores de inestabilidad de ladera, son fundamentales en la predicción de deslizamientos futuros.

En los últimos años, investigadores geólogos e ingenieros geotécnicos han estado examinando la evaluación de la susceptibilidad de El Salvador a los deslizamientos de tierra. Varias metodologías y técnicas ahora se utilizan para identificar áreas que son más susceptibles a deslizamientos de tierra, incluido el análisis geomorfológico, la cartografía de unidades geotécnicas y las evaluaciones de susceptibilidad a través de sistemas de información geográfica (SIG).

Algunos estudios recientes en El Salvador se han enfocado en evaluar la susceptibilidad a deslizamientos en regiones con recurrente ocurrencia de deslizamientos en el país. Uno de estos estudios es el de Navarro Vidal (2012), quien empleó técnicas SIG y de análisis geomorfológico y técnicas multicriterio para evaluar la susceptibilidad en el municipio de Berlín en el departamento de Usulután.

En general, si bien se ha avanzado en la evaluación de la susceptibilidad de El Salvador a los

deslizamientos, aún se requiere más investigación para identificar y evaluar adecuadamente las regiones del país que son más susceptibles a este tipo de eventos.

2.2. Terminología.

En el análisis de amenazas por deslizamientos es importante dejar en claro una serie de términos, los cuales han sido definidos por Mendoza (2017), los cuales se listan a continuación:

1. **Riesgo** Cuantifica las posibilidades y el impacto que un efecto adverso podría generar sobre la vida, la salud, la propiedad o el medio ambiente. Se valoran las vidas humanas y los bienes en peligro. En la mayoría de los casos, el riesgo se calcula como el producto de (probabilidad)*(consecuencias).

2. **Amenaza:** Hace referencia al fenómeno natural de interés, caracterizado de manera geométrica y mecánica. Una descripción de una amenaza a los deslizamientos debe incluir las características de los deslizamientos, como el volumen o área de movimiento y la probabilidad de ocurrencia. También es significativo describir las velocidades y velocidades diferenciales de los deslizamientos.

3. **Peligro:** Una condición que tiene el potencial de tener consecuencias desfavorables. Alternativamente, el peligro es la probabilidad de que ocurra un deslizamiento específico en un momento específico.

4. **Vulnerabilidad:** La probabilidad de perder, o de generarse algún tipo de afectación, un determinado elemento o grupo de elementos dentro del área afectada por el deslizamiento o fenómeno natural. Se mide en una escala de 0 (sin pérdida) a 1 (pérdida completa).

5. **Probabilidad:** Se define como la posibilidad de ocurrencia de un resultado determinado entre el número total de opciones de ocurrencia, es decir, la relación entre resultados específicos y el número total de resultados posibles. La probabilidad se expresa como un número entre 0 y 1, donde 0 denota imposibilidad y 1 denota certeza.

6. **Elementos en riesgo:** A partir del uso de la información disponible, es posible estimar el riesgo que un evento puede significar para las personas, la población, la propiedad o el medio ambiente como resultado de las amenazas. En general, un análisis de riesgo consta de tres pasos: definir el alcance, identificar la amenaza y estimar el riesgo.

7. **Valoración de riesgo:** El proceso de análisis y evaluación de riesgos, sus implicaciones, alcances y afectaciones, en una escala temporal y espacial definida.

8. **Estimación del riesgo:** Es el método para calcular el nivel de riesgos para la integridad en una propiedad o entorno que se está investigando. Los siguientes pasos están incluidos en la evaluación de riesgos: análisis de frecuencia, análisis de consecuencias e integración.

9. **Evaluación del riesgo:** En esta etapa, a partir de distintos criterios que toman como base el juicio y valores, se realiza la toma de decisiones, ya sea explícita o implícitamente, e incluyen consideraciones sobre la importancia de los riesgos estimados y las consecuencias sociales, ambientales y económicas asociadas, con el objetivo de identificar una gama de opciones de gestión de riesgos.

10. **Manejo del riesgo:** Es el proceso completo de evaluación y gestión de riesgos a los cuales el entorno de estudio podría verse afectado.

2.3. Deslizamientos.

La frase "deslizamiento de tierra", o también " movimientos de tierra", se refiere a la ruptura de rocas y su posterior movimiento cuesta abajo debido a la gravedad, definido así por Bogoslovsky (1977).
Los deslizamientos de tierra pueden ocurrir en una variedad de lugares, incluidas las riberas de los ríos, lagos, embalses y mares, así como en las laderas de las montañas. Con frecuencia su impacto es negativo, especialmente en regiones en vías de desarrollo y ponen en peligro la infraestructura y las poblaciones, así como los procesos económicos presentes en la zona, como en el cierre de carreteras o vías comerciales, cierre de minas o canteras, entre otros.

2.3.1. Tipos de deslizamientos.

Existen distintas clasificaciones de los deslizamientos en virtud de sus características de movimiento, escala y alcance, Suarez Diaz (1998) en su trabajo utiliza la clasificación creada por Varnes (1978), quien clasifica los deslizamientos en:

- **Caído o derrumbes:** Bloques o fragmentos rocosos que caen a una velocidad considerable, prácticamente en caída libre, esto debido al desprendimiento de un talud con una pendiente importante, generalmente, con pendientes iguales o mayores a 75 grados, mientras que en pendientes de 45 grados o menores, los caídos se desplazan rodando pendiente abajo.

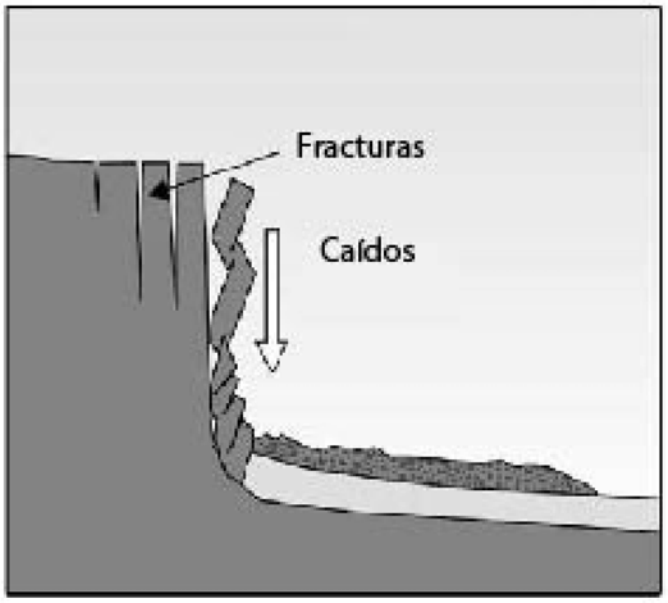

Figura 2.1: Caídos de bloques por gravedad. Obtenido de Geertsema et al. (2006)

- **Inclinación o volteo:** Son movimientos caracterizados por una rotación hacia adelante de una unidad de terreno o roca, estos movimientos pueden ser generados por los esfuerzos presentes sobre dicha unidad, por el agua o por un evento sísmico.

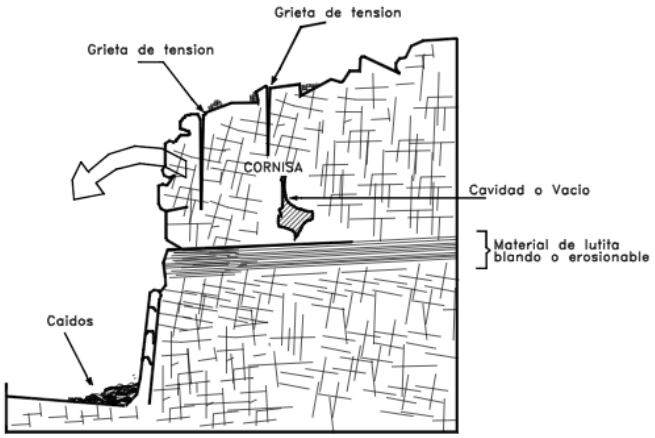

Figura 2.2: Representación de volteo o inclinación en el terreno. Obtenido de Suarez Diaz (1998).

- **Reptación:** Son movimientos lentos a nivel subsuperficial del terreno, no posee una superficie de falla definida. Este movimiento puede ser de un par de centímetros al año, pero afectar a extensiones importantes del terreno. Se atribuye generalmente a procesos de aumento y descensos en los niveles de humedad del terreno, especialmente en suelos blandos y poco consolidados, además, pueden ser precursores de movimientos más rápidos como los flujos.

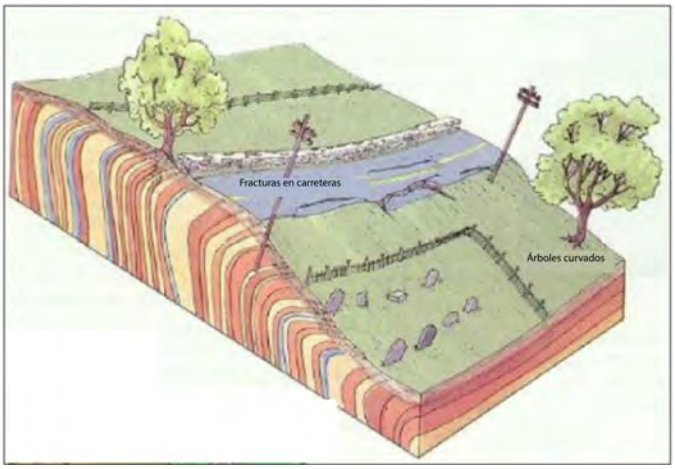

Figura 2.3: Características de efectos sobre el terreno generados por reptación. Obtenido de Laporte Molina (2018)

- **Deslizamientos:** Ocurren cuando una masa o volumen de tierra se desplaza y se desliza por una superficie de ruptura. Pueden ser de naturaleza rotacional o translacional.

    1. **Deslizamiento rotacional:** Son comunes en suelos homogéneos (cohesivos) y se distinguen por el hecho de que la superficie de la falla tiene forma curva o de cuchara; en este deslizamiento, la masa aplastada se acumula en el fondo de la ladera como un lóbulo.

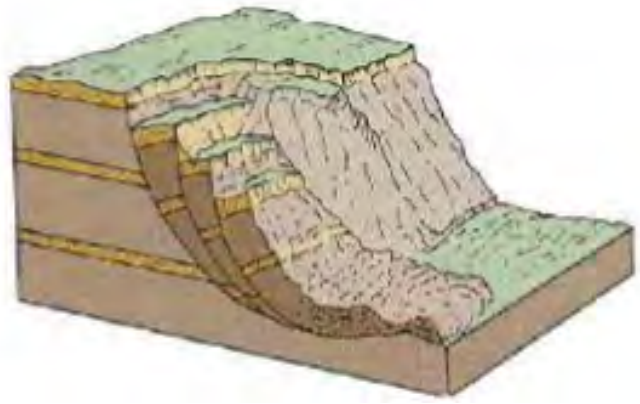

Figura 2.4: Representación de deslizamientos de tipo rotacional. Obtenido de Chaverri Molina (2016).

    2. **Deslizamiento translacional:** Estos pueden ocurrir tanto en suelos como en rocas, y la rotura ocurre como resultado de una o más superficies de fallas (por ejemplo, estratificación, contacto entre rocas, planos de debilitamiento) que son planas y orientadas

en la dirección del talud (ladera).

Figura 2.5: Representación de deslizamientos translacionales. Obtenido de Chaverri Molina (2016).

- **Esparcimiento Lateral:** Este es uno de los tipos de movimientos más complejos de determinar. En este, lo que más domina es el movimiento de extensión, el cual está condicionado por el sistema de fracturas y de esfuerzos presentes. Estas fallas pueden generar no solo movimientos de rotación o traslación, sino también haber presencia de flujos. Suelen presentarse en sitios donde unidades de rocas sobreyacen suelos plásticos y finos, como arcillas o limos.

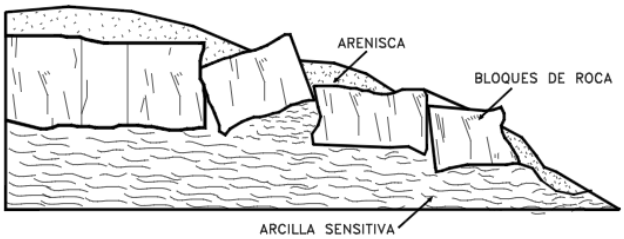

Figura 2.6: Esquema de deslizamiento lateral. Obtenido de Suarez Diaz (1998).

- **Flujos:** Se distinguen por el hecho de que la masa deslizante se desgarra y desintegra, transformándose eventualmente en una masa viscosa que fluye hacia las partes inferiores de la ladera.

    1. **Flujos en roca:** Estas deformaciones son distribuídas a lo largo de un sistema de fracturas de diferentes dimensiones. La velocidad que estos flujos pueden alcanzar hacen que la masa deslizante puede simular el comportamiento de un líquido viscoso.
    2. **Flujos de detritos.** Por regla general, un flujo de rocas termina en un flujo de detritos, esto debiodo al proceso de trituramiento y destrucción del material durante su desplazamiento. Estos procesos pueden ser desencadenado por lluvias o por flujo de agua en planos de debilidad.

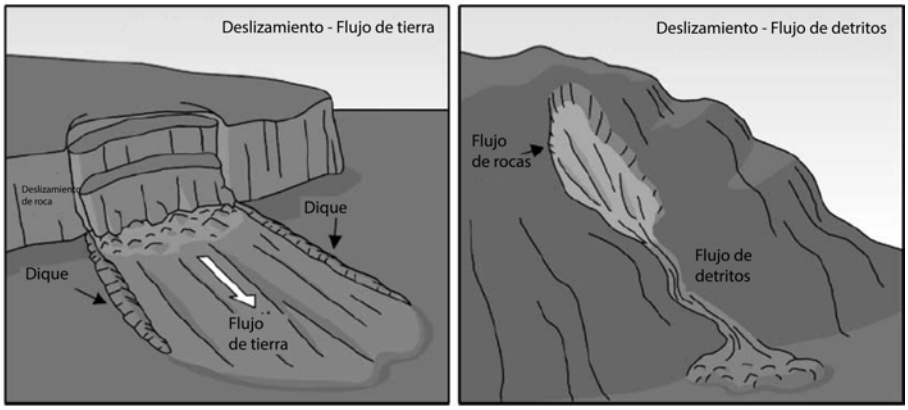

Figura 2.7: Flujos de tierra y de detritos. Obtenido de Geertsema et al. (2006).

- **Avalanchas:** En este fenómeno se genera una falla que se extiende rápidamente a lo largo de toda la superficie que se desplazará, el material desplazado genera un flujo de roca y suelo en forma de río, Se relacionan a lluvias intensas, deshielo de picos nevados o por sismos en zonas de montañas altas.

- **Movimientos complejos.** Dada la variedad de movimientos que pueden presentarse dentro de un deslizamiento, incluso habiendo combinaciones de dos o más de estos, es necesaria una clasificación propia para estas situaciones. Sin mencionar que, dado un movimiento de masa, otro puede iniciarse por acción de la variación de las condiciones de equilibro, o bien, este movimiento ya iniciado puede convertirse en otro tipo de deslizamiento conforme avanza.

Tabla I: Glosario de nombres utilizados para la caracterización de movimientos en masa. Obtenido de Suarez Diaz (1998)

Tipo	**Secuencia**	**Estado de actividad**	**Estilo**	**Velocidad**	**Humedad**	**Material**
Caído	Progresivo	Activo	Complejo	Extremadamente rápido	Seco	Roca
Inclinación	Retrogresivo	Reactivado	Compuesto	Muy rápido	Húmero	Tierra
Deslizamiento	Ampliándose	Suspendido	Multiple	Rápido	Mojado	Residuos
Esparcimiento	Confinado	Inactivo	Sucesivo	Moderado	Muy mojado	
Flujo	Disminuyendo	Dormido	Sencillo	Lento		
	Moviéndose	Abandonado		Muy lento		
		Estabilizado		Extremadamente lento		
		Relicto				

2.4. Nomenclatura de los movimientos de masas.

Típicamente, los procesos de movimiento presentes en los taludes corresponden a aquellos generados por efectos de la gravedad, disparados por factores internos y externos que actúan

sobre una unidad de masa o suelo, y generalmente actúan sobre una superficie de falla. Con esto, Suarez Diaz (1998) realiza la siguiente clasificación de las partes que conforman un movimiento de masas.

- **Escarpe principal:** Corresponde a una superficie muy inclinada que corre a lo largo del área en movimiento, causada por el desplazamiento del material desde su ubicación original. La superficie de la falla está formada por la continuación de la superficie de la escarpe dentro del material.
- **Escarpe secundario:** Es una superficie muy inclinada que se forma a partir de los movimientos diferenciales de la masa de material que se mueve.
- **Cabeza:** Correspondiente a las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.
- **Cima:** Cota mayor del contacto entre elmaterial desplazado y el escarpe principal.
- **Corona:** El materia del sitio, que esencialmente no ha cambiado y es adyacente al punto más alto de la escarpa principal.
- **Superficie de falla:** Corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material movido. El volumen de suelo debajo de la superficie de falla no se mueve.
- **Pie de superficie de falla:** La línea de intercepción (a veces cubierta por material del deslizamiento) entre la superficie de fallamiento y la superficie original del suelo.
- **Base:** El área cubierta por el material desplazado debajo de la superficie de la superficie de falla.
- **Punta o uña:** Punto de la base que se encuentra a mayor distancia de la cima del deslizamiento.
- **Costado o flanco:** Perfil lateral del material desplazado.
- **Superficie original del terreno:** Superficie original del terreno antes de la ocurrencia del desplazamiento.
- **Derecha e izquierda:** Si bien es preferible utilizar la orientación geográfica, en caso de que se utilice las direcciones derecha e izquierda, debe hacerse observando el deslizamiento desde la corona hasta el pie.

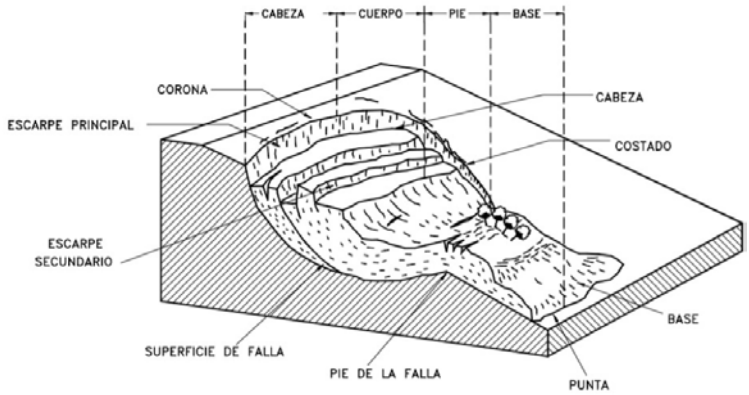

Figura 2.8: Nomenclatura de las partes de un deslizamiento. Obtenido de Suarez Diaz (1998).

2.5. Caracterización de deslizamientos.

Una de las clasificaciones más utilizadas en los deslizamientos es la de Varnes (1984) , en donde, para poder clasificar los diferentes tipos de deslizamientos, se realiza en base a la naturaleza del material que se desplazó, así como el tipo del movimiento, además de esto, las subcategorías propuestas por el autor se realizan con base en la geometría, movimiento además de otras características.

Tabla II: Clasificación de deslizamientos propuesta por Varnes (1984)

Tipo de movimiento	**Tipo de Material**		
	Roca	**De grano hueso**	**De grano fino**
Caídas	Caídas de rocas	Caídas de detritos	Caídas de suelo
Basculamiento	Basculamiento de rocas	Basculamiento de detritos	Basculamiento de suelos
Deslizamiento rotacional	Deslizamiento rotacional de rocas	Deslizamiento rotacional de detritos	Deslizamiento rotacional de suelos
Deslizamiento translacional	Deslizamiento translacional de rocas	Deslizamiento translacional de detritos	Deslizamiento translacional de suelos
Separación lateral	Separación lateral de rocas	Separación lateral de detritos	Separación lateral de suelos
Flujo	Flujo de rocas	Flujo de detritos	Flujo de suelos
Complejos	Combinación de dos o más tipos de deslizamientos.		

Considerando la tabla II, se vuelve imperativo definir los términos de roca y suelo, los cuales, según Mora (1992), se definen como:

1. Roca es la estructura o unidad litológica consolidada, dura o firme, que se encuentra inalterada antes de un proceso de desplazamiento.

2. Suelo se define como una colección de partículas sueltas, no consolidadas, una roca que ha sido mal cementada o agregados inorgánicos, el suelo puede ser residual (formado en el lugar) o transportado. El detrito es un tipo de suelo que contiene entre un 20 % y un 80 % de fragmentos mayores de 2mm, mientras que el suelo fino contiene más del 80 % de fragmentos menores de 2 mm.

2.6. Susceptibilidad a deslizamientos.

Para poder definir la susceptibilidad de ocurrencia de un deslizamiento, debemos usa una definición de Susceptibilidad acorde a los objetivos de este estudio.
Varnes (1984) expresa que la susceptibilidad hace referencia a la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno. Además, la susceptibilidad puede evaluarse desde dos perspectivas:

1. **Sistema de experiencia:**
   La observación directa del mayor número de deslizamientos en el área estudiada se utiliza para evaluar la relación entre los deslizamientos y la geomorfología del terreno.

2. **Sistema teórico:**
   Se mapea la mayor cantidad de factores que se cree que afectan la ocurrencia de deslizamientos y luego se examina la contribución potencial de cada factor.

2.7. Factores propiciantes de la ocurrencia de deslizamientos.

Los factores que pueden desencadenar los deslizamientos, tal como lo expresa Chaverri Molina (2016), pueden separarse en los naturales y los de origen antrópicos. Las características del ambiente natural (clima, tipo de rocas, suelo, sismos) se incluyen en el grupo de naturales, mientras que los factores antrópicos incluyen actividades humanas que alteran las condiciones naturales del sitio, tales como desarrollo de infraestructura, movimiento de tierras, corte, relleno y actividades productivas. Las causas naturales incluyen agua, actividad sísmica (tectónica o volcánica) y otros mecanismos de desenergización que pueden manifestarse individualmente o en combinación. Estos mecanismos tienen varios resultados dependiendo de las condiciones únicas del sitio: pendiente, geomorfologa, geologa subyacente y tipo de suelo. Las causas antrópicas están relacionadas principalmente con la interacción del sitio,. los factores detonantes y las actividades humanas. Se incluyen perturbaciones inducidas artificialmente en una pendiente (corte, relleno), cambios o perturbaciones en el drenaje patrón y el levantamiento de proyectos de infraestructura.

Además, como lo expone Suarez Diaz (1998), el que una falla se haga presente obedece a todo un proceso que se ha generado con anterioridad, esto puede deberse a distintos factores, endógenos como exógenos, entre los cuales pueden señalarse:

1. **Condiciones originales del talud:** Estos hacen referencia a la susceptibilidad propia del terreno a la ocurrencia de los fenómenos de deslizamientos. La geología, topografía, sistemas

de fallas, la resistencia y otras características mecánicas de la roca presente, sin dejar de lado la cobertura vegetal, condicionarán la resistencia del medio al deterioro, fallamiento y a la acción de otros agentes sobre el medio.

2. **Factores de deterioro:** Aquí, las propiedades del medio empiezan a modificarse, lo cual genera una disminución de la resistencia al deterioro y al esfuerzo cortante. Puede deberse a distintos factores, como el cambio de uso de suelos, construcciones y actividades antropogénicas, cambios en el sistema hidrogeológico de la zona, entre otros. Los efectos que esta puede llegar a tener en el medio son la ocurrencia de fallas progresivas, reducción de la cohesión de la unidad litológica y la erosión interna, por mencionar algunos.

3. **Activación del movimiento:** También conocidos como factores detonantes, son el resultado del aumento de los esfuerzos de corte a lo largo de la superficie de falla en dirección del talud bajo efectos de la gravedad.

2.8. Etapas de fallamiento.

La clasificación de deslizamientos tiene como objetivo describir e identificar los cuerpos que se encuentran en movimiento relativo. Las clasificaciones existentes son principalmente geomorfológicas, y solo unas pocas introducen consideraciones mecánicas o geológicas.
Suarez Diaz (1998) considera cuatro etapas diferentes en este proceso de movimiento:

1. **Etapa de deterioro o antes de la falla donde el suelo es esencialmente intacto.**

2. **Etapa de fallamiento, se caracteriza por la formación de una superficie de falla o el movimiento de una masa importante de material.**

3. **Etapa post-falla, comprende los movimientos de la masa involucrada en un deslizamiento desde el momento de la caída hasta el momento preciso en que queda completamente detenida.**

4. **Etapa de posible reactivación, en la cual pueden ocurrir movimientos que podrían considerarse una nueva falla, y esto incluye las tres etapas anteriores.**

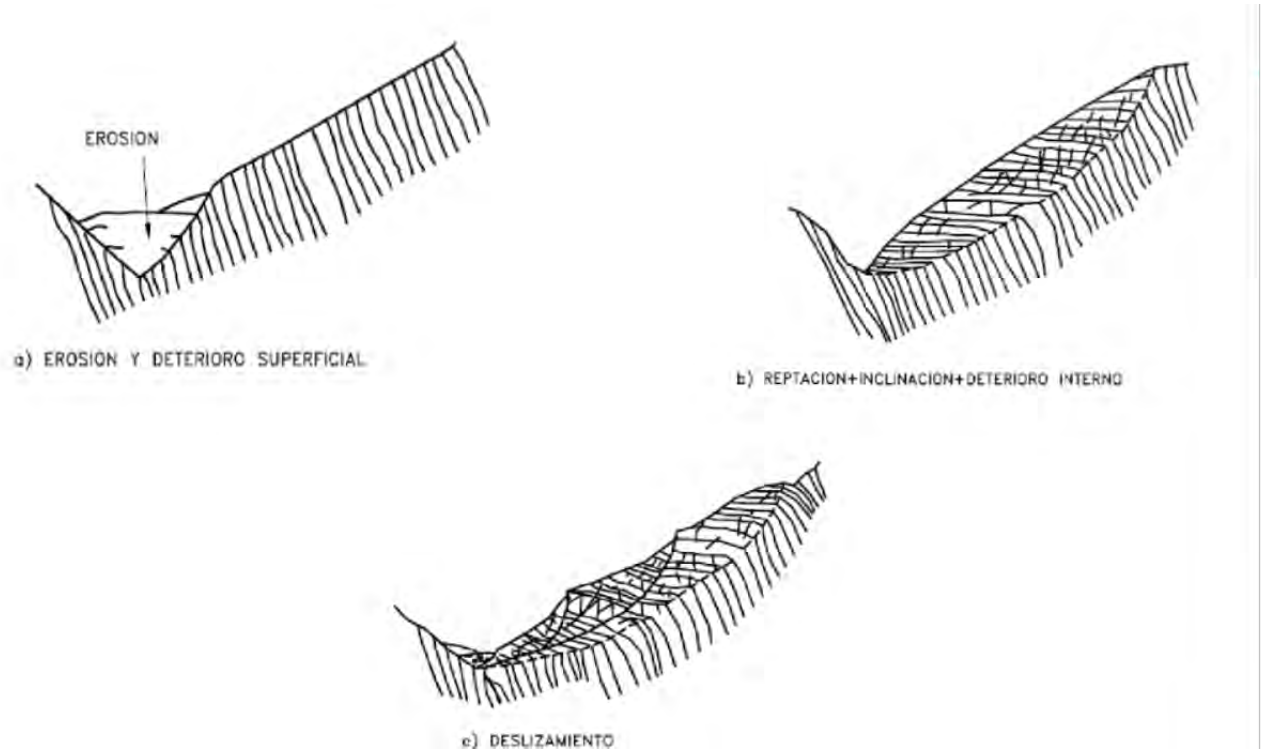

Figura 2.9: Etapas de fallamiento propuesta por Varnes (1984)

.

2.9. Física de un deslizamiento.

Muchas veces, al momento de hablar de deslizamientos y movimientos de terreno, únicamente se hace un enfoque al tipo de movimiento (descripción cinemática), dejando de lado el proceso de cada uno de los elementos, esfuerzos y movimientos relativos que existen en el bloque que se desplaza.

Los objetivos principales de los estudios de deslizamientos de tierra son la mitigación de desastres, la prevención y la reducción de riesgos. La evolución geomórfica del entorno natural está profundamente influenciada por los deslizamientos de tierra. La gravedad tiene una tendencia a redistribuir la roca o el suelo y suavizar el suelo a medida que una pendiente se vuelve más empinada debido al levantamiento tectónico, la erosión fluvial o la erosión glacial, expuesto así por Vittorio de Blasio (2011).

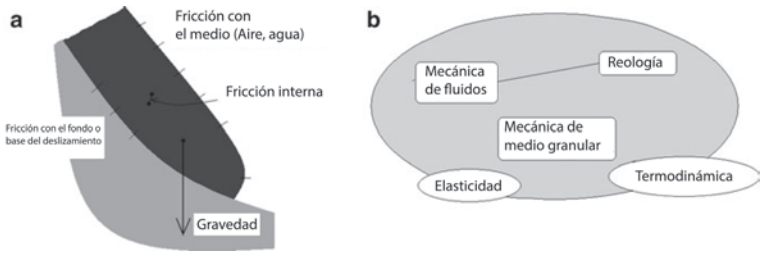

Figura 2.10: (a) Un diagrama muy simplificado de las fuerzas que actúan cuando un deslizamiento está en movimiento. (b) Modelo conceptual dela física involucrada en la ocurrencia de deslizamientos. Obtenido de Vittorio de Blasio (2011)

2.10. Clasificación de deslizamientos en base a sus características físicas.

Si bien existe una clasificación de deslizamientos, la cual ha sido descrita con anterioridad, ésta se basa en el tipo de movimiento presente en la unidad que se desplaza; a diferencia de esta clasificación realizada por Varnes (1978), Vittorio de Blasio (2011) realiza su clasificación sobre la base de las propiedades físicas de la masa que se desplaza, lo cual nos permite tener una mejor idea de la naturaleza o de las características pétreas del volumen que se desplaza.

1. **Flujos Reológicos (Cohesivo)**:
   Un flujo de lodo es un tipo de deslizamiento de tierra que ocurre cuando una cantidad significativa de agua y suelo rico en arcilla se mezclan y caen pendiente abajo, con frecuencia canalizándose a lo largo de las cuencas de los ríos. Este es el mejor ejemplo de un flujo reológico. En este caso, para poder describirlo físicamente, es necesario recurrir a la dinámica de fluidos, cuyas características son especificadas como un fluido no Newtoniano. Estos están básicamente constituido de finas partículas mezcladas con agua dándole cohesividad.
   Los flujos reológicos afectan entornos sedimentarios particulares, como morrenas, loess, depósitos piroclásticos, riberas de ríos o ambientes subacuáticos caracterizados por depósitos clásticos. El agua altera significativamente la reología, reduce la resistencia al corte efectiva y la viscosidad de los flujos de escombros, lo que tiene un impacto en su comportamiento mecánico.

Figura 2.11: Ejemplo de flujo reológico, lahares del volcán Cotopaxi. Obtenido de Vittorio de Blasio (2011).

2. **Flujos granulares (friccionales)**:
   Los flujos granulares son movimientos rápidos de material granular en los que la dinámica está significativamente influenciada por la fricción, tal como se define en las leyes tradicionales de Amontons-Coulomb. Los flujos granulares a gran escala normalmente se forman en la naturaleza como resultado del colapso de una losa de roca inicialmente intacta. La rápida desintegración del macizo rocoso está determinada por el impacto de alta energía, la deformación interna y el aplastamiento.

Figura 2.12: Depósito de flujo granular en montañas Elbortz, Irán. Obtenido de Vittorio de Blasio (2011).

3. **Caídas y derrumbes de rocas:**

   Un desprendimiento de rocas se define por la caída aislada de bloques bajo el efecto de la fuerza de gravedad, con una gran parte del viaje que consiste en la fase de caída libre. Este tipo de movimiento puede ser descrito como el movimiento de un cuerpo rígido, aunque es algo totalmente distinto cuando se trata de evaluar el impacto del bloque al momento de caer, debido a que este podría rebotar, rodar o colisionar con otro objeto, complicando incluso más el problema. El proceso generalmente se explica en términos de fricción de rodadura y coeficientes empíricos de restitución; sin embargo, este nivel de descripción ignora la complejidad de la interacción bloque-terreno. Para caracterizar el proceso y ofrecer información útil para las estrategias de mitigación en lugares propensos a desprendimientos de rocas, la dinámica de cuerpo rígido junto con los coeficientes de restitución se consideran satisfactorias en una primera aproximación.

Figura 2.13: Caída de rocas en El Salvador. Obtenido de Peñate (2019)

4. **Arrastre y deslizamientos lentos:**

   Algunos deslizamientos se mueven muy lentamente y, con frecuencia, los únicos signos de su presencia son hendiduras y bloques rotos. El comportamiento de los deslizamientos de tierra lentos es frecuentemente mal entendido. La existencia de capas de arcilla debajo de la formación rocosa puede causar deslizamientos lentos, mientras que las fracturas a lo largo de un plano débil pueden causar movimientos relativos adicionales prolongados en el tiempo. Con frecuencia se ven afectados por la actividad de congelación y descongelación o por eventos kársticos.

Figura 2.14: Reptación en el terreno, ejemplo de deslizamientos lentos. Obtenido de ANDINA (2019).

2.11. Alos Palsar

La misión ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) fue un proyecto conjunto de la Agencia Japonesa para la Exploración Aeroespacial (JAXA) y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI), según Facility (2019). El satélite ALOS PALSAR fue lanzado al espacio el 24 de enero de 2006 y estuvo en funcionamiento hasta mayo de 2011, cuando fue dado de baja.

2.11.1. Características principales:

1. Radar de Apertura Sintética (SAR): ALOS PALSAR era un SAR que operaba en la banda de frecuencia L, lo que le permitía penetrar las nubes y obtener imágenes de la superficie de la tierra en todas las condiciones climáticas.

2. El satélite proporcionó una variedad de técnicas de observación, incluyendo Polarimetric SAR (PolSAR), Fine Beam Single Polarization (FBS) y Fine Beam Dual Polarization (FBD). Estos métodos permiten obtener imágenes con diversas características y resoluciones.

3. Resolución: La resolución espacial de las imágenes PALSAR varió según el modo de observación, desde 1 metro para FBS hasta alrededor de 10 metros para FBD y PolSAR.

4. Cobertura Global: ALOS PALSAR ofreció imágenes que cubren un área geográfica amplia, lo que permite monitorear e investigar varias regiones del mundo.

2.11.2. Modelo de elevación digital.

Se conoce como Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés) Una representación digital de una porción de una superficie física en forma de rejilla o centro comercial tridimensional. Estos modelos contienen información sobre la altura o la elevación de los puntos terrestres en relación con un punto de referencia vertical, como el medio del océano. La creación del DEM implica el uso de técnicas de teledetección como el procesamiento de imágenes satelitales, LIDAR (detección y rango de luz), fotogrametría o datos topográficos recopilados por equipos de campo, expuesto así por Toz (2008).

Los DEM son herramientas esenciales para varias aplicaciones en campos como cartografía, hidrología, geología, planificación urbana, gestión de recursos hídricos, ingeniería, modelado de suelos y geografía general. Permitir, entre otras cosas, ver y analizar la topografía de una región, identificar las características del suelo, computar pendientes y calcular volúmenes de terreno.

Capítulo 3

Descripción del sitio.

La Mancomunidad La Montañona está conformada por los municipios de Chalatenango, Las Vueltas, Ojos de Agua, El Carrizal, La Laguna, Comalapa y Concepción Quezaltepeque. El área total de la microrregión es de 334.5 km^2, lo que representa el 17 % del área total del departamento de Chalatenango. Se encuentra al norte del país, siendo un área fronteriza con Honduras.

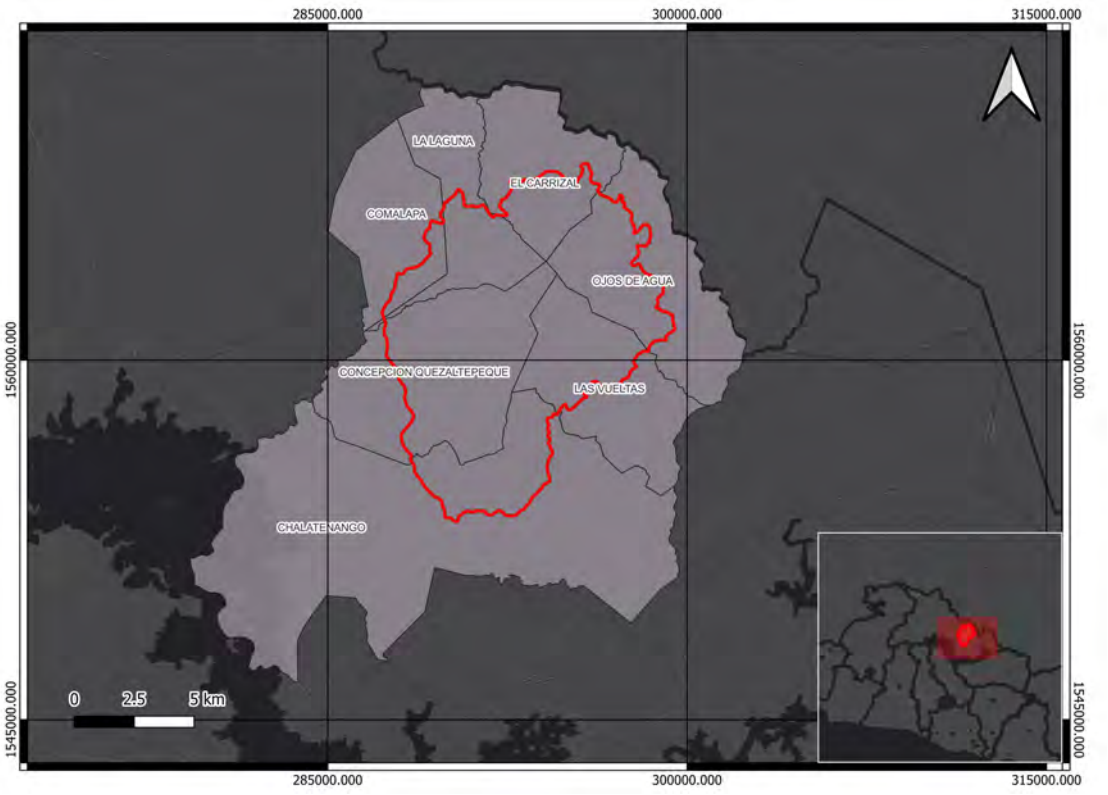

Figura 3.1: División política y administrativa de la Mancomunidad La Montañona. Adaptado de Morán (2007).

3.1. Topografía.

Basado en modelos de elevación digital, la región de la Mancomunidad La Montañona tiene una superficie muy variada con varios cerros y montañas con elevaciones que oscilan los 320 a 1640 msnm (metros sobre el nivel del mar) y pendientes prominentes, que en algunos casos se convierten en crestones completos. Existen pequeños valles entre montañas que se han formado como resultado de la meteorización y/o erosión, y posterior sedimentación de material, particularmente en zonas húmedas; Los valles más grandes se encuentran en las partes bajas de la región, cerca de los embalses generados por las centrales hidroeléctricas en el cause del río Lempa, donde hay abundante material que ha sido depositado como resultado de la meteorización de rocas y transportado principalmente por ríos y arroyos.

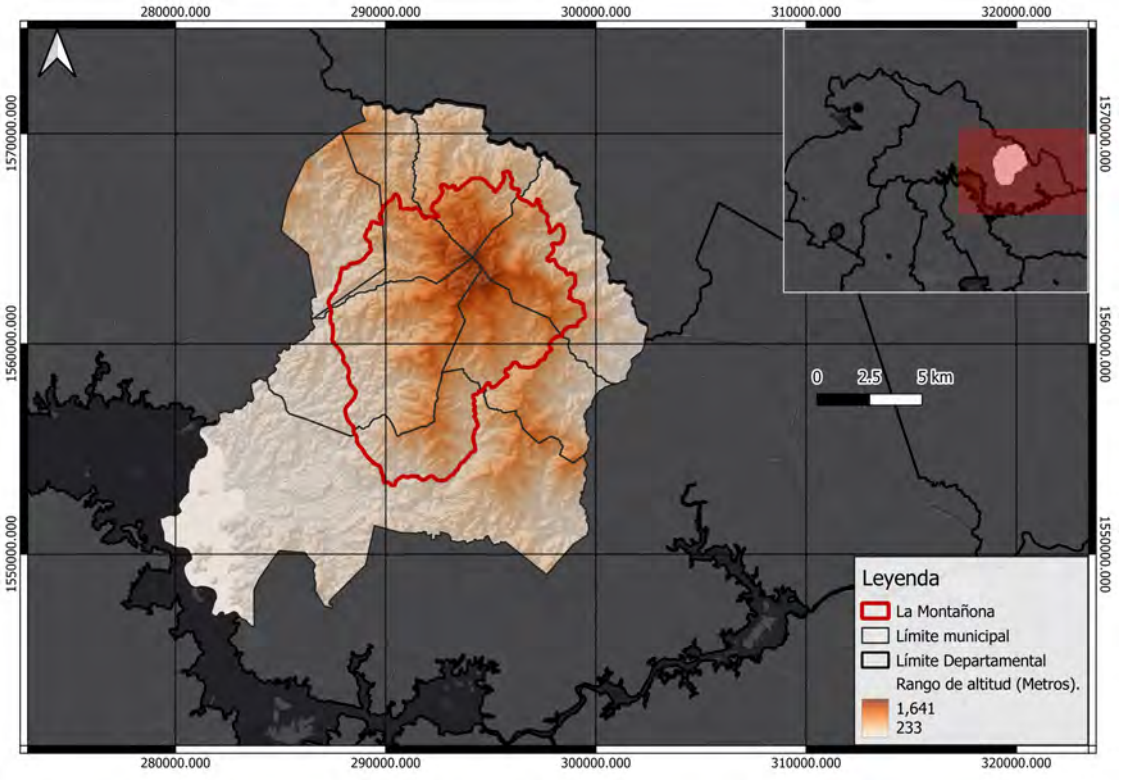

Figura 3.2: Modelo de elevación digital de la Mancomunidad La Montañona.

3.2. Clima.

Según la clasificación de Köppen (1884), el factor orográfico juega un papel crítico en la definición del clima de las regiones climáticas de El Salvador; con este criterio podemos distinguir altitudes sobre el nivel del mar que van desde los 320 msnm hasta los 1640 msnm en el municipio de Chalatenango; también podemos mencionar que existen dos regiones climáticas, siendo la primera que va entre los 0 a 800 msnm, otra que va desde los 800 hasta los 1,200 msnm, y la última que va desde los 1,200 hasta los 1,800 msnm.
Según las altitudes, estas regiones climáticas son:

1. Sabanas tropicales calientes o tierra caliente.

2. Sabanas tropicales calurosas o tierras templadas.

3. Clima tropical de las alturas.

3.3. Marco geológico regional.

Como resultado de la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa del Caribe, se forma la Cadena Volcánica Centroamericana que se extiende desde Guatemala hasta Costa Rica en una distancia de 1.100 kilómetros, con El Salvador ubicado aproximadamente en el medio. La compresión causada por la subducción provoca fallas generalizadas en todo el país y también es la fuente de una mayor actividad volcánica y sísmica. La geología general del país está definida por la presencia generalizada de rocas volcánicas, y su morfología está definida por la alternancia de edificios volcánicos elevados sobre las llanuras, expuesto así por Torrecilla Macho (2001)

El Salvador está constituido, casi en su totalidad, por rocas volcánicas del Cenozóico y del Cuaternario. Existe un basamento sedimentario, ubicado en los límites Noroeste del país, correspondiente a sedimentos Jurásico y del Cretácico en la formación Metapán, estos se conforman mayormente por conglomerados que contienen altas cantidades de cuarzo, calizas y areniscas con intercalaciones esporádicas de rocas volcánicas, tal como lo expone Ferrés López (2014).

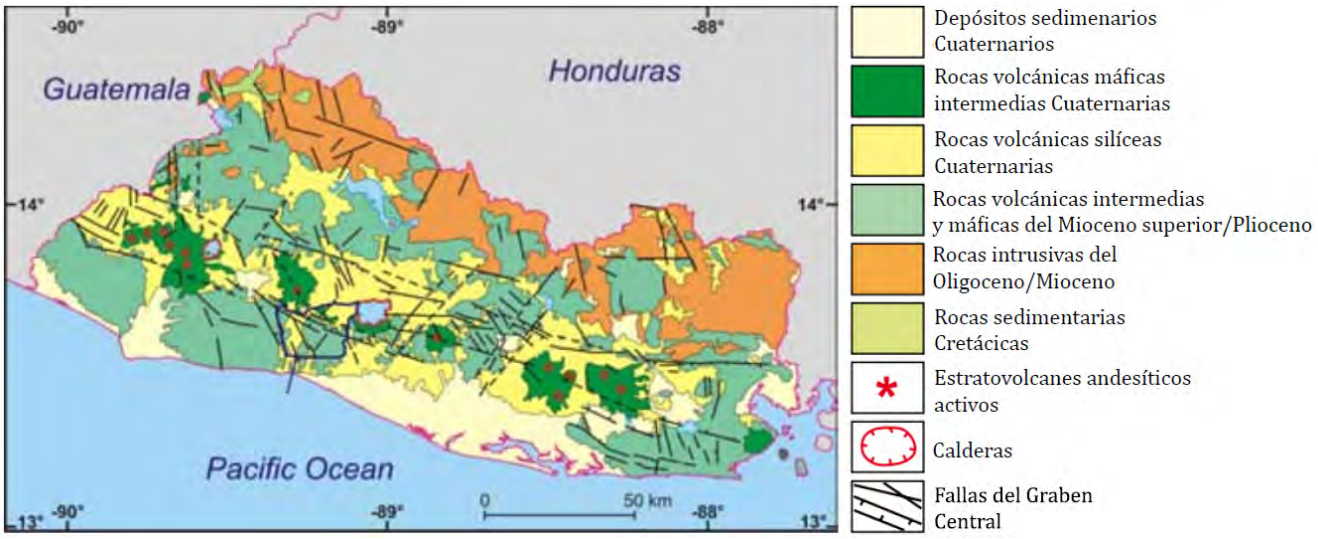

Figura 3.3: Mapa geoestructural de El Salvador. Obtenido de Pineda Ortiz (2019).

Como es denotado por Mata (2000), la geología presente en El Salvador puede ser generalizada en 3 grandes unidades litológicas:

1. Un basamento rocoso que se encuentra compuesto mayormente por formaciones geológicas del paleozoico, con presencia de materiales del cretácico superior e inferior en sectores puntuales. Dentro de esta unidad, se pueden distinguir distintas litologías, incluyendo rocas metamórficas con deformación plegada y fracturada, rocas sedimentarias de ambiente continental como lutitas, areniscas y conglomerados, así como también calizas y evaporitas.

2. La superficie del basamento está cubierta por una serie de materiales volcánicos que datan del Cenozoico superior, entre los que se encuentran diversos tipos de rocas, siendo los basaltos y las andesitas los más abundantes. Asimismo, se han identificado extensas zonas con afloramientos de materiales volcánicos ácidos, como las riolitas.

3. Por último, se encuentran los suelos del Cuaternario, los cuales están compuestos por materiales sedimentarios de origen volcánico reciente y sedimentos que provienen de procesos aluviales, fluviales y lacustres.

Los bordes N y S del graben están dominados por materiales de la Formación Bálsamo (Mioceno Tardío a Plioceno), mientras que el interior de la depresión está dominado por materiales de la Formación Cuscatlán (Plioceno Superior-Pleistoceno), sobre los cuales se encuentran los materiales volcánicos más jóvenes del Se deposita la Formación San Salvador (Pleistoceno Superior a Holoceno).

El Salvador es un país joven desde el punto de vista geológico, ya que una cuarta parte del territorio nacional es de época pleistocena, mientras que las otras tres cuartas partes están cubiertas por rocas terciarias, predominando las de época pliocena. Los terrenos más antiguos son de edad cretácica y cubren alrededor del 5 % del territorio salvadoreño. Sólo estos últimos son de origen sedimentario marino; el resto, con algunas excepciones, están formados por fenómenos volcánicos. En algunos lugares también se encuentran rocas intrusivas de la época del Mioceno (también conocidas como terciarias), esto expuesto también por Torrecilla Macho (2001).

3.4. Marco geológico local.

La Mancomunidad La Montañona se encuentra en la región norte de Chalatenango, El Salvador. El área está caracterizada por su relieve montañoso y forma parte de la cordillera norte, que es una cadena montañosa que recorre el país. El contexto geológico de La Montañona está influenciado por su ubicación en la cordillera montañosa de El Salvador.

En cuanto a las principales unidades geológicas, el mapa geológico de El Salvador muestra que La Montañona esté compuesta por una combinación de rocas volcánicas y sedimentarias. En la región, se pueden encontrar depósitos volcánicos, como basaltos, andesitas y riolitas, que son producto de la actividad volcánica pasada en el área. También pueden estar presentes formaciones sedimentarias, como sedimentos aluviales y fluviales, resultado de la erosión y sedimentación a lo largo del tiempo, esto puede observarse en la figura 3.4.

En cuanto a la geomorfología, se puede encontrar una topografía accidentada con pendientes pronunciadas y valles estrechos debido a la acción de procesos erosivos, fluviales y tectónicos a lo largo de los años. La presencia de montañas y colinas escarpadas es característica de esta zona.

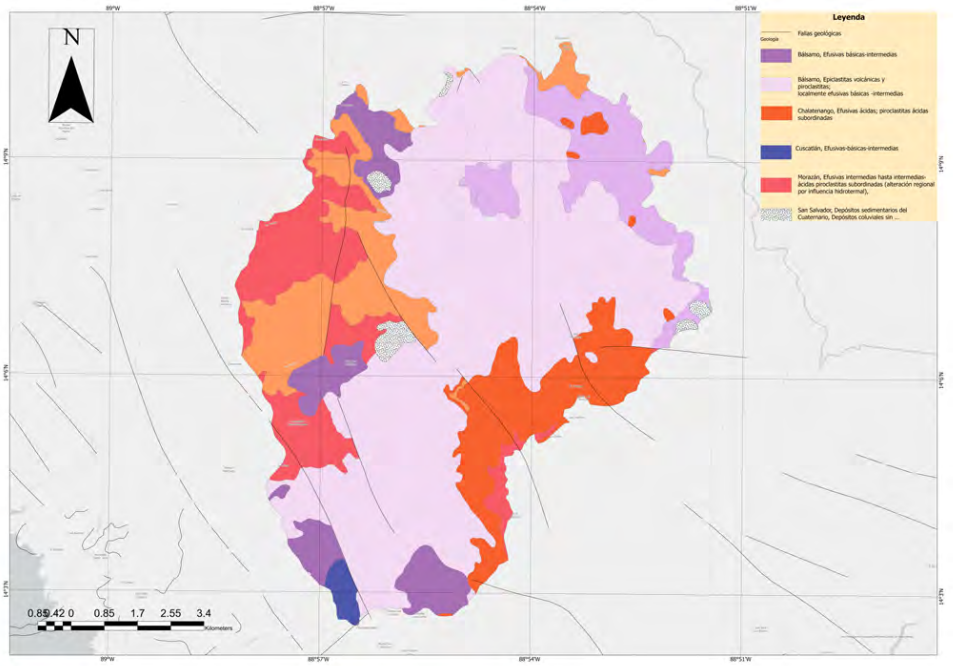

Figura 3.4: Mapa geológico de La Montañona. Obtenido de Laboratorio SIG-UES.

3.5. Marco tectónico.

El Graben Central Centroamericano, según menciona Dengo (1968), que se está desarrollando en la placa continental del Caribe, es la estructura tectónica más importante de la región. Los esfuerzos de compactación regional, combinados con los esfuerzos de extensión en las partes superiores de la litósfera, dieron como resultado la formación del Graben Centroamericano, que comenzó hace entre 9 y 2 millones de años.

La longitud de esta estructura dentro del territorio es variable, oscilando entre 15 y 30 kilómetros. Dentro de este graben se ha desarrollado el vulcanismo cuaternario salvadoreño, con una tendencia migratoria hacia la frontera sur del país. Esta estructura tectónica se extiende con un eje preferente WNW-ESE y se conoce localmente como "Fosa Mediana".

Según Carr (1984), El Salvador está ubicado en la cuarta sección tectónica de Centroamérica, que se extiende aproximadamente por 230 kilómetros. A partir de esta interpretación es posible identificar tres sistemas o familias de fallas dominantes:

Sistema de Fallas WNW-ESE: El sistema más importante de El Salvador, con un rumbo aproximado de N 70° W. Las fallas de este sistema definen los límites norte y sur del Graben Central, donde se ha desarrollado el frente volcánico activo y se han producido los terremotos más destructivos. En el foso hay una serie de pequeñas caídas en la misma dirección, lo que indica la presencia de una zona afectada por esfuerzos distensivos. Sin embargo, mecanismos y

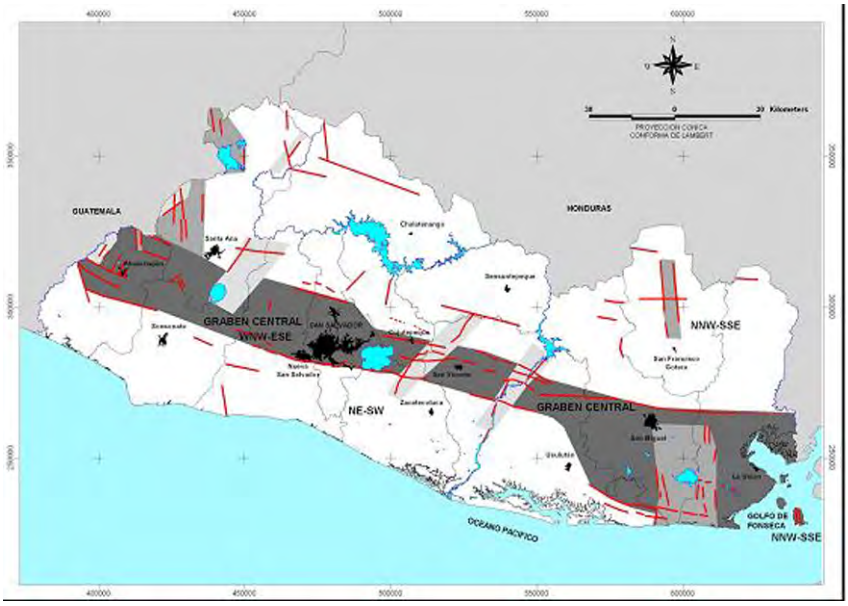

Figura 3.5: Sistemas de fallas vinculados a la formación y evolución del Graben Central de El Salvador. Obtenido de SNET (2021)

desplazamientos localizados en algunos drenajes sugieren que también están presentes movimientos de deslizamiento (transcurrentes).

Sistema de fallas NNW-SSE: Este sistema se caracteriza por numerosas fallas normales y depresiones tectónicas volcánicas. Algunas de estas fallas se pueden ver en la sección norte de El Salvador ya lo largo de la frontera con Guatemala. Los volcanes activos Santa Ana, San Salvador y San Miguel están todos atravesados por estas fallas, las cuales han desarrollado actividad magmática recientemente.

Sistema de fallas NE-SW: Este sistema de fallas predomina en el noreste de El Salvador, cerca de la frontera con Guatemala, donde su tipo es normal.

Capítulo 4

Metodología.

Existen diversas metodologías que permiten estimar la susceptibilidad de un terreno o región ante la ocurrencia de un deslizamiento, estas varían dependiendo del enfoque de cada una, teniendo unas un enfoque determinístico, como lo son el Método de Índices Normalizados, cuyas aplicaciones en El Salvador han sido resultado del trabajo de Posner (2015). Además de este, existe también el enfoque heurístico teniendo como uno de sus exponentes a la Metodología de Mora y Vahrson (1994), desarrollada por Mora (1994).

En el contexto de la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos, el enfoque determinístico se basa en el uso de modelos matemáticos y estadísticos para evaluar la probabilidad de que ocurran deslizamientos en una determinada zona. Estos modelos se construyen a partir de la recopilación de datos geológicos, geotécnicos, climáticos y topográficos de la zona de estudio. El enfoque determinístico se basa en la suposición de que los factores que influyen en la ocurrencia de deslizamientos son bien conocidos y pueden ser cuantificados de manera precisa.

Por otro lado, el enfoque heurístico se basa en la observación y análisis de los deslizamientos que han ocurrido en una zona determinada con el objetivo de identificar patrones y relaciones entre las características de los deslizamientos y los factores geológicos, topográficos y climáticos que influyen en su ocurrencia. El enfoque heurístico se basa en la suposición de que la ocurrencia de deslizamientos es un fenómeno complejo y no lineal, en el que intervienen múltiples factores y cuyas interacciones no son bien conocidas o no pueden ser cuantificadas de manera precisa.

4.1. Mora y Vahrson.

4.1.1. Generalidades

Este es un sistema experto básico que permite la clasificación "a priori" de los peligros de deslizamientos de tierra en lugares tropicales sísmicamente activos de una manera rápida y de bajo costo. Su objetivo es ayudar a los responsables de la toma de decisiones a determinar si se deberían realizar o no más y más estudios geotécnicos extensos. Hay cinco factores en la entrada. El "indicador intrínseco de susceptibilidad a deslizamientos de tierra" se define mediante una combinación de tres de ellos (pendiente, litología y humedad del suelo). Mientras tanto, una combinación de elementos de intensidad de lluvia y terremoto produce la " indicación de activación", según lo menciona Mora (1994).

Este método fue elaborado por Sergio Mora y Wilheim-Günther Vahrson en Costa Rica en el año de 1991. Se especializa en clasificar la amenaza por deslizamientos en áreas tropicales con alta sismicidad.

4.1.2. Estimación de la susceptibilidad a deslizamientos.

El método de Mora y Varhson (1994) determina el grado de susceptibilidad en función de las condiciones geológicas, topográficas y humedad del suelo, además, considera factores que podrían funcionar como detonantes de deslizamientos, siendo estos la sismicidad y la ocurrencia de lluvias. Este cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$H = Susc * Trig \tag{4.1}$$

$$H = (Sr * Sl * Sh) * (Ts + Tp) \tag{4.2}$$

Los valores anteriores corresponden a los factores que están involucrados en la ocurrencia de un deslizamiento, los cuales son:

1. H**: Nivel de riesgo relativo.**
2. Sus**: Susceptibilidad Intrínseca**:
   - *a*) Sr: Factor de pendiente.
   - *b*) Sl: Factor litológico.
   - *c*) Sh: Factor de humedad relativa.

3. $Trig$**: Factores desencadenantes**:

   a) Ts: Factor de Intensidad sísmica.

   b) Tp: Factor de intensidad de precipitaciones

Estos factores, por si mismos o en combinación, pueden ser mapeados utilizando una unidad de malla específica. una vez realizado el cálculo de estos factores y operandolos mediante la ecuación 4.2, permite la identificación de las áreas con mayor susceptibilidad, con lo cual es posible tomar decisiones, especialmente en términos de ordenamiento territorial y planes de prevención de riesgos, así como la elección de sitios donde se deben realizar estudios geotécnicos más detallados.

4.1.3. Indicadores de Susceptibilidad ($Susc$).

Las características intrínsecas del terreno, la calidad mecánica de los materiales locales y su comportamiento "pasivo" están incluidos en esta indicación. El relieve (Sr), la composición litológica (Sl) y la humedad del suelo (Sh) son las propiedades que definen el estado de los taludes investigados.

4.1.3.1. Factor de pendiente (Sr).

Representan la textura natural del suelo dentro de una unidad de malla o de cuadrícula. Está definida a partir de la máxima diferencia de elevaciones en un área de 1 km^2, con esto, se obtiene el valor de pendiente relativa (Rr).

$$Rr = \frac{h_{max} - h_{min}}{km^2} \tag{4.3}$$

Ecuación 4.3: Cálculo de la pendiente relativa, ecuación propuesta por Mora (1994).

A partir de esto, se pueden obtener los valores de Sr correspondiente a los rangos de pendiente relativa:

Tabla III: Valores del factor de pendiente Sr para cada rango de pendiente relativa Rr, adaptado de Mora (1994).

Rango de Rr	**Clasificación**	**Factor de pendiente**
0 - 75	Muy bajo	0
76 - 175	Bajo	1
176 - 300	Moderado	2
301 - 500	Medio	3
501 - 800	Alto	4
>800	Muy alto	5

Sin embargo, y con la llegada de los Sistemas de Información Geográficos (SIG), Román (2018) propone la utilización de los valores de pendiente del terreno, clasificándolo:

Tabla IV: Clasificación de valores Sr en base a pendiente del terreno. Adaptado de Román (2018)

Rango de pendiente (grados)	**Valor asignado**	**Características del terreno**
0 - 2	1	Plano o casi plano
2 - 4	2	Inclinación suave
4 - 8	3	Pendientes inclinadas
8 - 16	4	Modelo escarpado
16 - 35	5	Escarpado
35 - 55	6	Muy escarpado
>55	7	Extremadamente escarpado

4.1.3.2. Factor litológico (Sl).

Probablemente el componente más importante y, al mismo tiempo, el más difícil de evaluar. En casos ideales, se emplearían datos geotécnicos detallados, pero en lamayoría de las ocaciones esta información no está disponible o directamente es inexistente, si este es el caso, una descripción geológica general, pero con un buen criterio geológico, puede ser utilizada. El peso volumétrico, los índices de identificación, los indicadores de resistencia al corte, los grados de alteración hidrotermal y / o meteorológica, la distribución espacial y las características de las discontinuidades (fallas, juntas), su relación con el drenaje de la geometría del talud y las condiciones de presión de los poros, el comportamiento y la posición del nivel freático, todos ser tomado en consideración. En caso de que estos no estén disponibles, Mora y Varhson crearon una clasificación general de diferentes litologías y su respectivo valor de *Sl*.

Tabla V: Clasificación de distintos tipos de litologías y su correspondiente valor de Sl. Adaptado de Mora (1994).

Litología	**Calificación**	**Factor Sl**
Aluvión compacto permeable; caliza permeable, intrusiones levemente fisuradas, basalto, ígnimbrita, gneis, hornfels, bajo grado de intemperismo, bajo nivel freático, fracturas limpias-rugosas, alta resistencia al cizallamiento.	Bajo	1
Mayor grado de meteorización de las litologías mencionadas y de rocas sedimentarias macizas duras, menor resistencia al cizallamiento y fracturas cizallables.	Moderado	2
Rocas volcánicas, metamórficas, metamórficas, sedimentarias y sedimentarias considerablemente meteorizadas, suelos de regolitos arenosos compactados, fracturas considerables, niveles freáticos fluctuantes	Medio	3
Rocas considerablemente erosionadas, hidrotermalmente alteradas de cualquier tipo, fuertemente fracturadas y fisuradas, rellenas de arcilla; suelos piroclásticos y fluvio-lacustres mal compactados, capas freáticas poco profundas	Alto	4
Rocas extremadamente alteradas, suelos aluviales, coluviales y residuales de baja resistencia al cizallamiento, capas freáticas poco profundas	Muy alto	5

4.1.3.3. Factor de humedad relativa de suelo. (Sh).

El factor de humedad relativa en el suelo, el parámetro Sh, toma en cuenta las condiciones de humedad promedio en el suelo. Calcula el impacto de la humedad acumulada a lo largo del año y puede utilizarse como punto de partida para determinar si las lluvias intensas funcionarán como factor desestabilizador. Esto se genera por el hecho de que, al aumentar la cantidad de agua, aumenta la presión dentro de los poros del material, esto podría propiciar la posibilidad de fallamiento. Las mediciones directas in situ, seguidas de balances hídricos completos, son claramente la mejor técnica para establecer el contenido de humedad del suelo. Sin embargo, debido a que esta información rara vez es accesible, se utiliza una metodología simple de balance suelo-agua, que simplemente requiere los valores promedio de precipitación mensual.
Mora (1994) propone los siguientes pasos para realizar esta estimación:

1. Se asigna un valor de índice a cada valor de precipitación promedio mensual. Se ha demostrado que la cifra límite de 125 mm refleja la evapotranspiración potencial (PET) mensual promedio en América Central.Una penetración significativa requiere al menos 40 mm de lluvia recolectada en 10 días, o aproximadamente 125 mm cada mes, según la investigación realizada por Mora (1991).

2. Después de que se haya revisado cadames, se debe determinar el total de los doce valores mensuales asignados para cada estación de pluviómetro estudiada. Los valores totales varían de cero a veinticuatro.

3. La siguiente tabla muestra cómo Mora y Varhson divide el total en cinco grupos.

Tabla VI: Valores asignados para cada rango de precipitaciones promedio. Adaptado de Mora (1991).

Precipitación promedio mensual ($\frac{mm}{mes}$)	**Valor asignado**
<125	0
125 - 250	1
>250	2

Tabla VII: Valores del factor Sh para cada valor acumulado de precipitaciones. Adaptado de Mora (1991)

Valor acumulado de los índices de precipitación	Calificación	Factor Sh
0 - 4	Muy bajo	1
5 - 9	Bajo	2
10 - 14	Medio	3
15 - 19	Alto	4
20 - 24	Muy alto	5

4.1.4. Factores de disparo (Trig).

Este indicador describe las fuerzas impulsoras externas activas y su probabilidad de desencadenar deslizamientos de tierra.
Reúne dos elementos: los terremotos ocurridos en los 100 años previos al análisis y los eventos de lluvia.

4.1.4.1. Factor de Intensidad Sísmica (Ts).

El factor de intensidad sísmica Ts se calcula observando los deslizamientos de tierra causados por terremotos y correlacionar cómo las intensidades sísmicas afectan los deslizamientos de tierra en entornos litológicos, climáticos y geomórficos similares.
Diferentes conjuntos de intensidades de fuentes obtenidad de la macrosismicidad aproximadamente comparables (Escala Mercalli Modificada) se asociaron con la densidad de deslizamientos de tierra y las métricas de devastación de la superficie.

En resumen, el factor de intensidad sísmica se refiere a la propensión de una región a experimentar movimientos sísmicos significativos, que pueden afectar la estabilidad de las laderas y aumentar el riesgo de deslizamientos. Se puede considerar que las áreas de mayor intensidad sísmica son más propensas a la desestabilización, particularmente si estas áreas presentan formaciones topográficas y geológicas que fomentan este tipo de eventos geodinámicos.

4.1.4.2. Factor de Intensidad de Precipitaciones (Tp).

Existen dos tipos de situaciones respecto al desencadenamiento de deslizamiento por precipitaciones:

1. Deslizamientos desencadenados por precipitaciones de corta duración pero de gran intensidad.

2. Deslizamientos desencadenados por precipitaciones menos intensas, pero con mayor duración y con mayor extensión.

Tabla VIII: Determinación de factor Ts a partir de valores de intensidad sísmica para un periodo de 100 años. Basados en observaciones de Mora (1994) en Costa Rica y América Central.

Intensidad de sismos (Mercalli modificado)	**Calificación**	**Factor Ts**
III	Leve	1
IV	Muy Bajo	2
V	Bajo	3
VI	Moderado	4
VII	Medio	5
VIII	Considerable	6
IX	Importante	7
X	Fuerte	8
XI	Muy fuerte	9
XII	Extremadamente fuerte	10

Para tener en cuenta ambos tipos de eventos, Mora (1994) crearon un factor basado en la determinación de valores máximos de cien años de precipitación diaria (24 horas), examinando series de tiempo que abarcan 10 años o más.

La clasificación propuesta por Mora (1994) muestra los valores máximos y las clases correspondientes para períodos de retorno de 100 años. Para utilizar estaciones con registros cortos (n <10 años) para cubrir localidades donde no hay información, se proporciona una clasificación adicional en la misma tabla (columna 2) basada en el promedio de los valores máximos de precipitación diaria.

Tabla IX: Clasificación de máximas precipitaciones para un periodo de retorno de 100 años, así como una clasificación para valores anuales máximos. Adaptado de Mora (1994).

Precipitaciones máximas n>10 años, Tr= 100 años	**Precipitaciones n <10 años (Promedio)**	**Calificación**	**Factor Tp**
<100 mm	<50 mm	Muy bajo	1
101 - 200 mm	51 - 90 mm	Bajo	2
201 - 300 mm	91 - 130 mm	Medio	3
301 - 400 mm	131 - 175 mm	Alto	4
>400 mm	>175 mm	Muy alto	5

Con estos valores, Mora (1992) clasifica los valores de H en los siguientes niveles:

Tabla X: Clasificación de susceptibilidad a deslizamientos basado en los valores de H. Adaptado de Mora (1992)

Valor de H	**Nivel**	**Clasificación de susceptibilidad a deslizamiento.**
<6	I	Despreciable
7 - 32	II	Bajo
33 - 162	III	Moderado
163 - 512	IV	Medio
513 - 1250	V	Alto
>1250	VI	Muy Alto

4.1.5. Adquisición de datos.

4.1.5.1. Delimitación del área de estudio.

El área escogida corresponde a la Mancomunidad La Montañona, Chalatenango, si bien, dicha micro región tiene un área de aproximadamente $334.5km^2$, para este estudio se considerará el terreno que está por sobre la cota 780, delimitando así un contorno de aproximadamente 81.7 km^2, representado en la figura inferior. Esto con la finalidad de escoger las zonas que presentan una mayor vulnerabilidad.

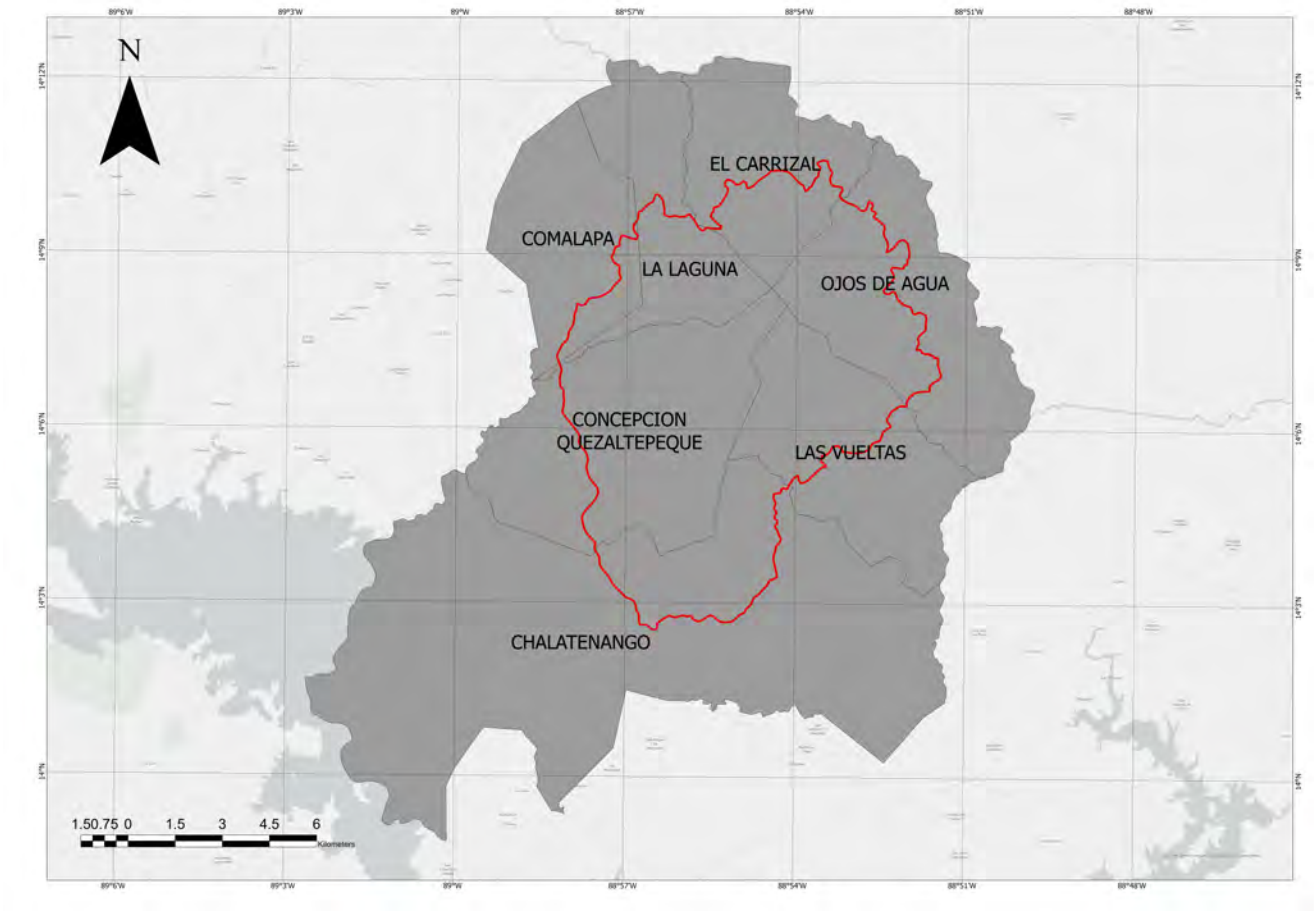

Figura 4.1: Área de estudio en La Mancomunidad La Montañona.

4.1.5.2. Creación de malla.

La metodología Mora y Vahrson (1994) utiliza una malla de estudio para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos, haciendo un análisis celda a celda con los respectivos cálculos. En esta investigación, a diferencia de la metodología original, se proponen además de la malla de 1 kilómetro cuadrado, dos mallas de 500 y 100 metros cuadrados respectivamente. El uso de las últimas dos mallas es para observar la variabilidad que puede presentar el método de Mora y Vahrson dependiendo de la unidad de malla que se utiliza en el análisis, además, con esto se busca generar mapas de susceptibilidad a deslizamiento con diferentes resoluciones que puedan ser utilizados posteriormente con distinto enfoque espacial, como podría ser, el utilizarlos a escala departamental, municipal y comunitaria.

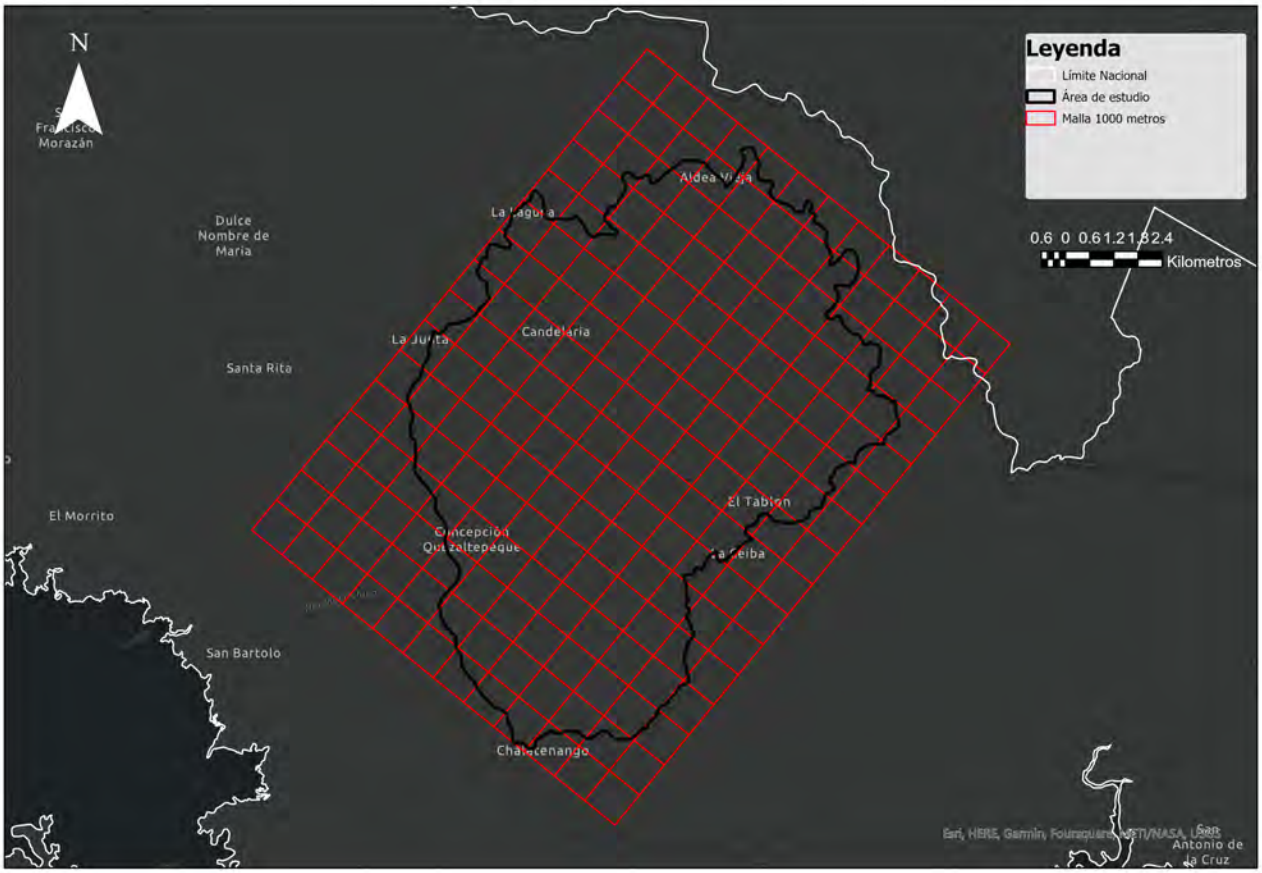

Figura 4.2: Malla de estudio de 1 km^2 por celda.

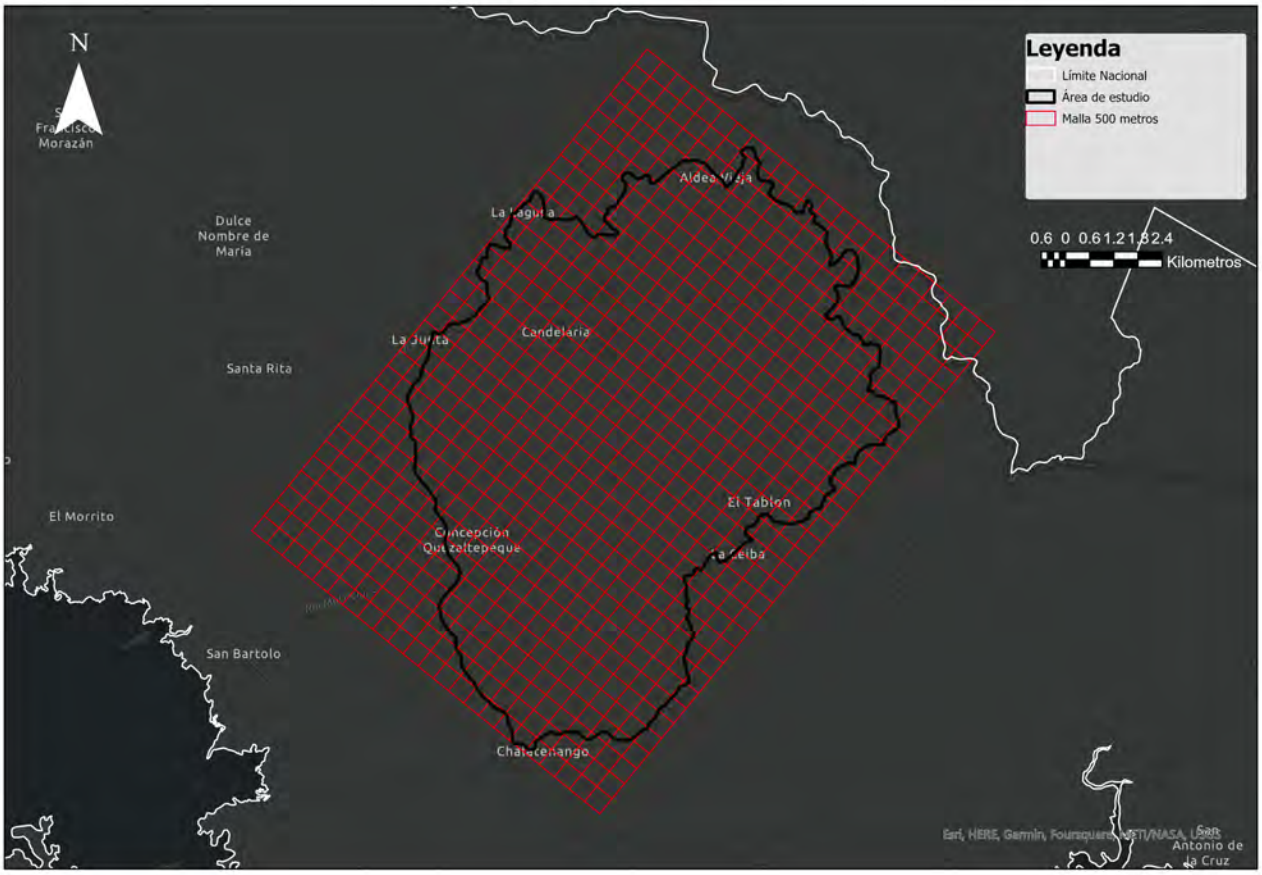

Figura 4.3: Malla de estudio de 500 m^2 por celda.

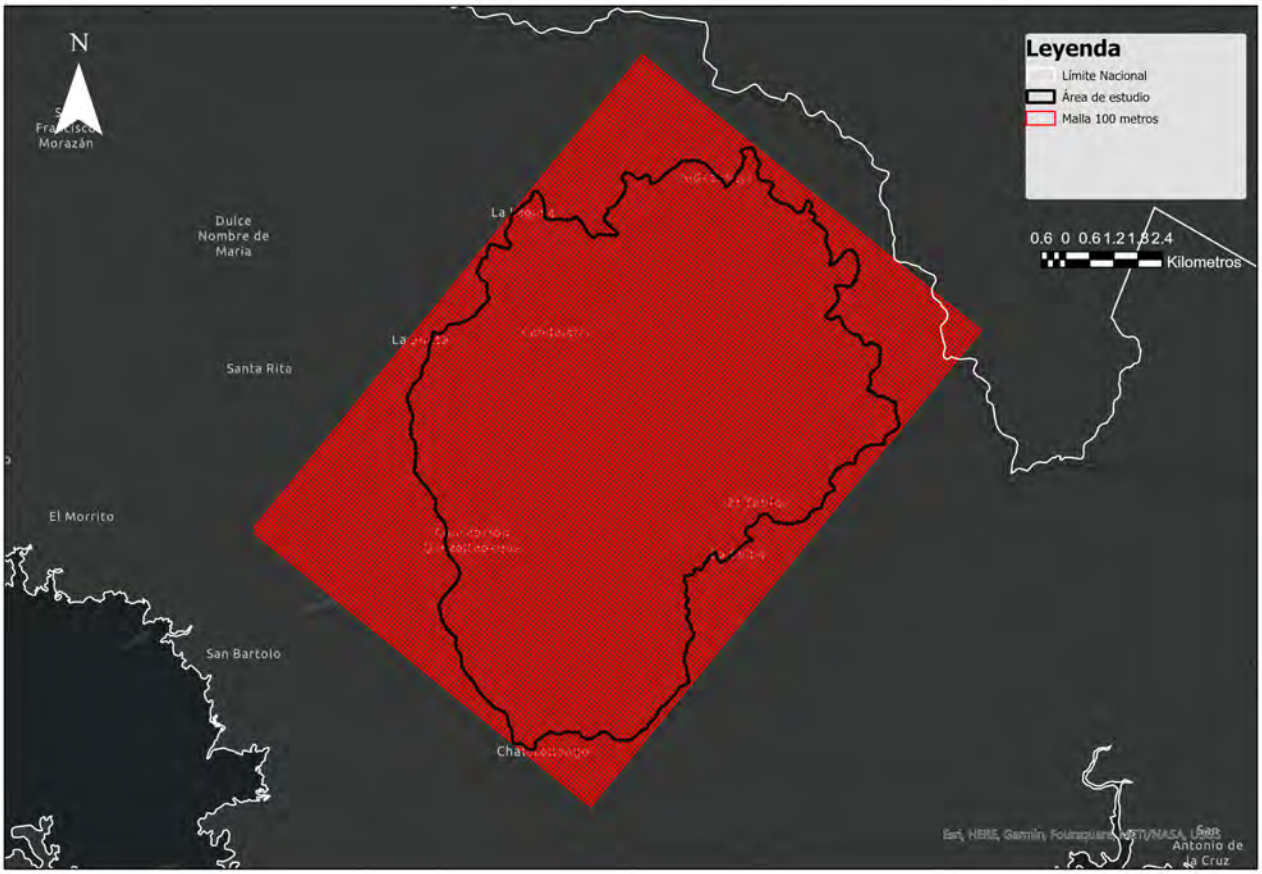

Figura 4.4: Malla de estudio de 100 m^2 por celda.

4.1.5.3. Obtención de datos de elevación.

Haciendo uso de datos satelitales, específicamente imágenes Alos Palsar se obtuvieron Modelos de Elevación Digital con resolución de 12.5 metros permitiendo realizar un análisis de pendiente en el sitio de estudio, identificando las zonas con topografía más accidentada, el cual se muestra en la figura inferior.

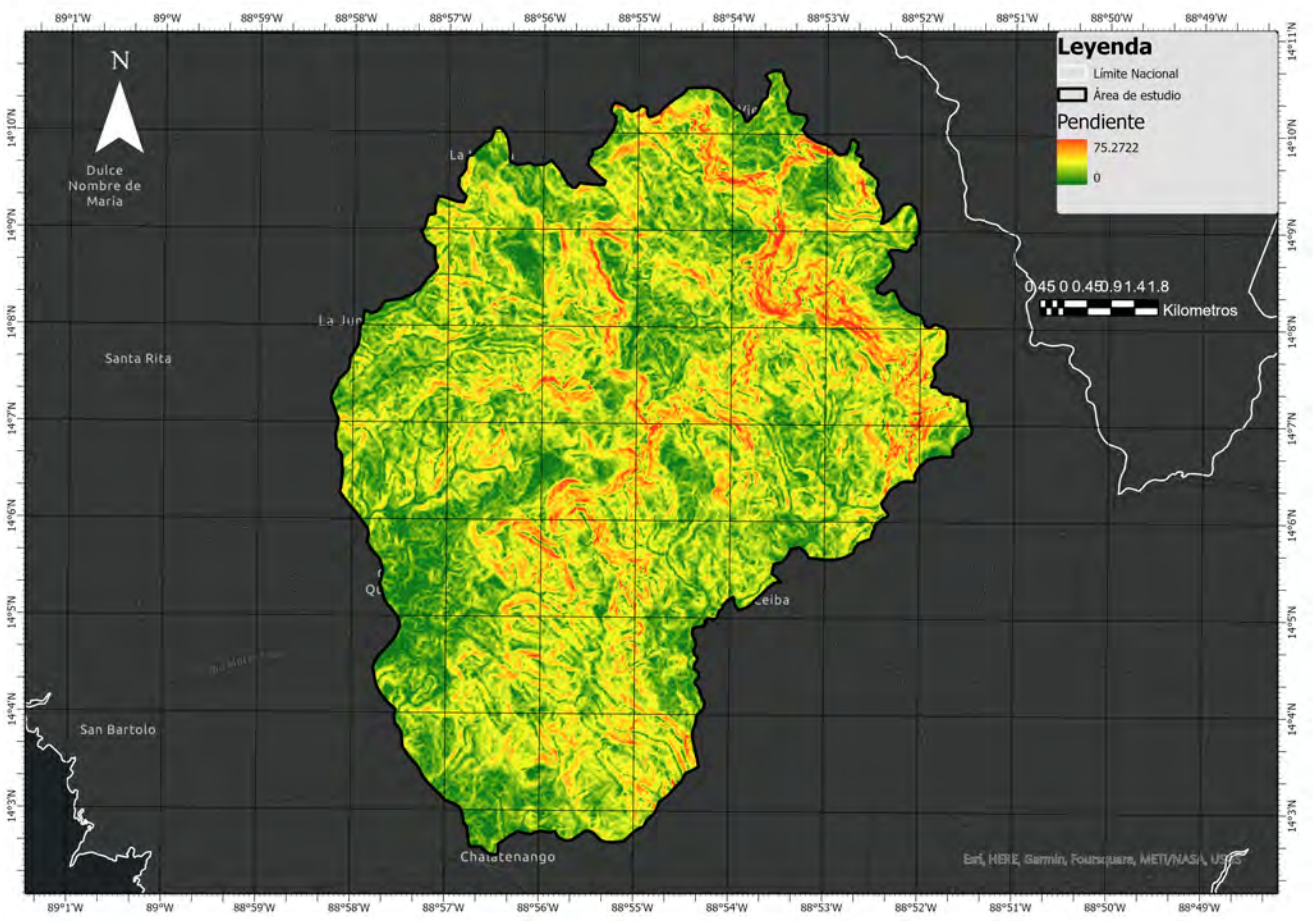

Figura 4.5: Mapa de pendientes en el sitio de estudio.

4.1.5.4. Obtención de datos meteorológicos.

A partir de los datos de precipitación diaria brindada por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) se realizó una tabulación de datos, estimando los datos promedio mensuales de cada una de las estaciones:

Tabla XI: Estaciones pluviométricas utilizadas para el análisis de susceptibilidad. Elaboración propia basado en los datos proporcionados por el MARN.

Nombre	**Rango temporal**
Concepción Quezaltepeque	1971 - 2019
El Paraíso	1971 - 2019
Dulce Nombre de María	1971 - 2019
La Laguna	1977 - 2019
Ojos de Agua	1971 - 1981

Además de estos datos, también se obtuvieron datos de precipitación diarios en el repositorio de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

Tabla XII: Estaciones pluviométricas obtenidas de la NOAA. Elaboración propia basado en datos obtenidos de la NOAA

Nombre	**Rango temporal**
Choluteca	1979 - 1993
Tegucigalpa	1971 - 2020
Acajutla	1971 - 2020
San Salvador	1973 - 2020
La Mesa	1973 - 2020
Catacamas	1979 - 1993
INSIVUMEH	1979 - 1993
La Unión	1979 - 1993

Estos datos fueron utilizados para la interpolación de los datos de precipitaciones, tanto los valores promedio mensuales como para los valores máximos anuales. La distribución espacial de las estaciones puede verse en el siguiente mapa.

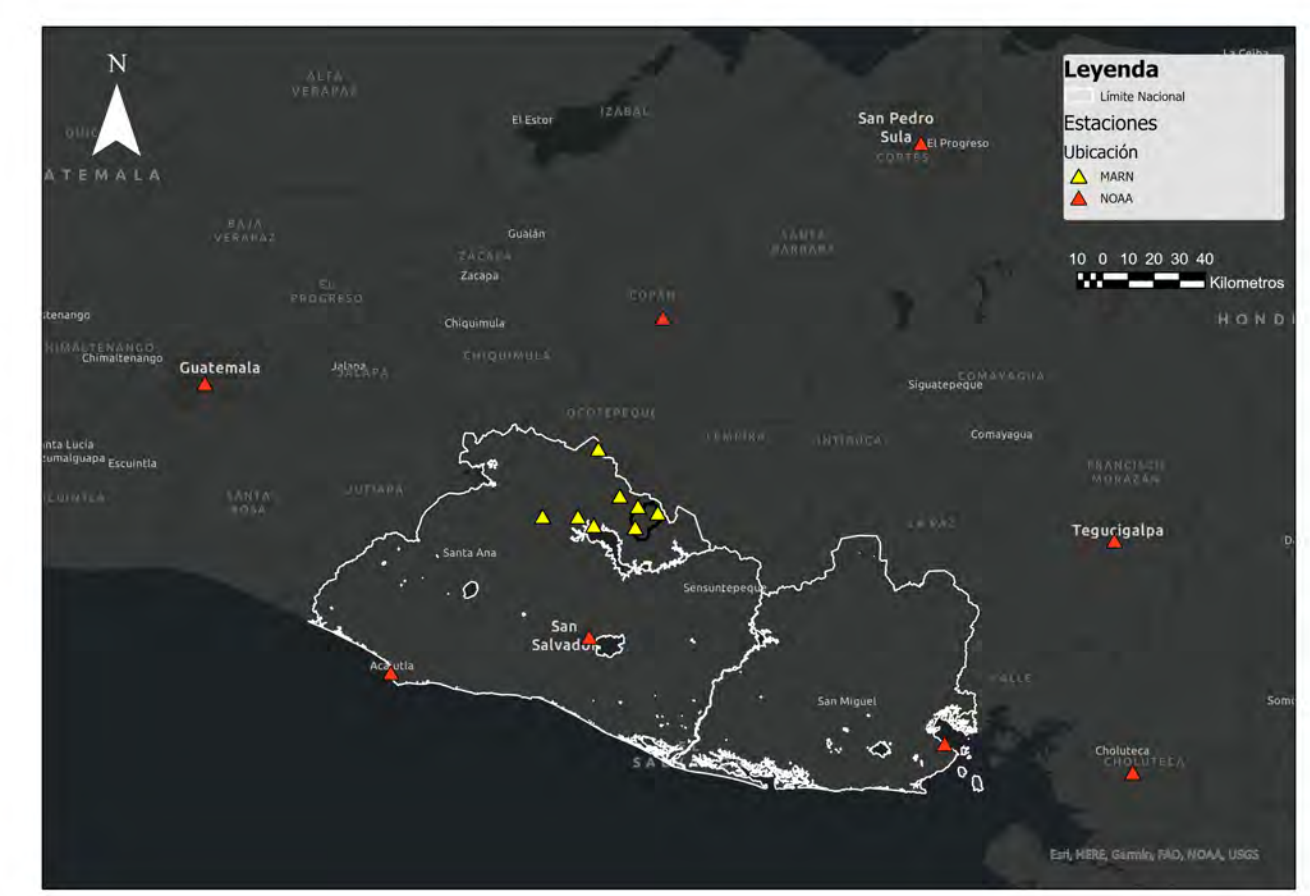

Figura 4.6: Distribución espacial de las estaciones utilizadas.

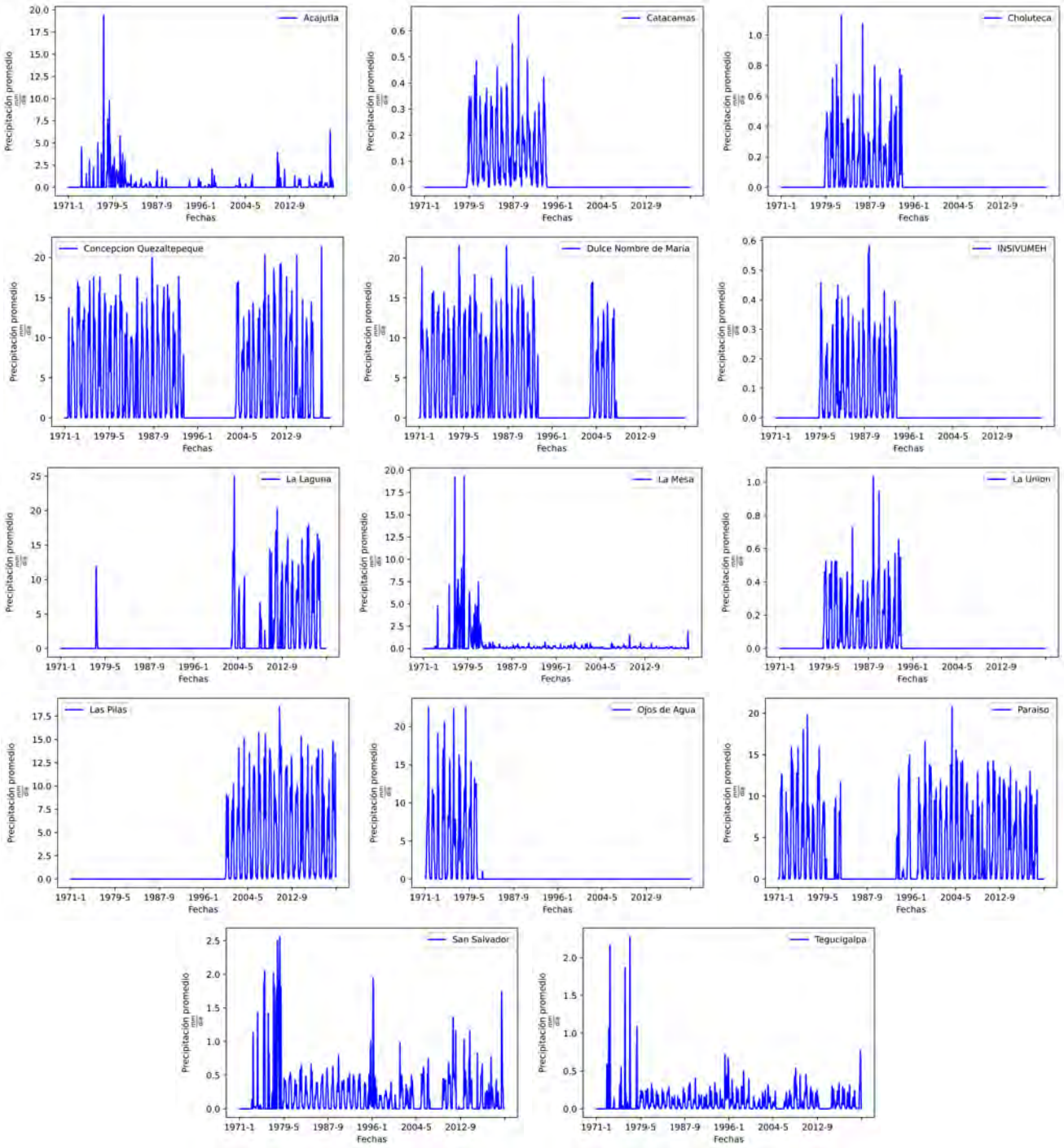

Figura 4.7: Gráficos temporales de precipitaciones promedio mensuales de las estaciones.

En la figura 4.7 puede observarse la distribución temporal de las precipitaciones promedio de registradas en cada una de las estaciones, a partir de estos datos se crearon las interpolaciones para la obtención de los valores de humedad relativa del suelo presente en el sitio de estudio.

4.1.5.5. Obtención de datos geológicos.

Utilizando datos provisto por el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica se realizó el análisis de las unidades geológicas presentes en el sitio de estudio. La mayoría de estas unidades son de origen volcánico, pero existen también una minoría de unidades geológicas de origen sedimentario, una característica en común que guardan todas estas unidades es su antigüedad geológica, lo cual ya da pie a esperar que la erosión y meteorización en las zonas sea un factor importante a considerar.

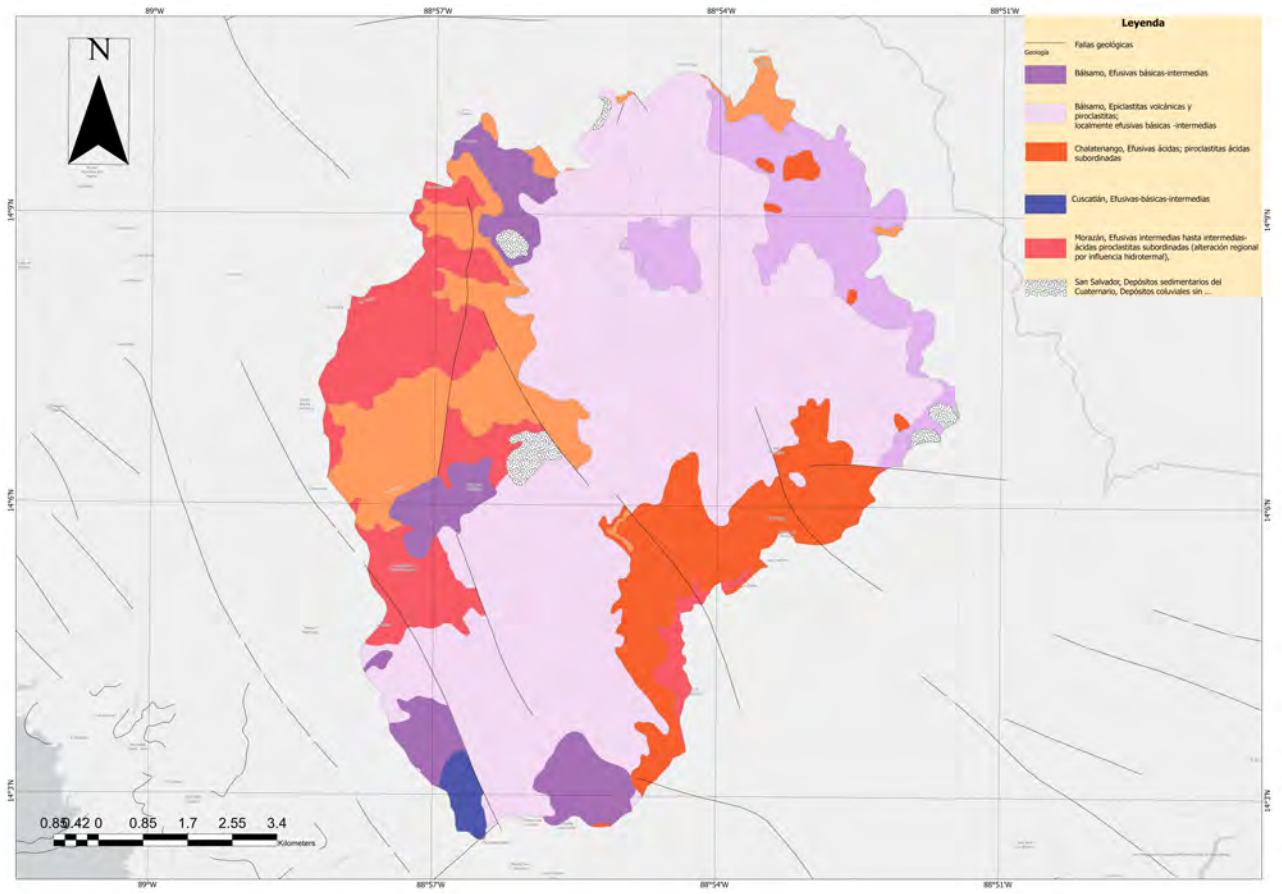

Figura 4.8: Geología de la Mancomunidad La Montañona.

4.1.6. Creación de mapas.

Posterior a la fase de recolección de datos, se distribuyó el análisis estadístico y geoespacial en dos fases, en primer lugar obteniendo los valores de los factores relacionados a los indicadores de susceptibilidad, y por último se obtuvieron los factores relacionados a los desencadenantes.

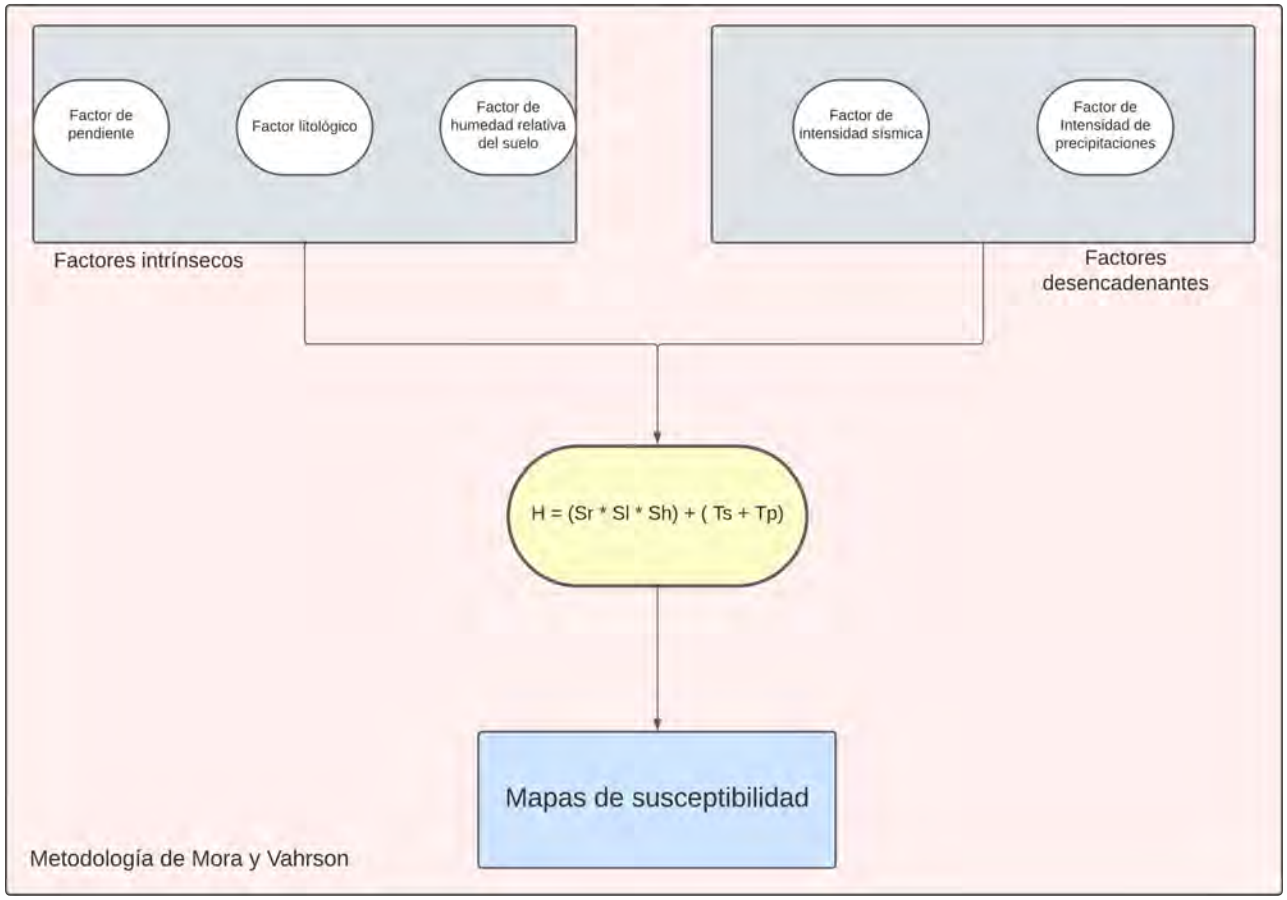

Figura 4.9: Flujo de trabajo utilizado para la creación de mapas de susceptibilidad.

4.1.6.1. Indicadores de Susceptibilidad.

Utilizando los datos obtenidos en las fuentes anteriormente mencionadas, se realizó el análisis correspondiente utilizando un Sistema de Información Geográfico, en el cual se unieron los valores de de pendiente, litología, sismicidad y precipitaciones a las celdas de las diferentes mallas de estudio utilizando una unión por ubicación, y posteriormente, utilizando como base las clasificaciones propuesta por la metodología para cada uno de los factores, se obtuvieron los distintos valores de los factores *Sr, Sl, Sh* para el sitio de estudio.

4.1.6.1.1 Factor de pendiente (Sr).

Malla $1km^2$.

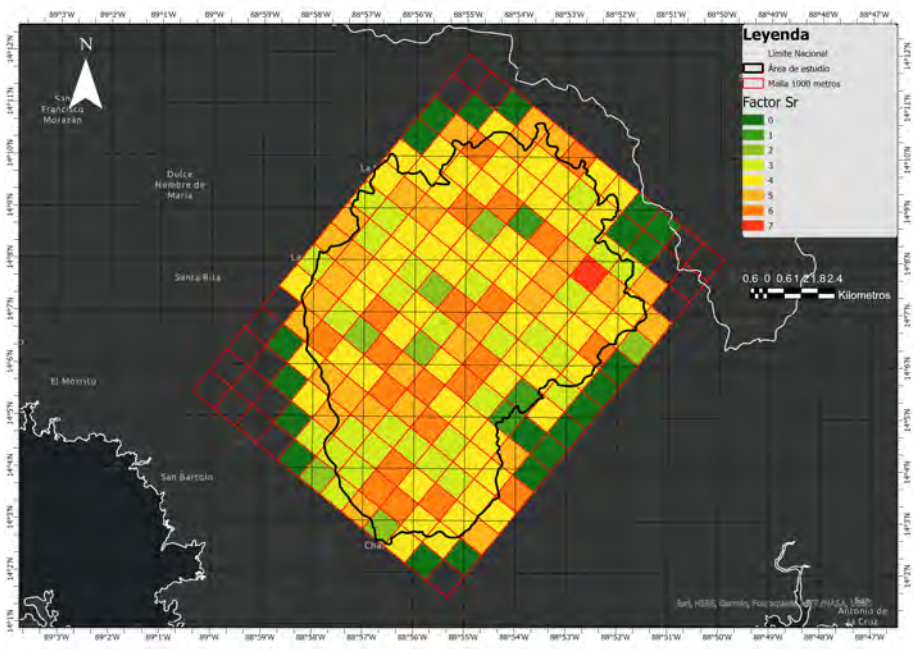

Figura 4.10: Distribución de factores Sr calculados en el sitio de estudio para malla de $1km^2$.

Malla $500m^2$

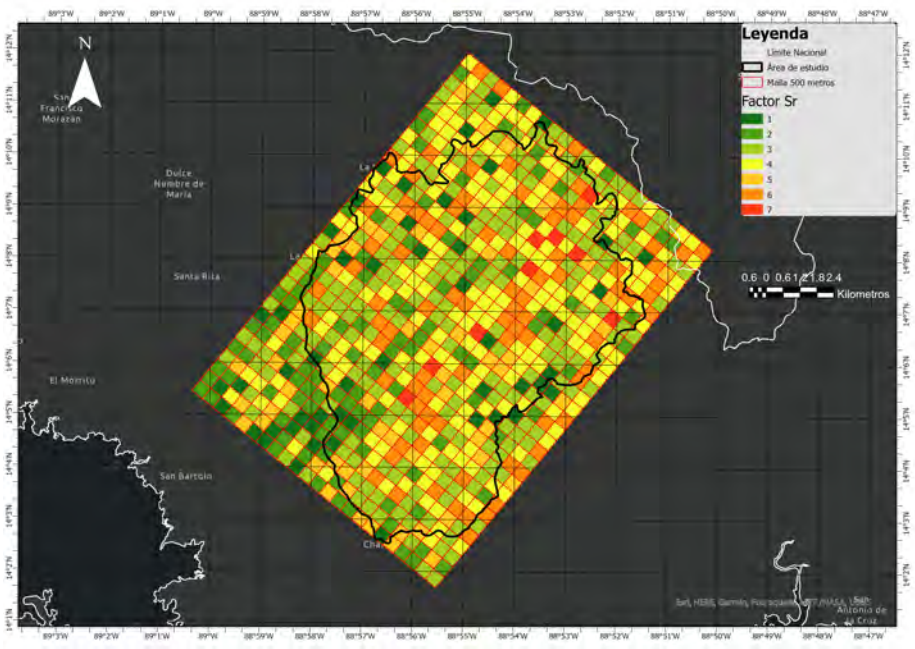

Figura 4.11: Distribución de factores Sr calculados en el sitio de estudio para malla de $500m^2$.

Malla $100m^2$

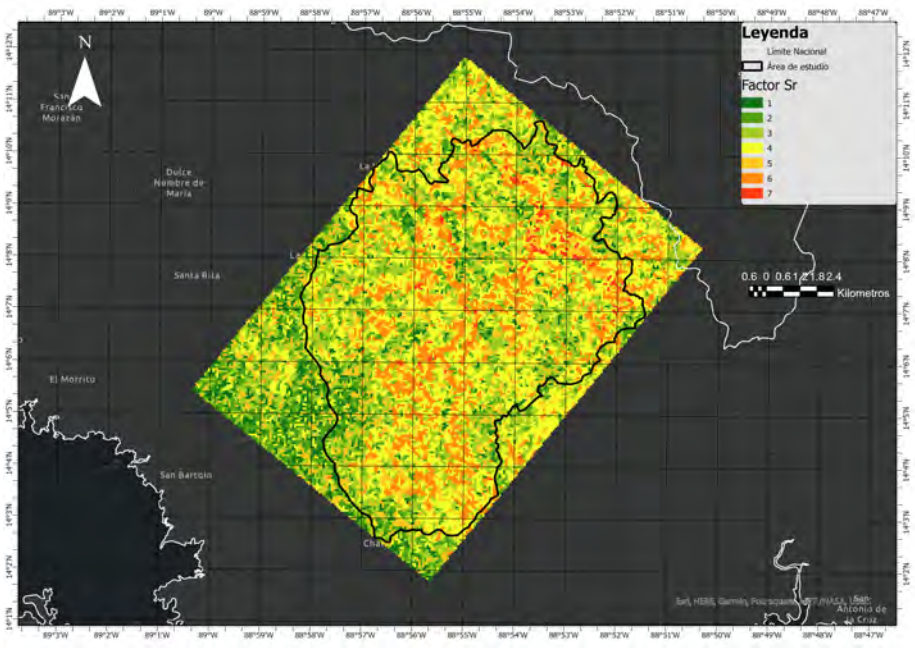

Figura 4.12: Distribución de factores Sr calculados en el sitio de estudio para malla de $100m^2$.

Puede observarse que los valores más altos, entre 3 y 5, se encuentra en la zona central y norte de la zona de estudio, esto concuerda con lo visto en el mapa topográfico y de pendiente, figuras 3.2 y 4.5 respectivamente, ya que es en estos sectores donde se concentra las elevaciones montañosas.

4.1.6.1.2 Factor litológico (*Sl*)

A partir de la información geológica obtenida del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica se analizaron cada una de las unidades geológicas presentes en el sitio de estudio utilizando la información disponible en las capas vectoriales, dándole valores de *Sl* a las unidades que, según la información, presenta mayor alteración, ya sea meteórica o hidrotermal.
Con esto, se obtuvo la siguiente distribución de valores *Sl* en el sitio.

Malla $1km^2$

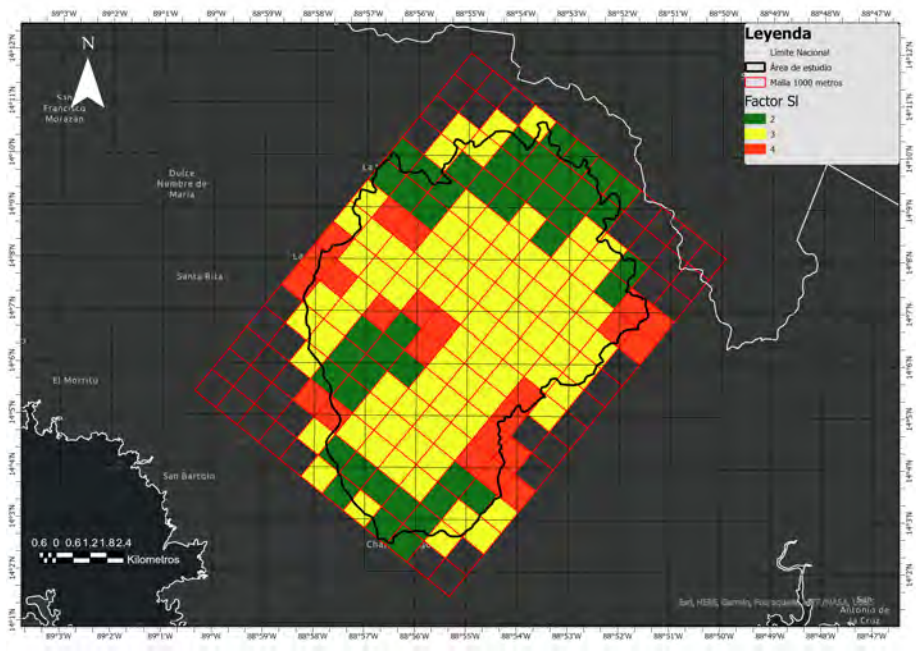

Figura 4.13: Distribución de factores Sl calculados en el sitio de estudio para malla de $1km^2$.

Malla $500m^2$

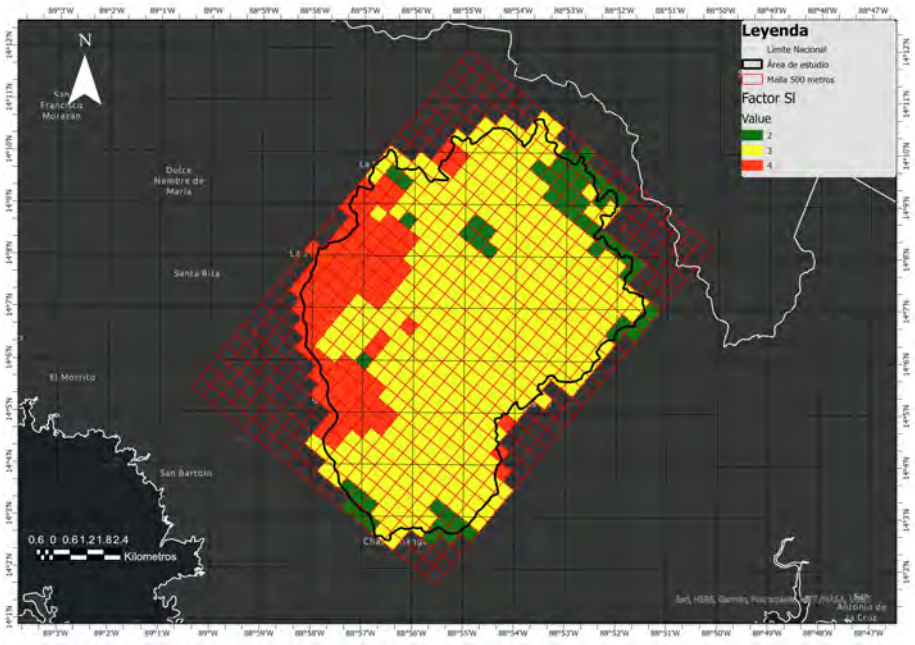

Figura 4.14: Distribución de factores Sl calculados en el sitio de estudio para malla de $500m^2$.

Malla $100m^2$

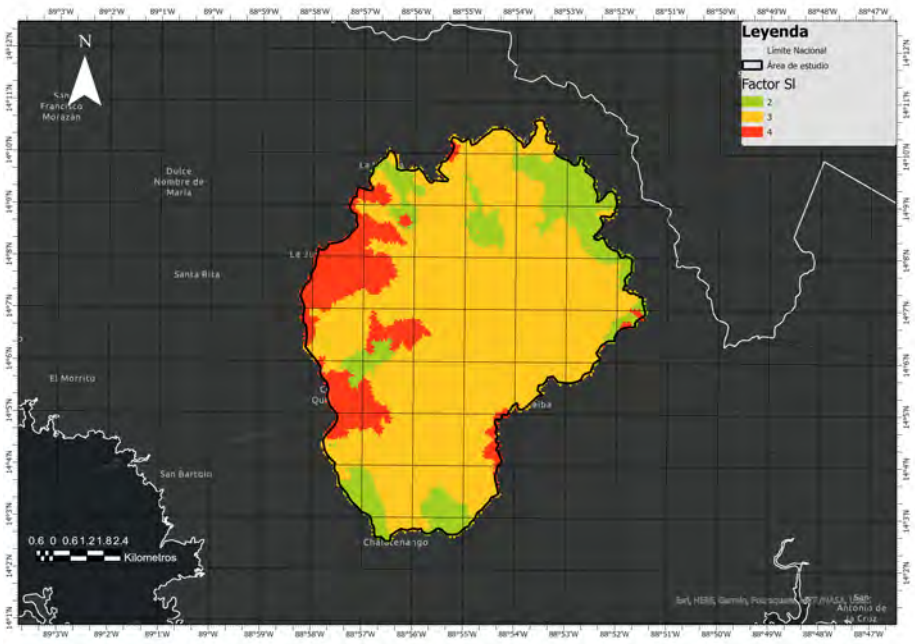

Figura 4.15: Distribución de factores Sl calculados en el sitio de estudio para malla de $100m^2$.

4.1.6.1.3 Factor de humedad relativa de suelo (*Sh*).

Utilizando los datos provistos por el *MARN* y la *NOAA* se realizó el análisis estadístico de los valores diarios de precipitación para el periodo 1970 - 2020, obteniéndose los valores promedio de precipitación para cada mes, valores que se ven reflejados en la siguiente tabla:

Tabla XIII: Precipitación promedio mensual periodo 1970 - 2020 ($\frac{mm}{mes}$). Elaboración propia en base a las estaciones obtenidas del MARN y NOAA

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Acajutla	0.16959184	0.0828	0.0438	0.291	0.305	0.4852	0.2936	0.396	0.7114	0.5996	0.1856	0.1288
Catacamas	0.0134	0.0132	0.0088	0.0142	0.0488	0.0892	0.0868	0.0766	0.0836	0.0626	0.028	0.0194
Choluteca	0.0014	0.003	0.0038	0.014	0.1184	0.1092	0.05	0.0888	0.1426	0.0968	0.0242	0.004
Concepción Quezaltepeque	0.09348387	0.12765271	0.40651613	2.01793333	6.50504516	9.00715556	7.18103226	7.489	9.37853333	5.62051613	1.02253333	0.16051613
Dulce Nombre de María	0.07477419	0.10315271	0.31892012	1.47633333	4.77449677	6.80534	5.58867742	5.60227419	6.93676667	3.35309677	0.7927	0.14845161
INSIVUMEH	0.0014	0.0024	0.005	0.0102	0.0376	0.0936	0.0702	0.0648	0.0944	0.0388	0.0056	0.0028
La Laguna	0.001	0.0946	0.1198	0.52	1.682	2.768	2.2476	2.4036	3.4998	2.2674	0.2796	0.02408163
La Unión	0.0016	0	0.0028	0.0116	0.0808	0.1028	0.0728	0.088	0.1494	0.0838	0.014	0.0026
La Mesa	0.1912	0.3596	0.3218	0.0396	0.343	0.2486	0.5434	0.3092	0.7762	0.4036	0.5294	0.5188
Ojos de Agua	0.01890323	0.00940887	0.13116129	0.60313333	1.65180645	2.66646667	1.59348387	2.09703226	2.8104	0.91116129	0.3132	0.01064516
Paraíso	0.08522581	0.10430296	0.276	1.63273333	4.92690323	7.1815	4.99896774	6.25695484	7.12751111	3.69890323	0.95233333	0.09974194
Las Pilas	0	0.10204082	0.18	0.76	3.22	4.5	3.14	3.62	4.84	2.44	0.76	0.04081633
San Salvador	0.04959184	0.0018	0.1186	0.172	0.2096	0.4082	0.2374	0.4358	0.3118	0.2634	0.101	0.0422
Tegucigalpa	0.0224	0.0052	0.0224	0.0508	0.1852	0.1994	0.0706	0.1612	0.1698	0.142	0.0718	0.0236

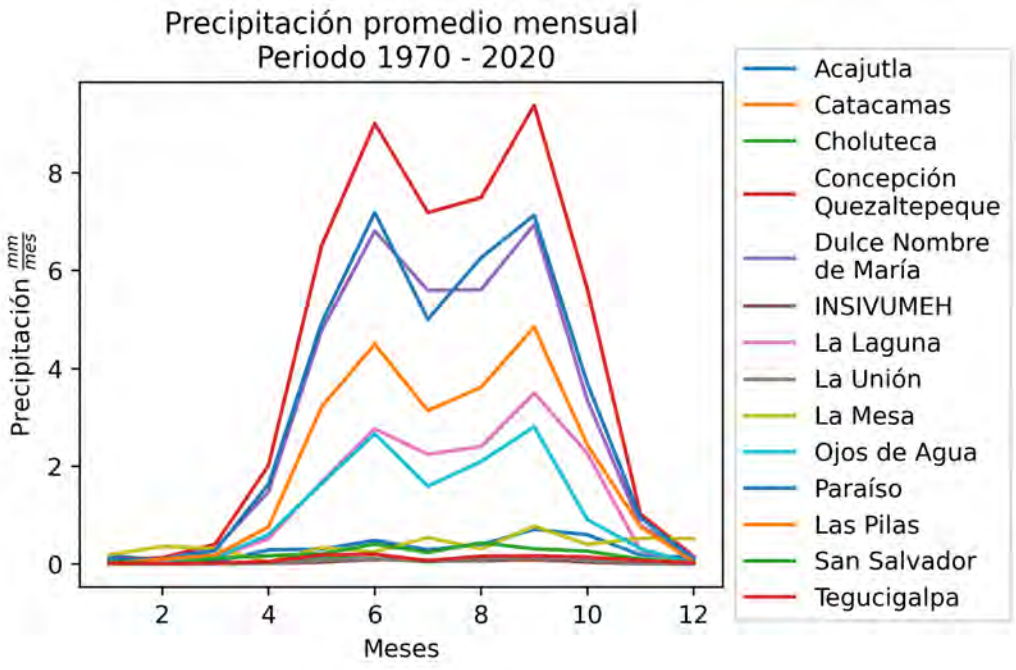

Figura 4.16: Distribución temporal de promedio de precipitación mensual.

Dado que todos los valores se encuentran por debajo del rango de los 125 $\frac{mm}{mes}$ mostrados en la tabla VI, con esto, y siguiendo la clasificación provista en la tabla VII, se obtiene el siguiente valor de factor Sh para todas las estaciones.

Es importante recalcar que la interpolación fue realizada utilizando el método Inverse Distance Weighting (IDW), el cual es una técnica determinista utilizada para interpolar un conjunto multivariado de puntos distribuidos conocidos. Se utiliza un promedio ponderado de los valores presentes en los puntos conocidos para determinar los valores asignados a los puntos desconocidos, expuesto así según Li et al. (2018). De esta manera se le da mayor representatividad a las estaciones que se encuentran en las cercanias de la zona de estudio.

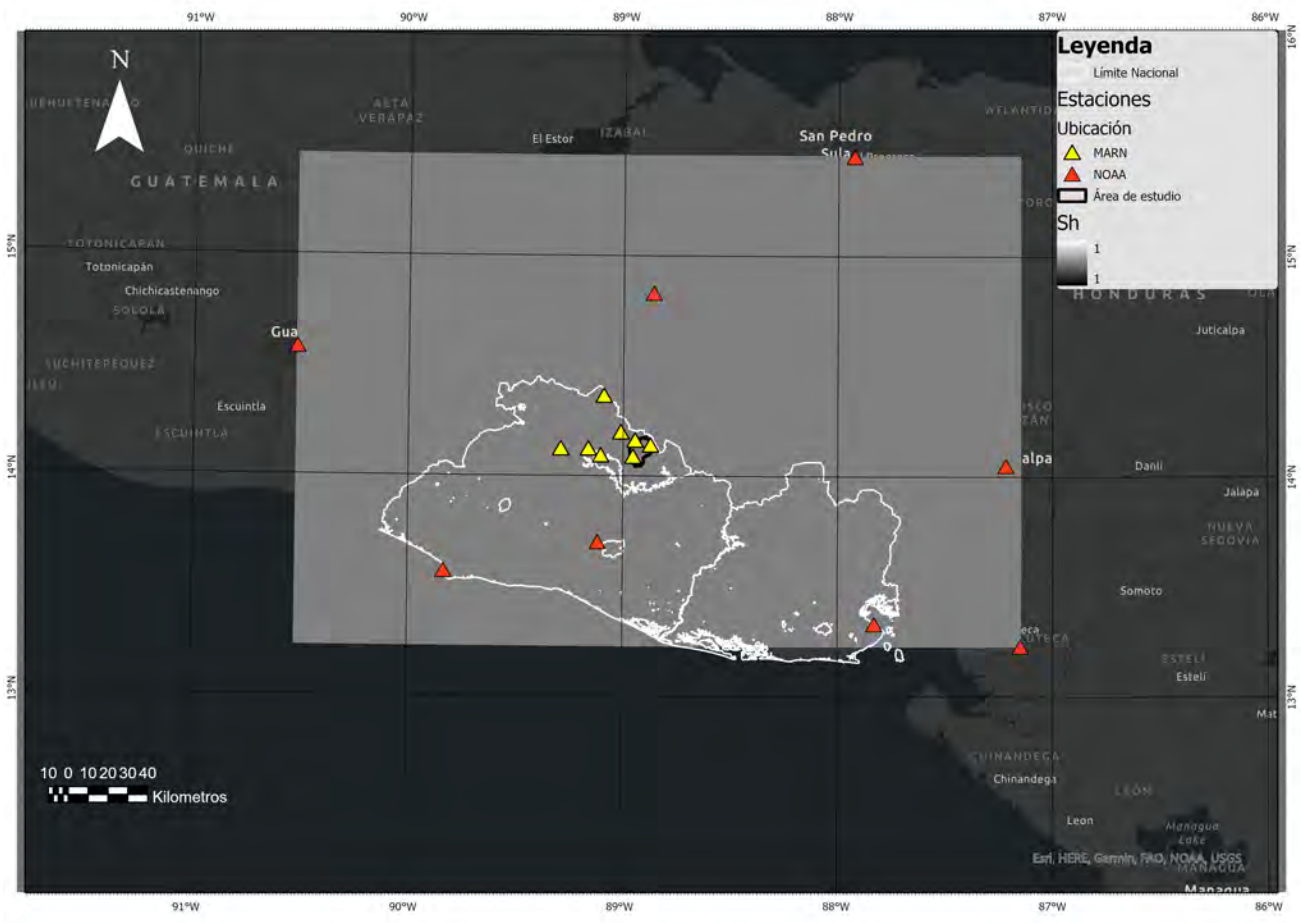

Figura 4.17: Valor de factor Sh obtenido en la interpolación.

Y haciendo un recorte, podemos obtener el valor del factor *Sh* para nuestro sitio de estudio:

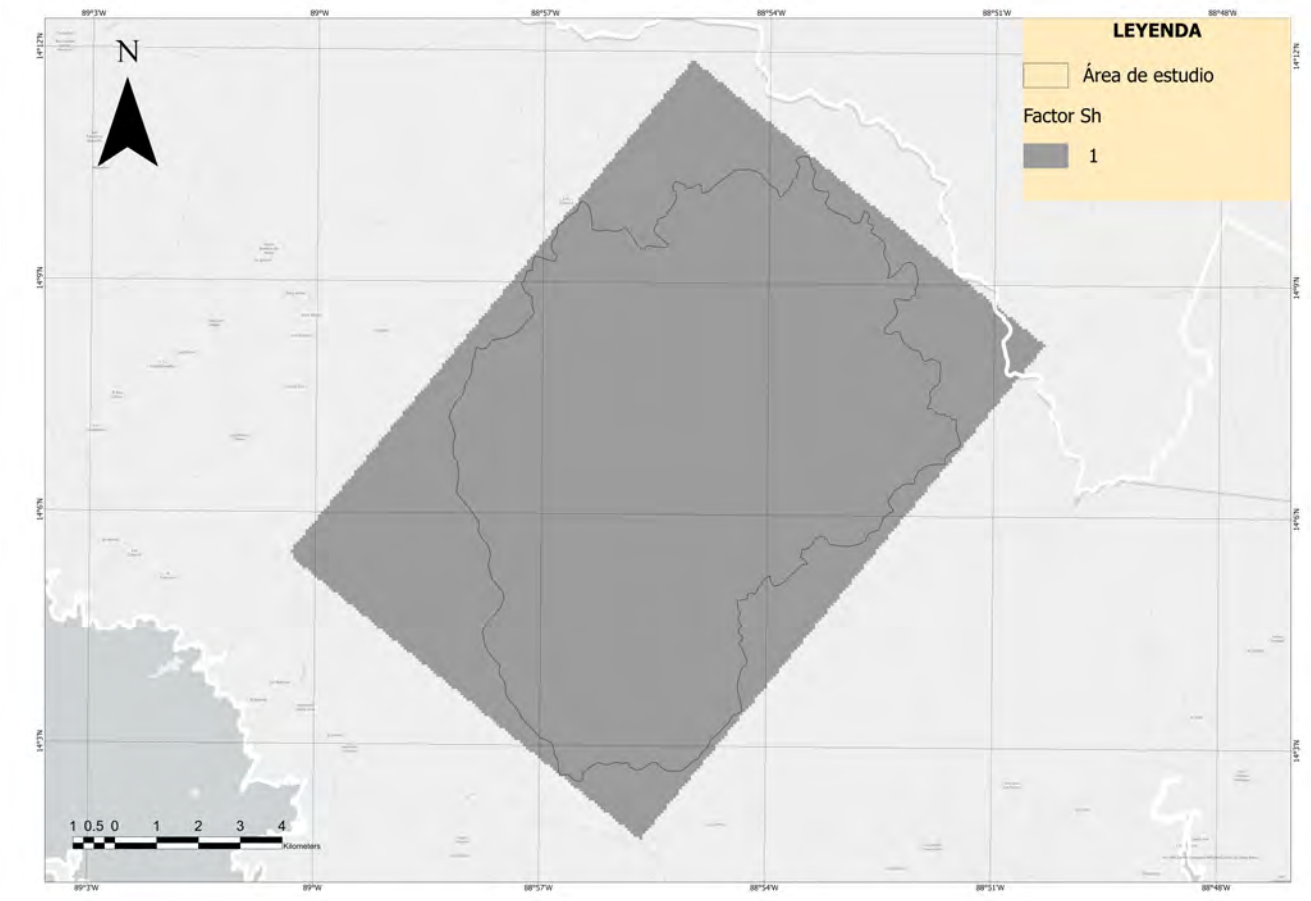

Figura 4.18: Factor *Sh* calculado para el área de estudio.

4.1.6.2. Factores desencadenantes (*Trig*).

De igual manera que con los factores intrínsecos, obtenidos los datos se procedió a realizar un análisis estadístico y geoespacial en base a lo necesitado por cada uno de los factores, tanto para el factor *Ts* como para el *Tp*.

4.1.6.2.1 Factor de Intensidad Sísmica (*Ts*).

Realizando una investigación en el repositorio de sismos registrados del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), se realizó una investigación de todos los sismos registrados en el periodo 2000 - 2021, obteniéndose un total de 5,185 registros, los cuales se muestran en el siguiente mapa.

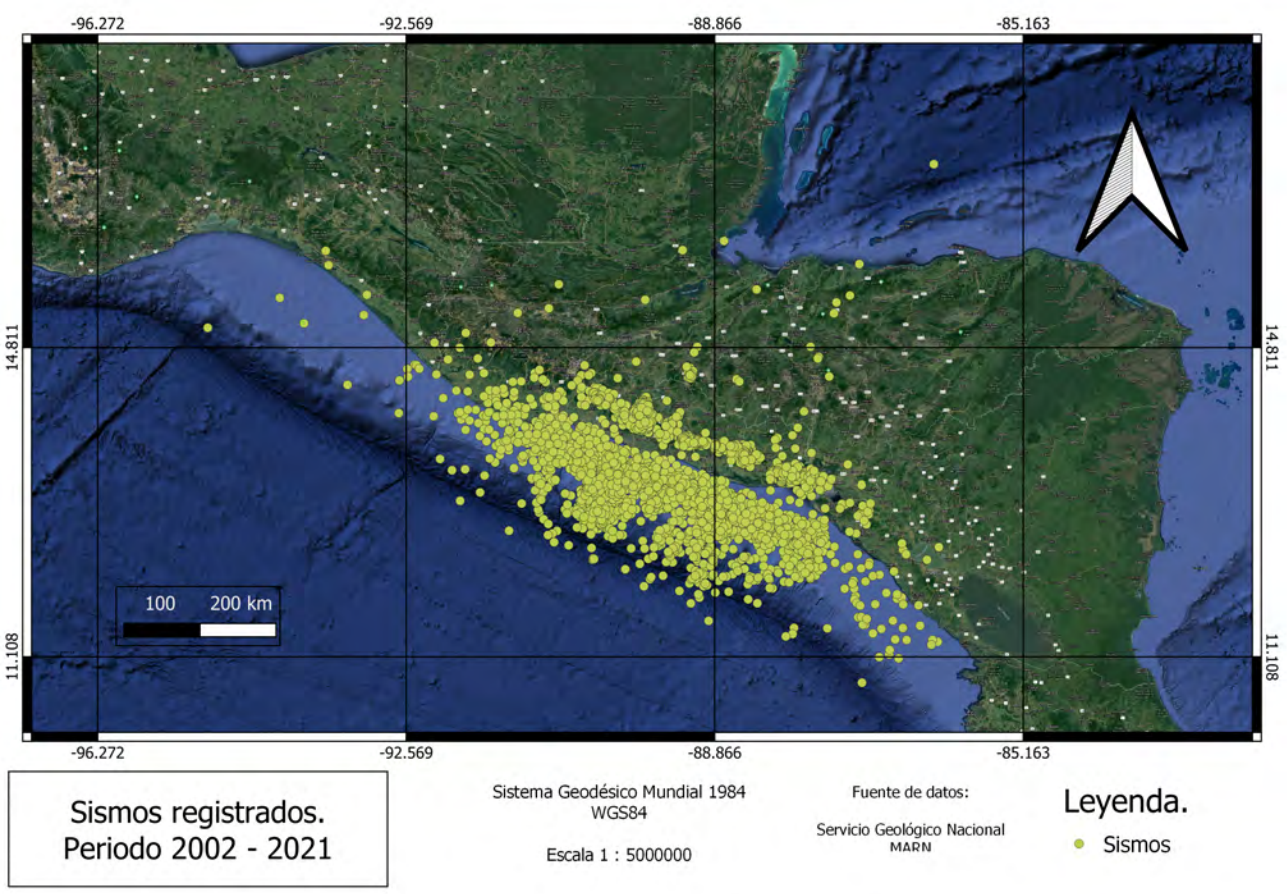

Figura 4.19: Distribución de sismos registrados para el periodo 2000 - 2021.

A partir de esta información, se seleccionaron los sismos que tuvieron una intensidad en escala Mercalli Modificada registrada o perceptible en Chalatenango, esto debido a que estos sismos son los que pueden tener alguna influencia sobre la ocurrencia de deslizamientos en la zona de estudio. A partir de este análisis, de 5,186 registros de sismos, se obtuvieron 16 registros de sismos con intensidades perceptibles en Chalatenango.

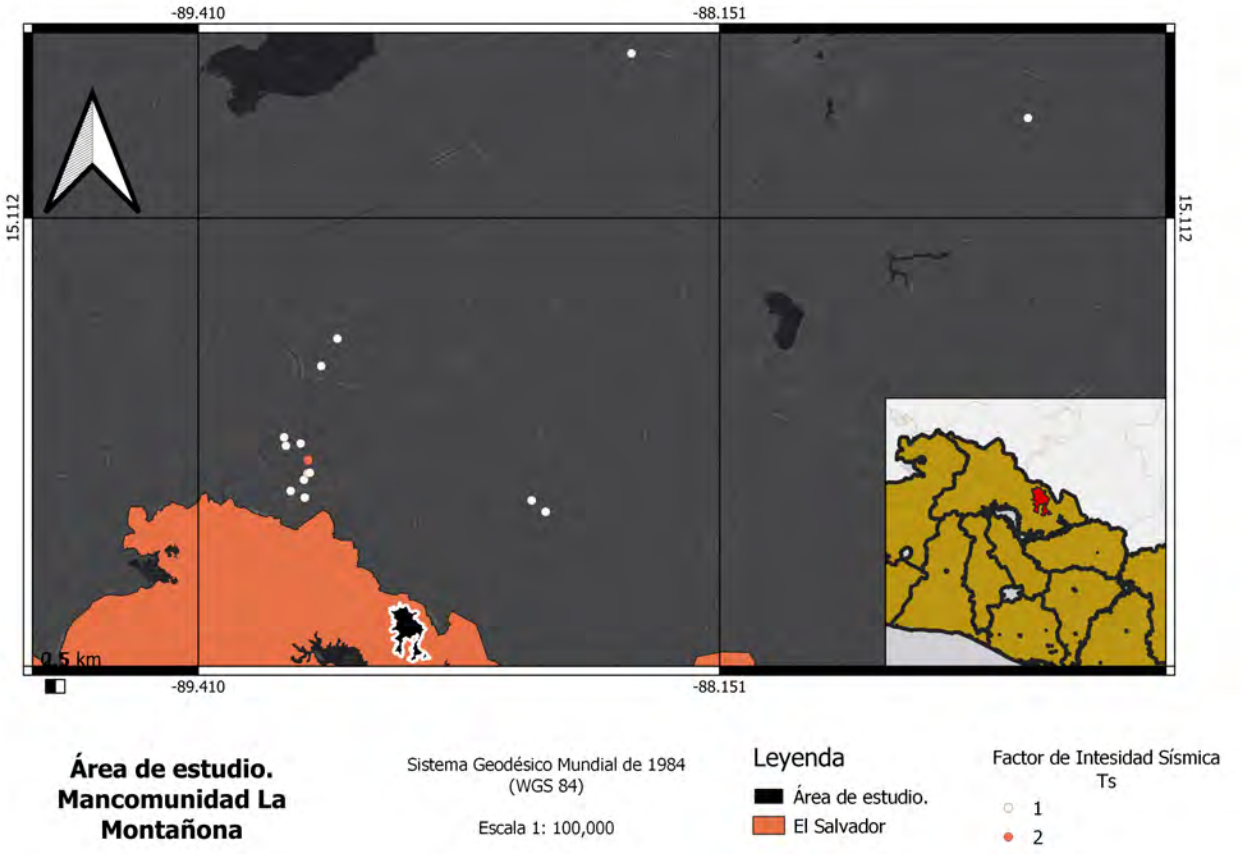

Figura 4.20: Sismos con intensidad perceptible en el sitio de estudio.

Considerando la limitada cantidad de datos disponibles, se utilizó la información de Aceleraciones Pico del Suelo (PGA por sus siglas en inglés) para cuantificar el efecto que tienen los sismos como agente desestabilizador en la zona de estudio.

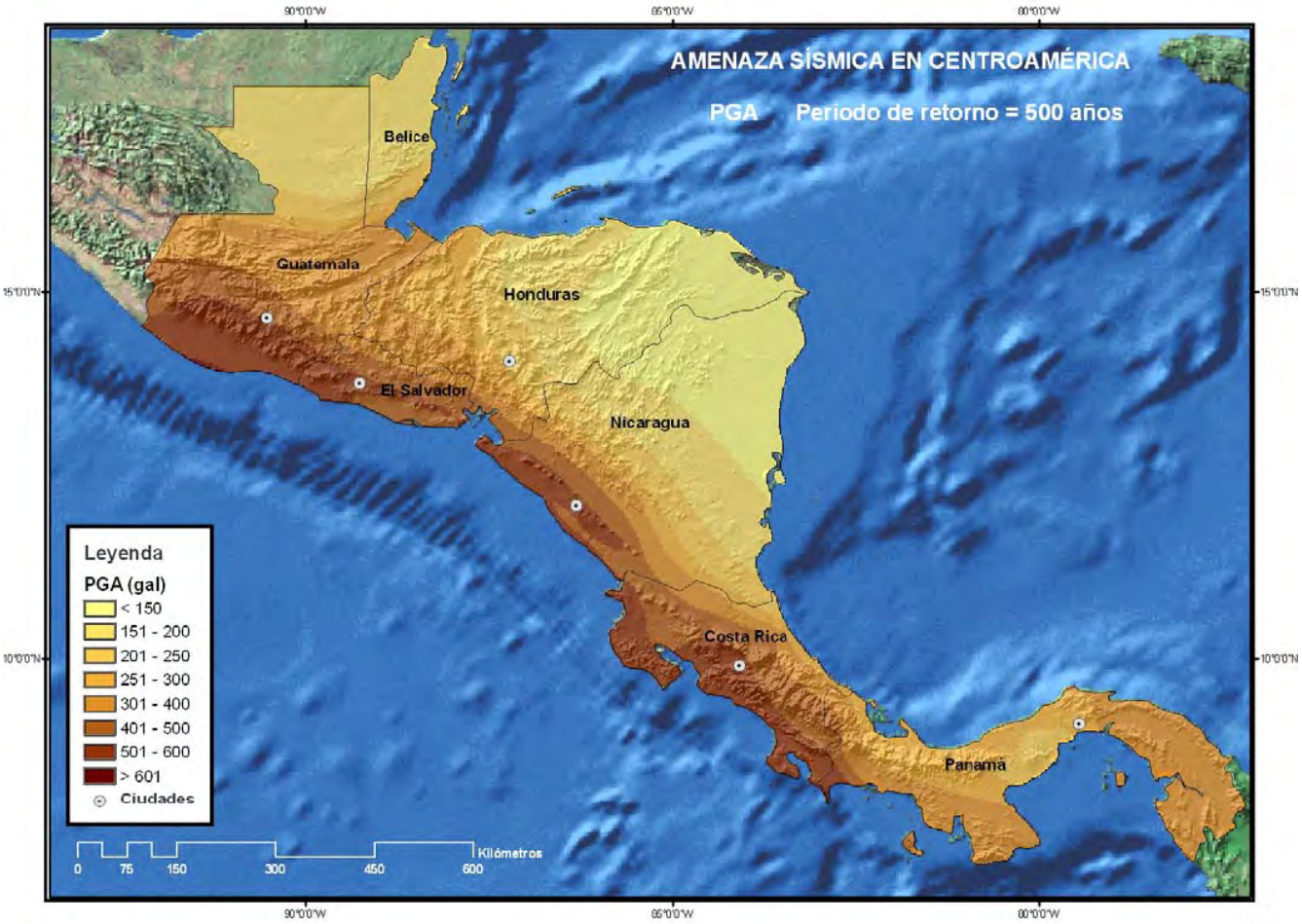

Figura 4.21: Mapa de Aceleración Máxima del Suelo. Obtenido de Molina et al. (2018)

En la imagen 4.21 es posible observar la distribución espacial de los valores de aceleración máxima del suelo. La zona norte de El Salvador, donde se encuentra el sitio de estudio, se caracteriza por tener valores de PGA bajos en comparación con el resto del territorio nacional, cuyos valores rondan los 251 - 300 gal ($\frac{cm}{s^2}$), para obtener estos valores, se georreferenció el mapa de la figura 4.21 y se ubicó el sitio de estudio para determinar el valor de PGA de la zona, obteniéndose:

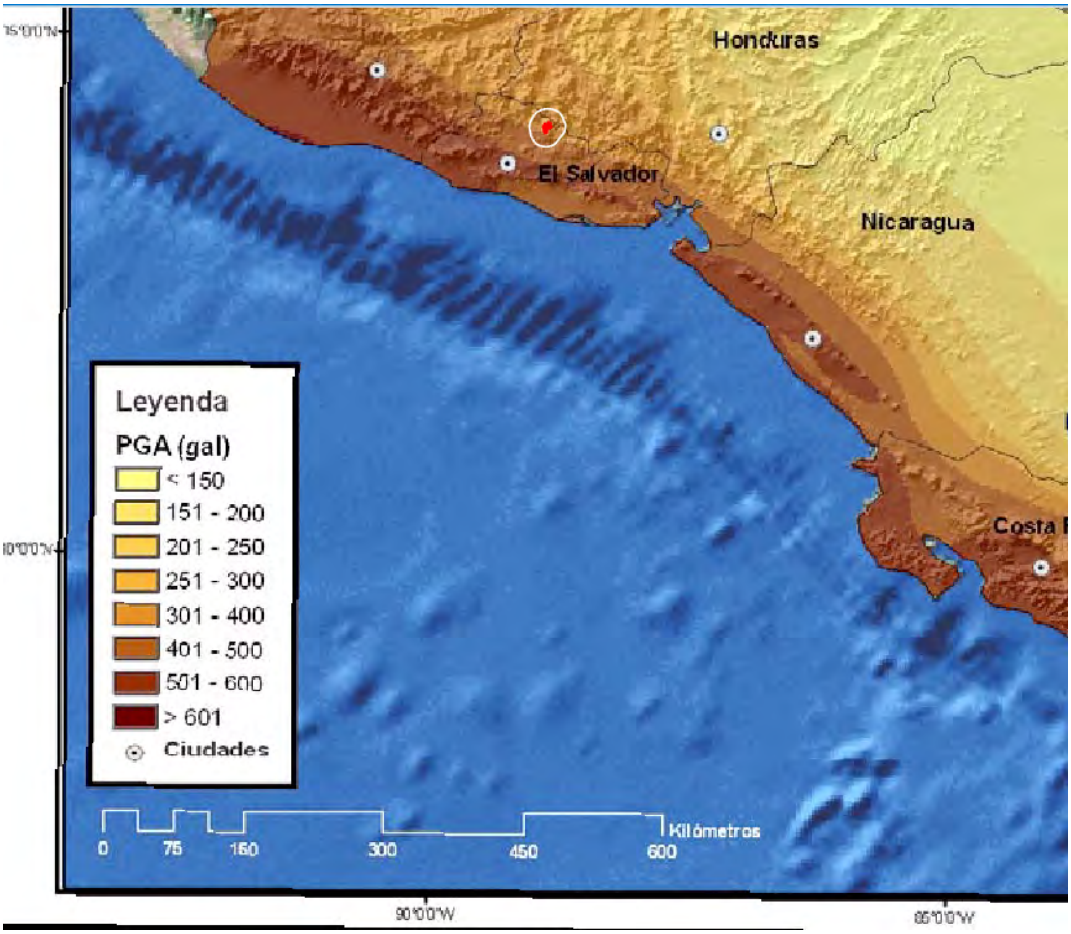

Figura 4.22: Valores de PGA para el área de estudio (En rojo rodeado por círculo blanco).

A partir de este valor de PGA, y considerando la clasificación propuesta por Mora (1992) en la tabla VIII, se asignó un valor de 3 al factor de intensidad sísmica (Ts), de esta manera, se considera un efecto de la sismicidad sobre la zona de estudio pero siendo este un efecto bajo, concordando con los valores de PGA del sitio.

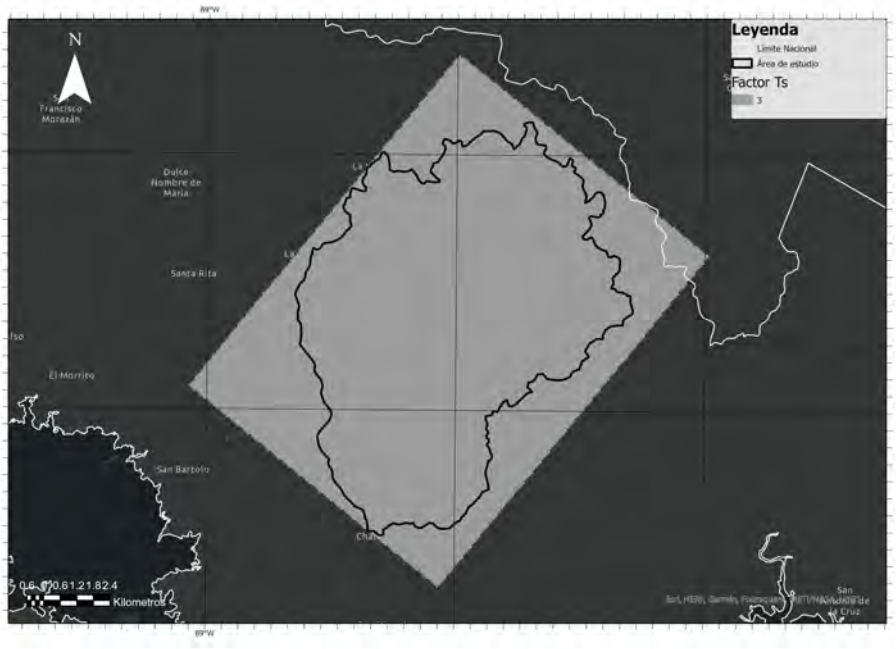

Figura 4.23: Valores de factor Ts.

4.1.6.2.2 Factor de Intensidad de precipitaciones (Sh)

A partir de los datos meteorológicos se realizó un análisis estadístico para obtener el Factor Sh. En primer lugar, se obtuvieron los valores máximos anuales de cada una de las estaciones, a partir de esto, se aplicó el método de Gumbel para calcular el valor máximo de precipitaciones para lluvias intensas con un periodo de retorno de 100 años.

$$X = \bar{X} + KS_n \tag{4.4}$$

Donde:

- $\bar{X}$ es la media de la muestra de intensidad de precipitación.
- S_n es la desviación de la muestra.
- K es el factor de frecuencia, que a su vez puede expresarse como:

$$K = \frac{Y - Y_n}{S_n} \tag{4.5}$$

A partir de esto, fue posible obtener los valores de intensidad de precipitación máxima para un periodo de retorno de 100 años.

Tabla XIV: Valores máximos de precipitación para un periodo de retorno de 100 años, calculados a partir del método de Gumbel. Elaboración propia en base a los datos de precipitación de las estaciones provistas por el MARN y la NOAA

Nombre	**Desviación estandar**	**Precipitación máxima (Tr = 100 años)**
Acajutla	5.41	29.10
Catacamas	1.26	6.62
Choluteca	2.45	12.67
Concepción Quezaltepeque	40.28	205.24
Dulce Nombre de María	36.74	185.25
INSIVUMEH	1.38	7.16
La Laguna	50.33	255.64
La Union	2.72	14.08
Las Palmas	54.03	292.02
Las Pilas	49.37	264.49
Mesa	6.40	36.05
Nueva Concepcion	44.03	238.04
Ojos Agua	41.12	209.67
Paraiso	45.83	232.36
San Salvador	2.47	14.7009370000000
Tegucigalpa	2.80	15.54

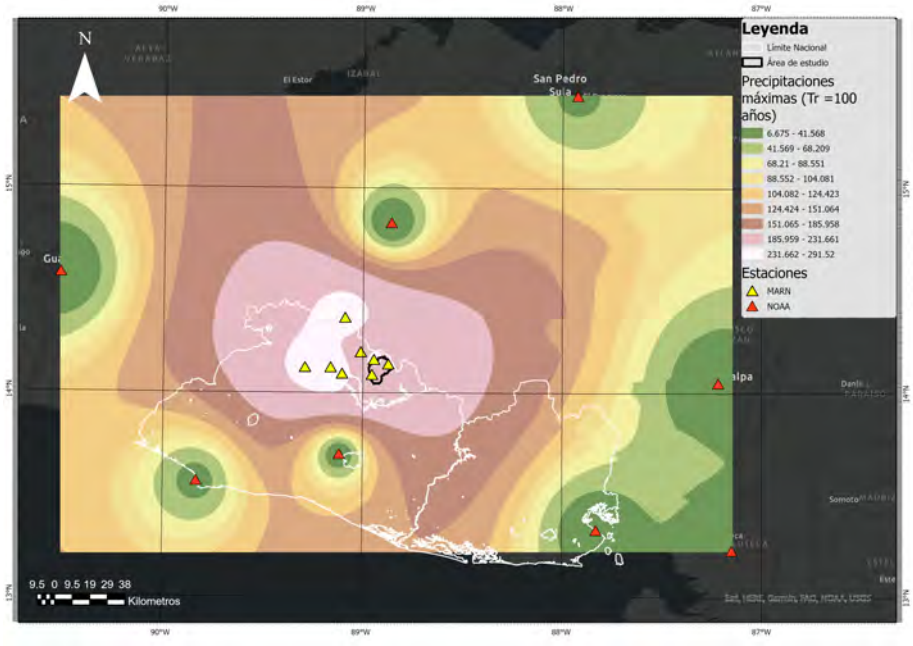

Figura 4.24: Distribución espacial de intensidades máximas de precipitación (Tr = 100 años).

Haciendo uso de la clasificación mostrada en la tabla IX, se obtuvieron los valores del factor Ts para toda la región cubierta por la interpolación.

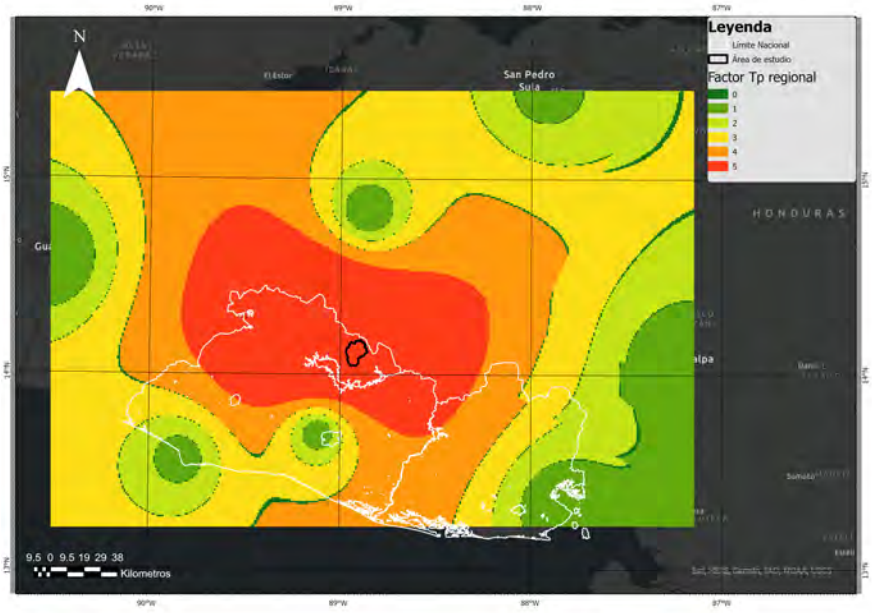

Figura 4.25: Valores de factor Tp obtenidos para la interpolación.

A partir de esto, se realizó un corte en el raster para analizar únicamente la zona de estudio, obteniéndose el valor de factor Tp a utilizar en el análisis.

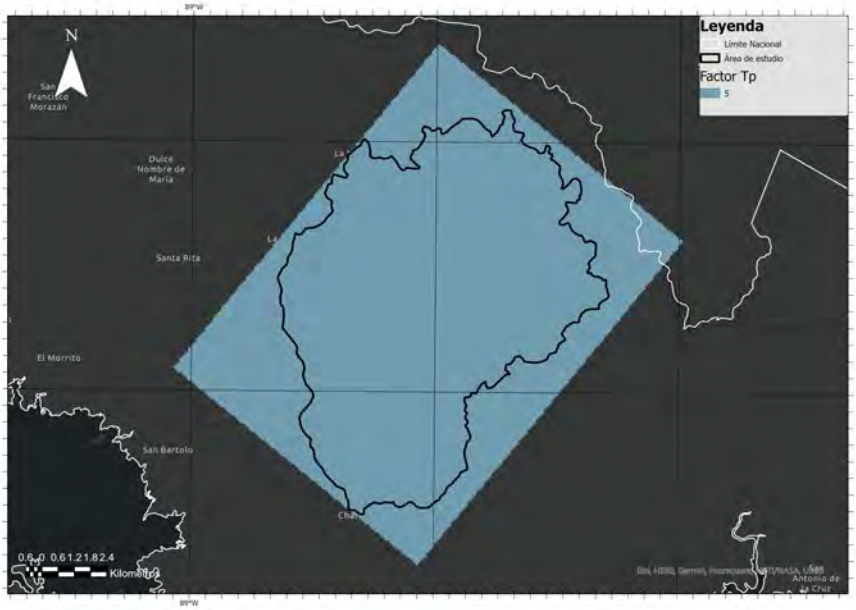

Figura 4.26: Valor de factor Tp

4.1.6.3. Mapas de susceptibilidad.

A partir de los análisis anteriormente mencionados, se calcularon os mapas de susceptibilidad a deslizamiento en las 3 resoluciones escogidas, obteniéndose:

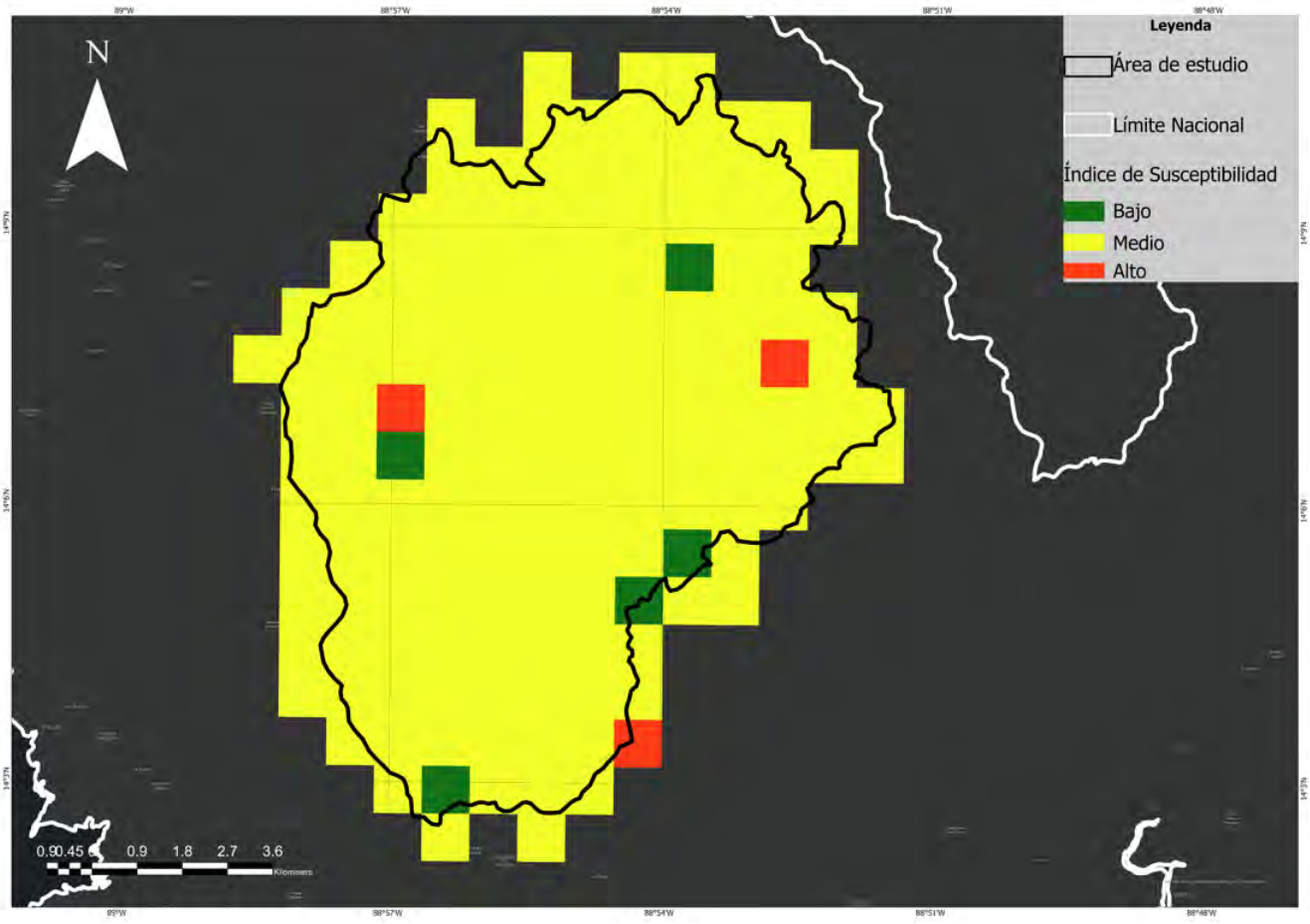

Figura 4.27: Mapa de susceptibilidad a deslizamientos con malla de 1 km^2 a escala 1:50,000

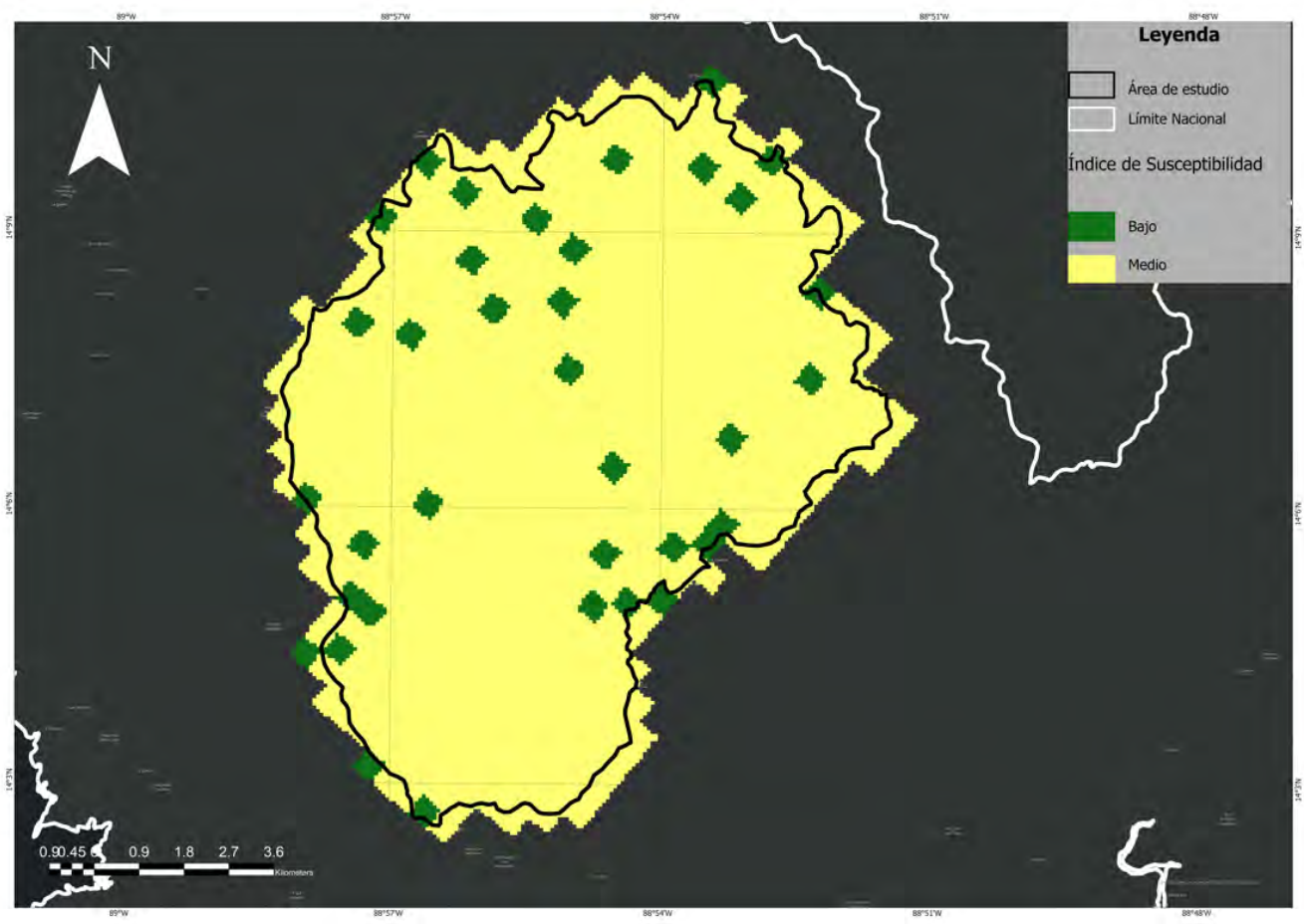

Figura 4.28: Mapa de susceptibilidad a deslizamientos con malla de 500 m^2 a escala 1:50,000

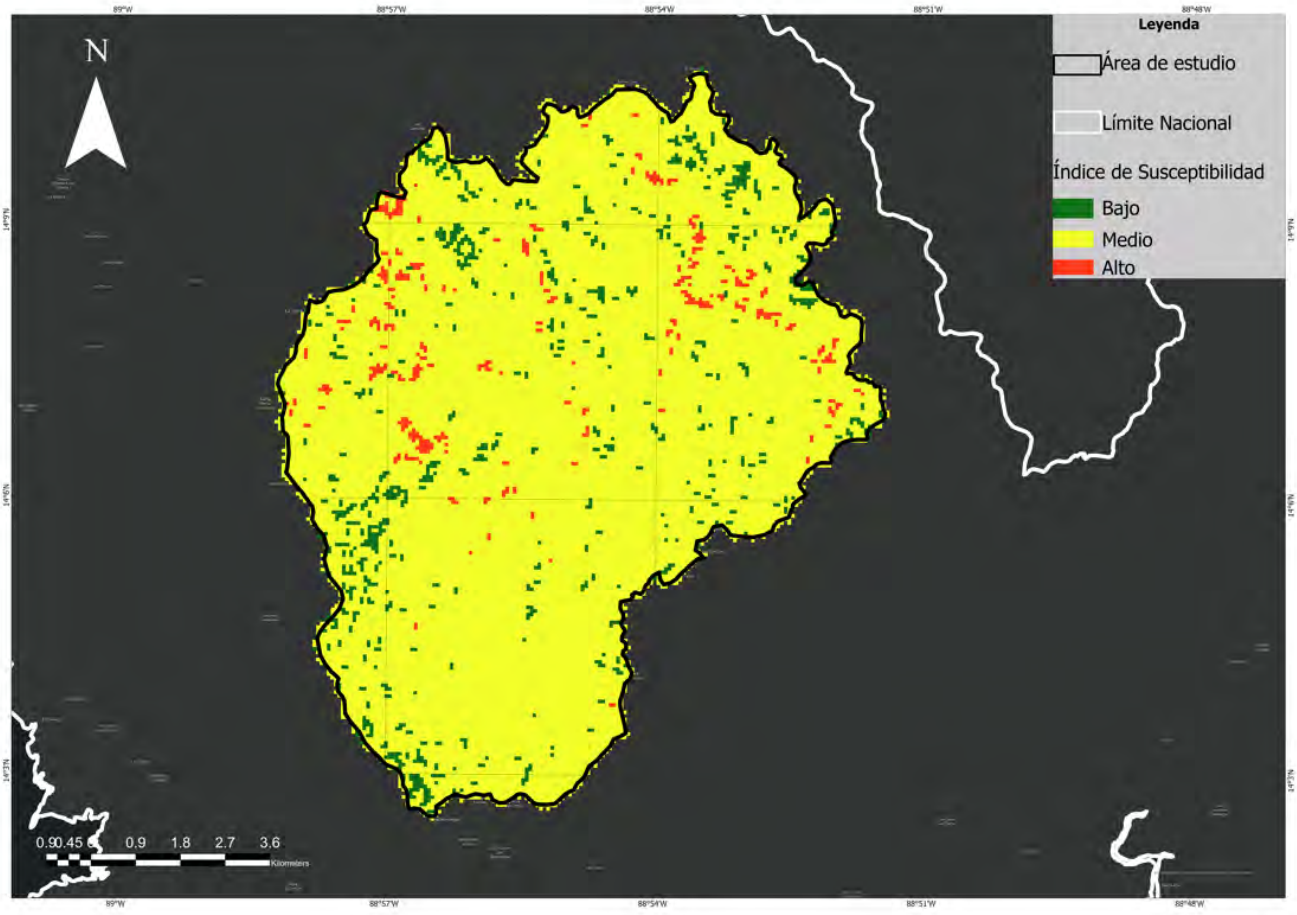

Figura 4.29: Mapa de susceptibilidad a deslizamientos con malla de 100 m^2 a escala 1:50,000

4.2. Método de índices normalizados.

El método del índice normalizado de deslizamientos de tierra (NLI), elaborado por Posner (2015), es una herramienta que se usa regularmente para crear mapas de susceptibilidad a deslizamientos de tierra. Este método implica calcular un valor de índice de deslizamiento de tierra para cada píxel en la región de investigación utilizando una serie de variables, que incluyen topografía, geología, uso de la tierra y lluvia. Valores más altos del NLI, un índice adimensional que va de 0 a 1, indican una mayor sensibilidad a los deslizamientos.

El método NLI ha sido utilizado en El Salvador a partir de la evaluación de distintos factores. Estos incluyen la geografía, que se distingue por las pendientes pronunciadas y el terreno accidentado de la nación; la geología, que se compone predominantemente de materiales volcánicos y sedimentarios em menor medida; y el clima, que se distingue por una estación húmeda de mayo a octubre y una estación seca de noviembre a abril.

Es necesario recopilar y procesar varias capas de datos para calcular el NLI. Estos consisten en información sobre precipitaciones, mapas geológicos, modelos digitales de elevación (DEM) y mapas de uso del suelo. A cada uno de estos estratos se le asigna un peso en función de la importancia del papel que desempeña en el desencadenamiento de deslizamientos de tierra. Como la topografía es un componente importante en la vulnerabilidad a los deslizamientos de tierra, se le puede dar mayor importancia al gradiente de la pendiente y al aspecto del DEM que al mapa de uso del suelo.

El NLI se puede determinar utilizando una fórmula que combina los diversos elementos una vez que se han asignado los pesos. Posteriormente, la capa ráster NLI resultante se puede dividir en varios grupos de susceptibilidad a deslizamientos de tierra, como baja, moderada y alta.

El mapa final de susceptibilidad a deslizamientos de tierra se puede aplicar a una variedad de propósitos, incluida la planificación del uso futuro de la tierra, la reducción del riesgo de desastres y la respuesta a emergencias. Los mapas de susceptibilidad a deslizamientos, debe recordarse, no son indicadores infalibles de la ocurrencia de un deslizamientos, y siempre se debe usarse como una guía a la hora de evaluar áreas de alto riesgo, lo hace a partir de la ecuación:

$$W_i = \ln\left(\frac{\text{Lanslide Class Density}}{\text{Lanslide Map Density}}\right) = ln(\frac{\frac{N_{pix}(S_i)}{N_{pix}(N_i)}}{\frac{\Sigma N_{pix}(S_i)}{\Sigma N_{pix}(N_i)}}) \tag{4.6}$$

4.3. Validación de mapas de susceptibilidad.

A manera de validación de los resultados obtenidos siguiendo la metodología de Mora y Vahrson, se propone realizar la comparación de estos resultados con los resultados obtenidos por Posner (2015) en su trabajo *"Normalized Landslide Index Method for Susceptibility map development in El Salvador"*, en el cual, a través de distintos factores de evaluación como lo son la pendiente, el uso de tierra, la litología y la curvatura del perfil, entre otros, y a través de la ponderación de estos factores a través de una matriz, permite evaluar el nivel de susceptibilidad del terreno con un enfoque más estadístico.

Dado que esta metodología fue realizada utilizando un modelo de elevación digital de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), con una resolución espacial de 30 metros, se procedió a crear un nuevo mapa de susceptibilidad a deslizamiento con Mora y Vahrson utilizando una malla de 30 m^2. Una vez obtenido esto, se hizo un conteo de pixeles de cada uno de los mapas y comparando los valores obtenidos entre ambas metodologías.

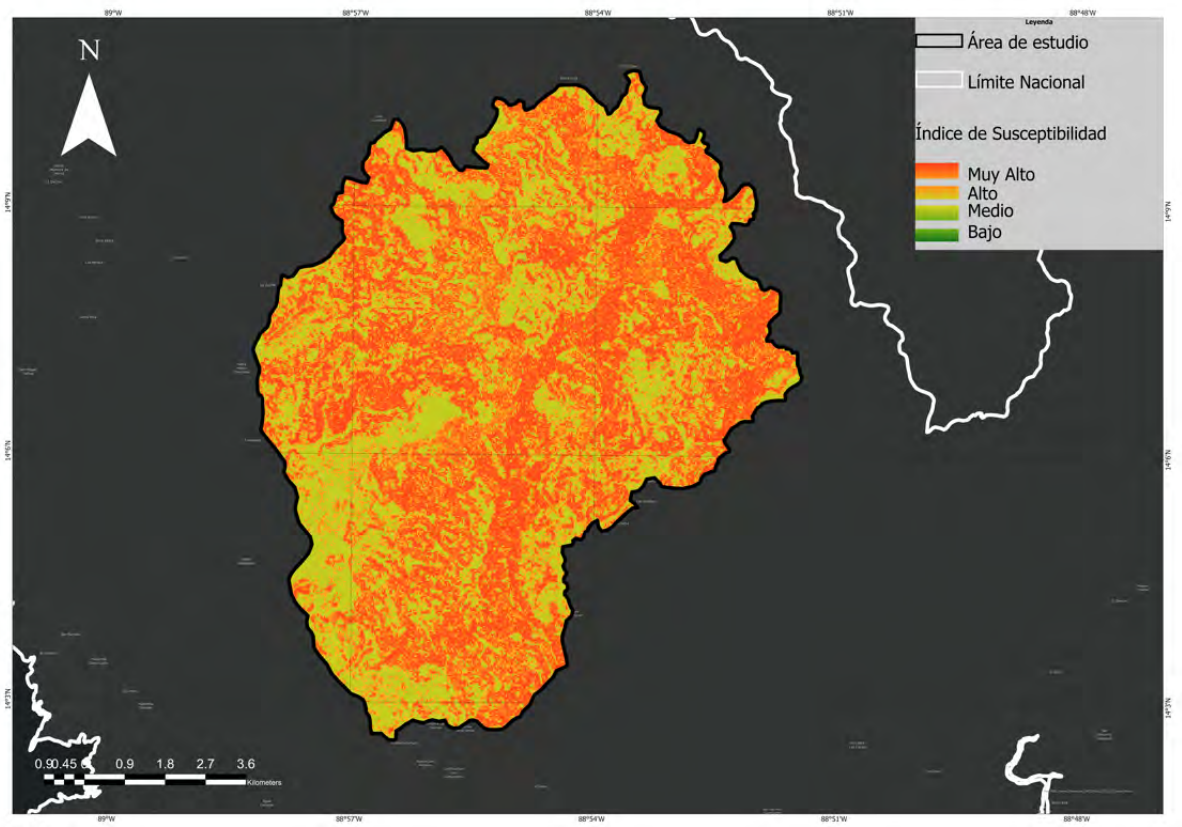

Figura 4.30: Mapa de Susceptibilidad aplicando metodología de índice normalizado. Adaptado de Posner (2015)

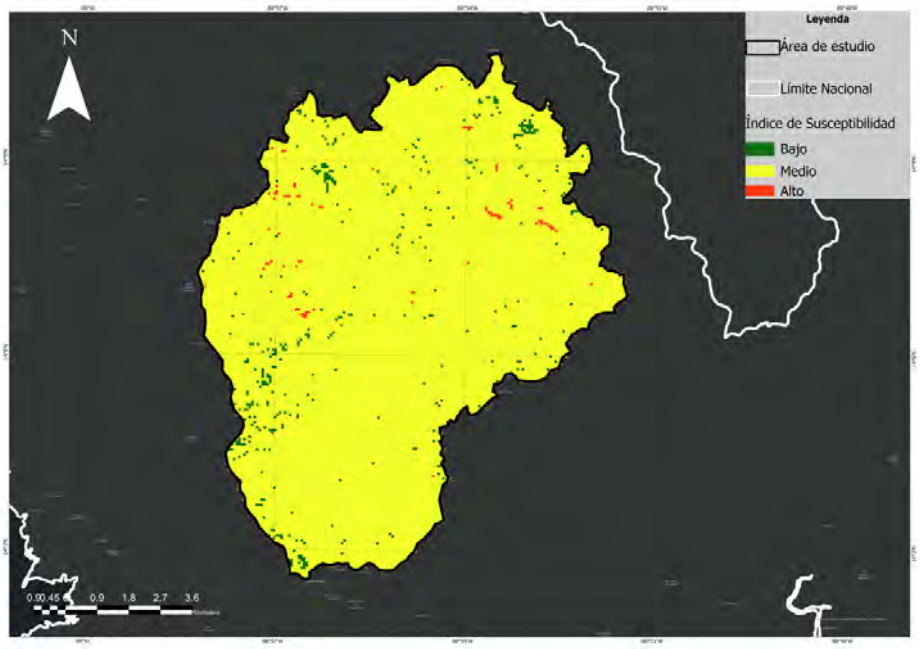

Figura 4.31: Mapa de Susceptibilidad aplicando Mora y Vahrson (1994) con malla de 30 m^2

Con estos datos, se realizó el conteo de los píxeles que corresponden a cada uno de los niveles de susceptibilidad, dando como resultado el siguiente gráfico:

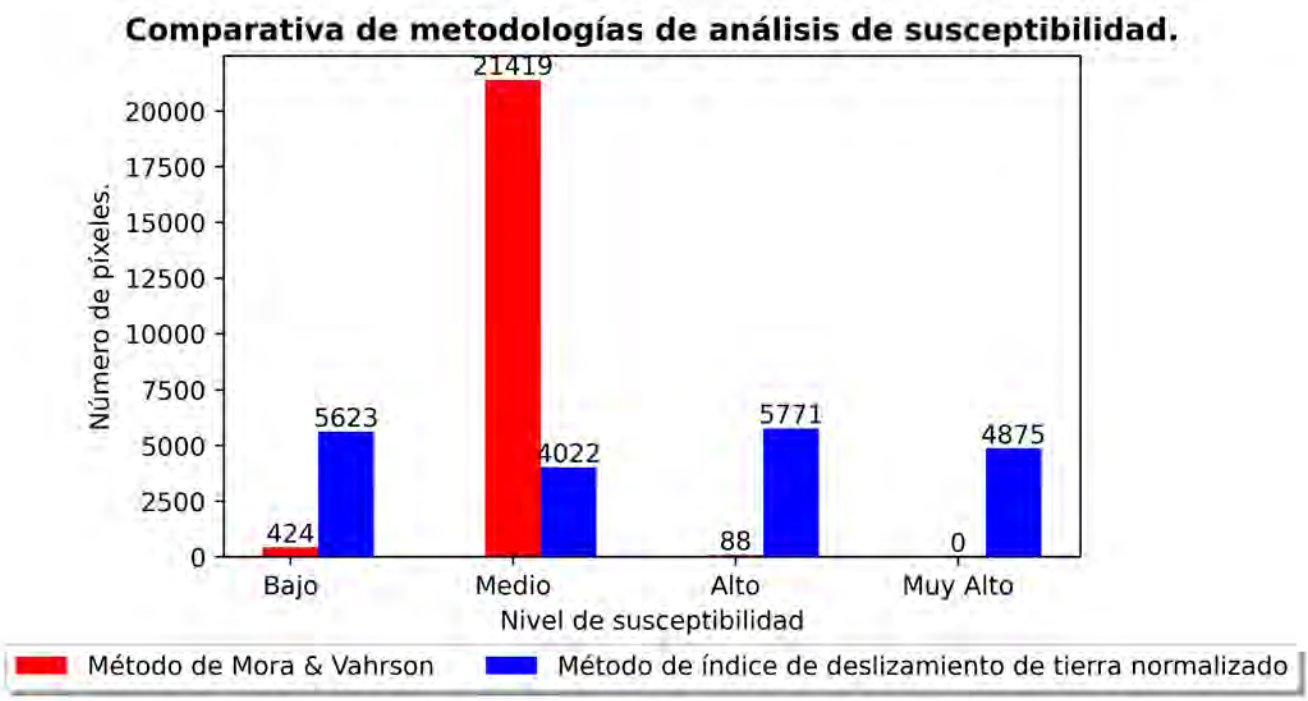

Figura 4.32: Comparativa de resultados de cada metodología.

Es posible observar que la mayor parte de la distribución de píxeles en la metodología de Mora y Vahrson (1994) corresponden a niveles medios de susceptibilidad, en cambio, la metodología de Índice Normalizado presenta una distribución más equitativa en los valores mostrados.
Este comportamiento también fue observado por Posner (2015) en su trabajo, mostrando que la metodología Mora y Vahrson hace una exageración en la consideración de un nivel de susceptibilidad en una región, siendo este caso en el nivel medio, que se ha visto también reflejado en el comportamiento de los índices mostrados en los mapas de susceptibilidad en sus distintas resoluciones, esto debido a la ponderación asignada a los valores de pendiente en el proceso de evaluación de susceptibilidad.

Capítulo 5

Análisis y discusión.

5.1. Topografía.

La información de elevación proporcionada a partir de información satelital de Alos Palsar, la cual tiene una resolución de 12.5 metros, permite obtener una información de la topografía con una buena calidad, siendo una aproximación con buen grado de fidelidad a la realidad. Sin embargo, a pesar de la resolución, se vuelve necesario el obtener datos de elevación con mayor resolución, entre 1 y 5 metros, permitiendo una estimación de la topografía con mayor resolución, identificando elevaciones o depresiones del terreno que con la resolución actual no son perceptibles y que, en conjunto con el resto de factores que se han analizado, pueden ser detonantes o propiciantes a la ocurrencia de un deslizamiento..

5.2. Geología y geomorfología.

La información disponible, si bien brinda la información importante de las unidades geológicas que existen en la región, no se brinda información detallada de las condiciones geomorfológicas, su alteración o erosión, las condiciones de las fallas como su densidad, su espaciado o el paso de fluidos a través de dichas fallas.

Por esto, es necesario hacer un reconocimiento *in situ* de las unidades más representativas en las zonas con mayor susceptibilidad, caracterizando de manera detallada las unidades litológicas en sitios específicos, tanto de manera superficial como en profundidad cuando sea posible. Aún así, y tomando en consideración la realidad geológica y geomorfológica de nuestro sitio de estudio, podemos inferir que los efectos de meterización y alteración que han ocurrido en las distintas unidades geológicas del sitio de estudio juegan un papel importante en la ocurrencia de deslizamientos, ya que estos pueden llegar a favorecer la ocurrencia de movimientos de masas al generar planos de debilidad.

5.3. Sismicidad.

Como puede observarse en la figura 4.19, comparándose con la figura 4.23, la cantidad de sismos que afectan la zona de estudio, y el departamento de Chalatenango en general, soy muy pocos en comparativa con el resto del territorio salvadoreño, esto debido a que la zona norte de El Salvador es de las menos afectados por sismos de todo el territorio.
Por ello, es posible inferir que los sismos no son una fuente desencadenante de los deslizamientos en La Montañona, aún con esto, no puede dejarse de lado la influencia que tiene la sismicidad sobre la ocurrencia de estos eventos, especialmente considerando que toda la región salvadoreña es susceptible ante sismos, por esta razón, la utilización del PGA permite una mejor aproximación a los efectos que tienen los sismos en el terreno del sitio de estudio.

5.4. Meteorología.

Gracias a la gran cantidad de datos provisto por las estaciones meteorológicas es posible tener una línea base del comportamiento meteorológico de la región.
La utilización de datos de la NOAA permitieron, además, generar una interpolación de mayor extensión territorial, de esta manera fue posible generar una interpolación que cubriera de mejor manera la zona de estudio, aún con esto, la utilización de datos de estaciones dentro de la región de estudio siempre brindará mejor información del comportamiento meteorológico de la zona a evaluar. Como era de esperarse de una zona de alta montaña, las estaciones provistas por el MARN muestran que estas estaciones presentan los mayores promedios y mayores valores de precipitación para un periodo de retorno de 100 años, con esto es posible concluir que las precipitaciones juegan un papel muy importante en la ocurrencia de deslizamientos en el sitio de estudio, tanto como aportando en la humedad del suelo, como con lluvias intensas.

5.5. Mapas de Susceptibilidad.

A partir de los mapas obtenidos con la metodología de Mora & Vahrson ha sido posible estimar el nivel de susceptibilidad de a región ante un deslizamiento. Las distintas resoluciones de malla de estudio brindan diferentes aproximaciones al análisis de susceptibilidad, como es natural, la malla de $1km^2$ muestra a grandes rasgos las zonas con diferentes niveles de susceptibilidad, la malla de 500 m muestra un comportamiento más conservador, mostrando únicamente valores bajos y medios, mientras que la malla de $100m^2$ delimita de mejor manera aquellos sectores que presentan mayor grado de susceptibilidad a estos eventos, estas zonas concuerdan con los valores de mayor pendiente del terreno, y la malla de 30 m^2, si bien muestra una gran cantidad de valores medios,

aquellos sectores con valor alto coinciden con los valores altos mostrados por el método NLI . Referente al método NLI, y como pudo observarse en la imagen 4.32, la metodología Mora & Vahrson muestra una tendencia a sobreestimar los niveles medios de amenaza, esto debido a la ponderación que se le asigna a los diferentes factores, siendo la pendiente la que más variación presenta.

A pesar de lo anteriormente mencionado, los mapas de susceptibilidad creados con la metodología de Mora & Vahrson han mostrado ser una gran erramienta para delimitar sitios con mayor suceptibilidad a deslizamientos de manera rápida y de bajo costo, especialmente si consideramos los resultados obtenidos en los mapas de 1 km^2, 100 y 30 m^2 los cuales muestran de mejor manera aquellos sitios con mayor susceptibilidad. El comportamiento anómalo de los resultados obtenidos en la malla de 500 m^2 podría estar relacionado a la resolución espacial de los datos geológicos y datos topográficos.

5.6. Ventajas y limitaciones.

5.6.1. Ventajas

- Es relativamente fácil de aplicar, lo que la hace accesible para los profesionales que no tienen experiencia en evaluación de susceptibilidad a deslizamientos.
- Es una metodología cuantitativa, lo que reduce el margen de error y aumenta la reproducibilidad de los resultados.
- Permite identificar las zonas con mayor y menor susceptibilidad a deslizamientos, lo que es útil para la planificación del uso del suelo y la gestión del riesgo
- No requiere altos costos de inversión.
- Es posible aplicar la metodología utilizando software de código abierto.
- La metodología puede ser ajustable a cada región, considerando cada factor en particular que inciden sobre la ocurrencia de un deslizamiento.
- Gran cantidad de información necesaria para la aplicación de esta metodología puede ser consultada en repositorios de acceso público.
- Es un método relativamente rápido, lo que permite evaluar grandes áreas en un período de tiempo razonable.

5.6.2. Limitantes.

- La metodología no considera muchos factores que pueden generar la ocurrencia de un deslizamiento, como el aporte de humedad que tiene el rocío así como aporte subterráneo de agua de parte de acuíferos.
- Si bien mucha información puede ser consultada en repositorios de acceso público, es necesario una gran cantidad de información para tener una correcta aproximación a la realidad, sin mencionar que en la mayoría de ocasiones no se cuenta con información geológica y geotécnica detallada.
- No considera la variabilidad espacial de los factores que influyen en la susceptibilidad a deslizamientos, lo que puede llevar a una sobreestimación o subestimación de las áreas con mayor susceptibilidad.
- El método se basa en el conocimiento y experiencia del experto que realiza la evaluación, lo que puede generar subjetividad en los resultados obtenidos.
- No incluye la dinámica de los factores que influyen en la susceptibilidad a deslizamientos, como los cambios en las condiciones meteorológicas o la acción humana sobre el terreno.
- La metodología se centra en la identificación de zonas potencialmente susceptibles a deslizamientos, pero no proporciona información detallada sobre la magnitud y frecuencia de los eventos.

Capítulo 6

Conclusiones.

1. El método de Mora & Vahrson permite la identificación de sitios con susceptibilidad a deslizamientos de manera rápida y sin recurrir en costos elevados o equipos especializados, aún con esto, la metodología depende mucho del punto de vista y la experiencia del investigador, con lo cual, se convierte en una investigación con un alto componente subjetivo.

2. Los datos de elevación obtenidos del satélite Alos Palsar permiten obtener información de la topografía del sitio de estudio, sin embargo, a pesar de la resolución de las imágenes satelitales, el cual es de 12.5 metros, es necesario, para un análisis más próximo a la realidad, utilizar datos topográficos de mejor resolución, sugiriéndose datos de 5 metros o menos, para así considerar de mejor manera todos los accidentes topográficos que puedan llegar a tener una influencia en la ocurrencia de un deslizamiento.

3. Si bien los datos geológicos del sitio de estudio que pueden utilizarse para determinar las unidades geológicas presentes en la zona, esta información no permite realizar un correcto análisis geológico y geomorfológico del sitio de estudio debido a su baja resolución espacial, además de no brindar detalles del grado de fracturamiento, meteorización, erosión, o procesos de desplazamiento del terreno, siendo necesario un reconocimiento *in situ* de las unidades para poder determinar las condiciones geomorfológicas de dichas unidades, o en su defecto, de las zonas cuyos valores de susceptibilidad fueron más altos, además de identificar procesos de movimiento lento, así como reconocer sitios con evidencias de deslizamientos antiguos que puedan ser indicativos de zonas con recurrencia a estos eventos.

4. Ante el reducido número de sismos que tienen influencia registrada en Chalatenango en el periodo analizado ya nos da una prueba fehaciente de que la sismicidad no es un factor influyente ante la ocurrencia de deslizamientos en el sitio de estudio, aún con esto, no es posible dejar de lado el efecto que los movimientos de terreno por origen sísmico puedan

ejercer sobre la ocurrencia de un deslizamiento, especialmente al considerar el territorio salvadoreño, el cual presenta susceptibilidad a los sismos, es por esto que se utilizaron datos de aceleración pico del suelo (PGA) para poder cuantificar estos movimientos. A pesar de ello, es necesario contar con registros acelerográficos de la región para poder estimar correctamente el movimiento del terreno ante un sismo de una determinada magnitud.

5. La distribución espacial de las estaciones generadas por el MARN genera una falta de cobertura al momento de generar interpolaciones e[illegible]os datos de precipitación brindada por cada una de ellas, por ello, se utilizaron datos meteorológicos de las bases de datos de la NOAA para poder cubrir de mejor manera todo el sitio de estudio. No obstante, es importante contar con mayor cantidad de datos meteorológicos de estaciones dentro de la zona de estudio, así podrá considerarse de mejor manera la cantidad de precipitaciones presentes en el sitio. Además, es necesario considerar otros aportes de humedad al terreno, como el rocío o aporte de agua subterránea, que también podrían jugar un papel desestabilizador en el terreno.

Capítulo 7

Recomendaciones

- Dado que Mora & Vahrson permiten identificar las zonas con mayor susceptibilidad, es en estas zonas que es requerido crear planes de prevención y mitigación de riesgos, identificando en campo los sitios con mayor potencial de afectación a las comunidades. Así también, las municipalidades deben considerar un plan de ordenamiento en las comunidades que permita un fácil acceso a rutas de evacuación.

- Si bien la metodología de Mora & Vahrson fue creada y calibrada en Costa Rica, que guarda muchas similitudes meteorológicas y geológicas con El Salvador, es necesario crear una adaptación de esta metodología que considere específicamente los factores predominantes en el contexto geológico, geomorfológico y climatológico de El Salvador, para así hacer una mejor aproximación a la realidad del país.

- Determinados los lugares que presentan un nivel alto de susceptibilidad a deslizamiento utilizando como base los mapas de susceptibilidad de 100 y 30 m^2, que son los que mejor resolución espacial poseen, se recomienda que estos sectores sean estudiados de manera detallada, implementando métodos estadísticos y estudios de estabilidad del terreno para determinar de mejor manera la susceptibilidad de la zona.

- Dado que algunos de los sitios que presentaron niveles de susceptibilidad altos aún no presentan infraestructura o comunidades, es necesario que estos sean considerados como sitios de alta peligrosidad en los planes de ordenamiento territorial, siendo necesario estudios previos de estabilidad si llegase a proponerse la creación de construcciones de cualquier tipo en esa zona, permitiendo así la prevención de futuros eventos adversos

Bibliografía

ANDINA (2019). Indeci: reptación de suelo en Áncash deja 24 familias damnificadas. Andina.

Arévalo, D. et al. (2006). Evaluación de amenazas y planes municipales de reducción de riesgos del municipio de Ojos de Agua, departamento de Chalatenango. *Universidad de El Salvador*.

Barrera, R., Gutierrez, M., Vázquez-Jiménez, R., and Bello, J. (2020). Análisis de vulnerabilidad de los deslizamientos de laderas en la ciudad de Chilpancingo.

Bogoslovsky, V. A. y Ogilvy, A. A. (1977). Geophysical METHODS FOR THE INVESTIGATION OF LANDSLIDES. *GEOPHYSICS*, 42(3):562–571.

Boyko, B. et al. (2020). Landslide susceptibility mapping using GIS: a case study along bulgarian black sea coast. *8th International Conference on Cartography and GIS*.

Carr, M. (1984). Symmetrical and segmented variation of physical and geochemical characteristics of the Central American volcanic front. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.

Carrara, A. et al. (1998). Current limitations in modeling landslides hazard. *Proceedings or IAMG'98*.

Castillo, G. B. et al. (2011). Efectividad de la metodología Mora-Vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*.

Chaverri Molina, I. F. (2016). Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Vahrson, en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica. *Instituto tecnológico de Costa Rica.*

Corominas, J. et al. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*.

Dengo, G. (1968). Estructura geológica, historia tectónica y morfología de América Central. *Centro regional de ayuda técnica*.

Facility, A. S. (2019). Alos PALSAR - About. https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/alos-palsar-about/.

Fernández, L. M. (2014). Cálculo de la susceptibilidad de deslizamiento del terreno en Lorca mediante un sistema de información geográfica. *Universidad Politécnica de Madrid*.

Ferrés López, M. D. (2014). Estratigrafía, geología y evaluación de peligros volcánicos del complejo volcánico de San Salvador, El Salvador. *Universidad Nacional Autónoma de México*.

Geertsema, M. et al. (2006). An overview of recent large catastrophic landslides in northern British Columbia, Canada. *Engineering Geology*.

González, J. C. et al. (2017). Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Santiago de María, Usulután, El Salvador, mediante técnicas de SIG y análisis geomorfológico. *Revista Geológica de América Central*, 57:139–160.

Guillén, J. et al. (2006). Evaluación de amenazas y planes municipales de reducción de riesgos del municipio de Concepción Quezaltepeque, departamento de Chalatenango. *Universidad de El Salvador*.

Hernández, E. et al. (2018). Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos en la cuenca del río sucio, departamento de La Paz, El Salvador, mediante análisis multicriterio. *Revista Geológica de América Central*, 59:79–100.

Hidalgo, V. et al. (2006). Evaluación de amenazas y planes municipales de reducción de riesgos del municipio de La Laguna, departamento de Chalatenango. *Universidad de El Salvador*.

Humberto, R. et al. (2006). Evaluación de amenazas y planes municipales de reducción de riesgos del municipio de Las Vueltas, departamento de Chalatenango. *Universidad de El Salvador*.

Hungr, O. et al. (2001). Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*.

Ibañez, D. et al. (2012). Geología y geomorfología para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa en el municipio de Soacha, Cundinamarca, Colombia.

IUGS (1997). Quantitative risk assessment for slopes and landslides - the state of the art. proceedings of the international workshop on landslides risk assessment, Honolulu, Hawaii, USA. *Commitee on Risk Assessment*.

Köppen, W. (1884). World maps of Köppen-Geiger Climate Classification.

Laporte Molina, Gastón y Barrantes Alfaro, D. (2018). Problemas de cimentación de obras en laderas debido a deformaciones inducidas por sismos y lluvias. *INSUMA S.A.*

Li, Z., Wang, K., Ma, H., and Wu, Y. (2018). An Adjusted Inverse Distance Weighted Spatial Interpolation Method. *Proceedings of the 2018 3rd International Conference on Communications, Information Management and Network Security (CIMNS 2018).*

Mata, Roger y Puiguriguer, M. (2000). El Salvador, el "país de las hamacas". Los riesgos geológicos: El ejemplo de los grandes deslizamientos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra.*

Mendoza, Manuel J. y Domínguez, L. (2017). Estimación del peligro y el riesgo de deslizamientos en laderas. *CENAPRED.*

Molina, E. et al. (2018). *Proyecto Resis II Evaluación de la Amenaza Sísmica en Centroamérica.* NORSAR.

Mora, Sergio y Vahrson, G. (1992). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos.

Mora, Sergio y Vahrson, G. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination.

Mora, S. (1991). Puriscal, Costa Rica Landslide and its dynamics.

Morán, G. et al. (2006a). Evaluación de amenazas y planes municipales de reducción de riesgos del municipio de Comalapa, departamento de Chalatenango. *Universidad de El Salvador.*

Morán, G. et al. (2006b). Evaluación de amenazas y planes municipales de reducción de riesgos del municipio de El Carrizal, departamento de Chalatenango. *Universidad de El Salvador.*

Morán, Guillermo y Acosta, J. (2006). Evaluación de amenazas y planes municipales de reducción de riesgos del municipio de Chalatenango, departamento de Chalatenango. *Universidad de El Salvador.*

Morán, Guillermo y Esquivel, M. (2007). Análisis y síntesis del diagnóstico biofísico y condiciones socioambientales. *Universidad de El Salvador.*

Navarro Vidal, J. (2012). Susceptibilidad y amenaza de movimientos de ladera mediante S.I.G. en el municipio de Berlín, El Salvador. *Universidad Complutense de Madrid.*

Nicholson, Dawn y Hencher, S. (1997). Assessing the potential for deterioration of engineered rockslopes.

OpenCourseWare (2015). Método de gumbel. Universidad Politécnica de Madrid. Accessed: 2023-1-15.

Paredes, O. et al. (2012). Zonificación y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100,000. *Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental*.

Peñate, S. (2019). Derrumbe en los chorros. La Prensa Gráfica.

Pineda Ortiz, K. E. (2019). Mapeo geofísico integrado del área asociada al enjambre sísmico de abril del 2017 en el flanco sur del volcán de San Salvador. *Universidad de El Salvador*.

Posner, Ari J. y Georgakakos, K. P. (2015). Normalized landslide index method for susceptibility map development in el salvador. *Natural Hazards*, 79(3):1825–1845.

Román, Adolfo Quesada y Feoli-Boraschi, S. (2018). Comparación de la metodología mora-vahrson y el método morfométrico para determinar áreas susceptibles a deslizamientos en la microcuenca del río macho, costa rica.

Segura, G. et al. (2011). Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba. *Revista Geográfica de América Central*.

Sierra, S. et al. (2017). Zonificación de amenazas por deslizamientos a partir del modelo de Mora y Vahrson. *Entorno Geográfico*.

SNET (2021). Enjambre sísmico al noreste del municipio de tecoluca, san vicente. *Informe técnico 1*.

Soeters, R. and Westen, C. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. *In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), Landslide: Investigations and Mitigation. Special Report, vol. 247. Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.*, page 129–17.

Suarez Diaz, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. *Universidad Industrial de Santander.*

Torrecilla Macho, Carolina y Ramírez Lucendo, I. (2001). Diagnosis e inventario de la susceptibilidad a las inestabilidades gravitatorias en las áreas afectadas por los terremotos del 2001 en el volcán de Usulután. *Geólogos por el mundo*, 1:33.

Toz, Gonul y Erdoğan, M. (2008). Dem (digital elevation model) production and accuracy modeling of dems from 1:35.000 scale aerial photographs. *ISPRS*, pages 775–777.

Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. *Landslides: Analysis and Control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.). National Research Council, Washington, D.C.*

Varnes, D. J. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice.

Vittorio de Blasio, F. (2011). *Introduction to the Physics of a Landslides: Lectures Notes on the Dynamics of Mass Wasting*. Springer, 1 edition.