



UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

**DETERMINACIÓN DE ÁREAS SUSCEPTIBLES A MOVIMIENTOS EN MASA
EN NUEVA CALIFORNIA, CHIRIQUÍ, PANAMÁ**

Estudiante:

Eli Israel Mojica Williams

ID:

8-878-62

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE GRADO:
LICENCIATURA EN INGENIERÍA GEOLÓGICA**

Profesor asesor de la Escuela de Ingeniería:

MSc. Ariadna Flores

REPÚBLICA DE PANAMÁ

2025

FIRMA DEL JURADO

Agradecimientos :

Le agradezco primeramente a Dios, que a pesar de las pruebas nunca me ha abandonado; a mi familia, principalmente a mi madre y a mi padre, quienes con amor y cariño siempre me han apoyado; así, también mi hermana y hermanos; agradezco a mis compañeros de la carrera, quienes me apoyaron durante nuestros años de estudio. Agradezco a todos los profesores, que con sus conocimientos y paciencia ayudaron a lo largo de mi formación académica. Y, por último y no menos importante, mi más sincero agradecimiento a mi tutora Msc. Ariadna Flores, por su guía constante, orientación académica y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación, su apoyo fue fundamental para el cumplimiento de los objetivos planteados. Extiendo, también, mi reconocimiento al Lic. Héctor Pineda, del Instituto de Geociencias, por su valiosa asistencia técnica y sus aportes en el manejo y procesamiento cartográfico en QGIS, que permitieron fortalecer la calidad analítica del estudio. Asimismo, agradezco de manera especial a Dra. Marta Guinau, de la Universidad de Barcelona, cuya experiencia y conocimiento especializado en la metodología de evaluación de susceptibilidad a deslizamientos aportaron un sustento científico determinante para la correcta aplicación del modelo y la interpretación de los resultados obtenidos. A todos ellos, mi profundo agradecimiento por contribuir significativamente al desarrollo y culminación de esta tesis.

RESUMEN

El presente estudio evaluó la susceptibilidad a deslizamientos en el área de estudio ubicada en el corregimiento de Nueva California, provincia de Chiriquí, mediante la aplicación del índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI). Se integraron seis factores condicionantes: pendiente, curvatura, aspecto, red de drenaje, red vial y cobertura boscosa, derivados principalmente de un modelo digital de elevación de 5 metros suministrado por el Instituto Geográfico Nacional “Tommy Guardia”, complementado con capas temáticas provenientes de fuentes abiertas oficiales.

Se elaboró un inventario de 158 movimientos en masa, entre los años 2015 y 2024 el cual fue utilizado para el cálculo estadístico del LSI mediante la razón entre densidad espacial de deslizamientos por clase y la densidad total del área de estudio. Cada capa fue reclasificada en intervalos categóricos para obtener los valores de susceptibilidad por parámetro, los cuales se integraron para generar el mapa final de susceptibilidad.

La clasificación del modelo muestra que, el 56 % del territorio presenta susceptibilidad moderada, seguido de 30 % con susceptibilidad alta, 12 % baja y únicamente 2 % muy alta. La validación con los deslizamientos independientes identificados en 2021 evidenció que la mayoría de los eventos se superponen espacialmente en áreas clasificadas como alta y moderada susceptibilidad, confirmando la coherencia del modelo.

Los resultados demuestran que el método LSI constituye una herramienta efectiva y aplicable para zonas montañosas con condiciones geomorfológicas complejas y disponibilidad limitada de datos. Finalmente, se plantean recomendaciones orientadas al fortalecimiento del monitoreo territorial, planificación del uso de suelo y futuras mejoras metodológicas.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	5
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	11
CAPÍTULO I	12
GENERALIDADES	12
1.1 Planteamiento del problema.....	12
1.2 Justificación	12
1.3 Objetivos Generales y Específicos:	13
1.4 Hipótesis de Trabajo:	14
CAPÍTULO II.....	15
MARCO TEÓRICO	15
2.1 Antecedentes	15
2.2 Bases teóricas.....	15
2.2.1 Los movimientos en masa	15
2.3 Elementos que conforman un deslizamiento	16
2.4 Clasificación de los movimientos en masa	18
2.5 Clasificación y definición de los movimientos en masa	19
2.5.1 Desprendimientos o Caídas.....	19
2.5.2 Vuelcos o basculamiento.....	19
2.5.4 Separaciones laterales	22
2.5.5 Flujos o coladas	23
2.5.5.1 Flujos de escombros (debris flow)	23
2.5.5.2 Flujo o Coladas de tierra (earthflows).....	25
2.5.5.3 Flujo o coladas de barro (mudflow)	25
2.5.6 Lahares (flujos de escombros volcánicos)	25
2.6 Movimientos en masa complejos	25
2.7 Factores condicionantes y desencadenantes de los movimientos en masa.	25
2.7.1 Factores que condicionan los movimientos en masa	26
2.7.1.1 Estructura geológica.....	26
2.7.1.2 Condiciones hidrogeológicas	27

2.7.1.3 Características morfológicas y geométricas	27
2.7.2 Factores que desencadenan los movimientos en masa.....	28
2.7.2.1 Precipitaciones y condiciones climáticas	28
2.7.2.2 Cambio del nivel del agua.....	29
2.7.2.3 Procesos erosivos	29
2.7.2.4 Sismos	29
2.7.2.5 Procesos antropogénicos	30
CAPÍTULO III	31
ZONA DE ESTUDIO	31
3.1 Generalidades del Istmo de Panamá	31
3.1.2 El clima de Panamá	32
3.1.3 Geomorfología de Panamá	32
3.1.4 Tipos de rocas en Panamá	36
3.1.4.1 Rocas ígneas.....	36
3.1.4.2 Rocas sedimentarias	37
3.1.4.3 Rocas metamórficas	37
3.1.5 Tectónica de Panamá.....	37
3.1.6 Microplaca de Panamá	38
3.1.7 Zona de Fractura de Panamá	39
3.2 Zona de estudio corregimiento de Nueva California-distrito de tierras altas -provincia de Chiriquí.	39
3.2.1 Características generales de la provincia de Chiriquí	40
3.2.2 Clima y precipitaciones	40
CAPÍTULO IV.....	43
METODOLOGÍA	43
4. Metodología para la Elaboración de Inventarios de Deslizamientos usando Google Earth pro.	43
4.1 Antecedentes	43
4.2 Parámetros seleccionados para el estudio	46
4.3 Reclasificación de variables para el LSI.....	49
4.4 Bases Teóricas y Metodológicas del Análisis de Susceptibilidad a deslizamientos (LSI).....	49
4.4.1 Introducción al LSI.....	49

4.5 Fundamento Teórico	51
CAPÍTULO V	54
RESULTADOS Y DISCUCIONES	54
5.1 Inventario de deslizamientos	54
5.2 Elaboración de capas del DEM de 5m.....	55
5.3 Reclasificación y resultados obtenido de las variables para el método LSI	59
5.4 Valores obtenidos para aplicar el LSI.....	60
5.5 Ajuste de los datos obtenidos del LSI.....	63
5.6 Obtención del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa en corregimiento de Nueva California, provincia de Chiriquí.....	64
5.7 Validación del método del LSI	65
5.8 Discusión	67
CAPÍTULO VI.....	68
CONCLUSIONES	68
RECOMENDACIONES.....	69
REFERENCIAS	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Deslizamiento de tierra rotacional que se ha convertido en un flujo de tierra, también indica las partes de un deslizamiento. Fuente: (Highland & Bobrowsky, 2008)...</i>	18
Figura 2. <i>Movimiento de un vuelco , Fuente:(Highland & Bobrowsky,2008)</i>	20
Figura 3. <i>Deslizamiento rotacional. Fuente: (Highland & Bobrowsky, 2008)</i>	21
Figura 4 <i>Ilustración de un deslizamiento traslacional. Fuente:(Highland & Bobrowsky, 2008)</i>	22
Figura 5. <i>Esquema de una expansión lateral. Una capa licuable se encuentra debajo de la capa superficial, Fuente: (Highland & Bobrowsky, 2008)</i>	23
Figura 6. <i>Esquema de un flujo de escombros. Fuente: (Highland & Bobrowsky, 2008)</i>	24
Figura 7. <i>Mapa de Panamá, con sus diferentes elevaciones y límites de provincias.</i>	31
Figura 8. <i>Las diferentes placas que interactúan con la microplaca de Panamá</i>	39
Figura 9. <i>Ubicación de la zona de estudio. Fuente (Google earth pro)</i>	42
Figura 10. <i>Diferentes formaciones geológicas en la zona de estudio. Fuente (MICI, 1990)</i>	42
Figura 11. <i>Zona de estudio y los diferentes polígonos en que se dividieron para llevar un mejor orden en el análisis de las imágenes satelitales. Fuente (Google earth pro).</i>	45
Figura 12. <i>La imagen A muestra ningún cambio en enero del 2020 y la imagen B muestra que ocurrió un movimiento en masa en la región en diciembre del 2020.....</i>	45
Figura 13. <i>interpretación de la masa desplazada y cartografía digital. Fuente: (Google Earth pro.).</i>	46
Figura 14. <i>La imagen muestra los diferentes ángulos y que dirección representa según los puntos cardinales. Fuente: (ESRI, 2023)</i>	47
Figura 15. <i>El diagrama de la izquierda muestra la forma de un talud y a la derecha las diferentes zonas de transporte y deposición de sedimentos. Fuente:(Díaz, 2009).....</i>	48
Figura 16. <i>Representación espacial de los diferentes deslizamientos encontrados. fuente: Autor</i>	55

Figura 17. <i>Representación de las diferentes capas obtenidas del DEM de 5m de resolución: a) DEM, b) Pendiente, c) aspecto ,d)red de drenaje, e)curvatura del terreno. Fuente: Autor</i>	57
Figura 18. <i>Distribución espacial de las principales categorías de cobertura, incluyendo bosque latifoliado, áreas agropecuarias, que se encuentran en la zona de estudio(SINIA, 2021)</i>	58
Figura 19. <i>Representación de la red vial del área de estudio, diferenciada en calles urbanas asfaltadas y caminos de tierra, generada mediante fotointerpretación de imágenes satelitales. Fuente(autor)</i>	59
Figura 20. <i>Mapa de susceptibilidad obtenida través de la metodología del LSI. Fuente(autor)</i>	65
Figura 21. <i>validación del mapa de susceptibilidad con los deslizamientos inventariados del 2021 (102). Fuente (Autor)</i>	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación de movimiento en masa, Fuente (Hungar et al., 2014).</i>	19
Tabla 2. <i>Inventarios de movimientos en masa (158), mediante el análisis de imágenes satelitales (2015-2024).</i>	54
Tabla 3. <i>Diferentes parámetros considerados y las categorías asignadas para la elaboración del LSI</i>	60
Tabla 4. <i>Información obtenida de los diferentes parámetros y deslizamientos que ocupadas por cada área de influencia.</i>	61
Tabla 5. <i>Valores obtenidos de LSI por categoría</i>	62
Tabla 6. <i>Suma de los datos del LSI y ajuste de los datos</i>	63
Tabla 7. <i>clasificación del LSI obtenidos</i>	64

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 Planteamiento del problema

Los movimientos en masa afectan a la población directa o indirectamente en todas partes del mundo y, como se ha podido observar en trabajos de investigación previos, los movimientos en masa siguen en aumento por diferentes factores que condicionan y desencadenan estos procesos. Alrededor de 5.2 millones de personas en 9 países de América Latina y el Caribe, incluido Panamá, se vieron afectadas directa e indirectamente por el paso de los huracanes Eta e Iota en noviembre del 2020. Estos eventos climáticos generaron inundaciones y diversos movimientos en masa causando pérdidas de vidas humanas, daños a infraestructuras y a las economías de los países de la región (O’Callaghan, 2020).

A pesar de existir estudios en deslizamientos en Panamá, estos suelen abarcar el tema de manera general y no permiten un detalle a nivel local, situación necesaria para poder comprender el comportamiento y los mecánicos de generación de movimientos en masa. Por lo que en este trabajo se propone realizar un estudio local en el corregimiento de Nueva California perteneciente al distrito de Tierras Altas, Chiriquí este permitirá determinar las áreas susceptibles a deslizamientos, información que no hay disponible para esta zona. El resultado de este trabajo permitirá conocer aquellas zonas más propensas a presentar este tipo de peligro geológico, el cual servirá para una mejor gestión de la prevención del riesgo, para su remediación y para facilitar un mejor uso de los diferentes presupuestos que dispone la región. Para las ciencias del saber, también es importante, ya que, Panamá cuenta con pocos estudios en materia de riesgo geológico, por lo que será de gran aporte esta investigación.

1.2 Justificación

Comprender el riesgo de deslizamiento es de gran importancia para la gestión de los impactos socioeconómicos y ambientales. La reducción del riesgo de desastres (es decir, mitigación, preparación, respuesta y recuperación). La realización de estudios geológicos enfocados al riesgo por movimientos en masa ayudará a comprender mejor los mecanismo por los cuales estos ocurren y beneficiarán a las personas del corregimiento de Nueva California, provincia

de Chiriquí, pues esta zona se encuentra cerca a zonas montañosas, con poblados en desarrollo e importantes vías de acceso entre comunidades. El estudio consiste en analizar imágenes satelitales y realizar un inventario de deslizamientos ocurridos en la zona de estudio en un periodo de 10 años (2014-2024) y a través de modelos digitales de elevación del terreno (DEM) interpretar la geomorfología para obtener datos pendientes del terreno, cercanía a carreteras y cuerpos de agua entre otros. Se aplicará el índice de susceptibilidad a deslizamiento (LSI) por sus siglas en inglés, que es un método estadístico bivariado que analiza la información y a través de la cartografía se visualizarán las áreas más propensas a los movimientos de masas.

Se espera que la información obtenida, ayude a comprender los movimientos en masa en el corregimiento de Nueva California y en otras zonas del país. Los resultados de este trabajo servirán para que las autoridades locales, SINAPROC y otras entidades puedan realizar las preparaciones pertinentes para la prevención y la acción rápida ante un desastre que pueda afectar a las poblaciones.

1.3 Objetivos generales y específicos:

Objetivo general

- Determinar áreas susceptibles a movimiento en masa en el corregimiento de Nueva California, Chiriquí.

Objetivo específico

- Confeccionar un inventario de movimiento en masas a través de imágenes satelitales entre los años del 2014 al 2024.
- Identificar geomorfologías asociadas a movimientos en masa, a través de modelos digitales de elevación del terreno (DEM).
- Aplicar el método índice de susceptibilidad a deslizamientos LSI.
- Analizar la información geológica de la zona de estudio.

1.4 Hipótesis de trabajo:

Se considera que el análisis de diversas imágenes satélites en los últimos 10 años y la interpretación del modelo digital de elevación del terreno (DEM) pueden ayudar a identificar deslizamientos ocurridos en los corregimientos de Nueva California, a través de un inventario de deslizamientos ocurridos en el tiempo planteado y con otros factores como las precipitaciones, cercanía a ríos, carreteras, infraestructuras y usos del suelo se podrán utilizar métodos estadísticos como el índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI) , y con ayuda de programas de sistemas de información geográfica (SIG) visualizar de forma espacial las zonas propensas a los movimientos en masa.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Los deslizamientos siguen aumentando por diferentes factores como el cambio climático y la acción antrópica entre otros (Bekaert et al., 2020). El investigador (Gálvez, 2010), realizó una evaluación del riesgo a inundaciones y deslizamientos en la parte alta de la cuenca del río Chiriquí Viejo, Panamá. Para llevar a cabo este trabajo se utilizó el método de Vahrson - Mora en deslizamientos, sin embargo, para evaluar las inundaciones se utilizó un modelo de simulación denominado Floodarea. Dentro de los resultados que se obtuvieron se determinó que existen un 74 % de las comunidades vulnerable a inundaciones y un 71 % de la población vulnerable a deslizamientos. Además, que las comunidades de las Nubes y Nueva Suiza han sido las comunidades más afectadas por deslizamientos y que deberían ser priorizadas para la implementación de acciones ante este tipo de riesgo.

Por otro lado (Heinz & Saavedra, 2019), determinaron la relación entre la cantidad de lluvia promedio y la frecuencia de deslizamientos de tierra en Chiriquí utilizando datos históricos meteorológicos y de desastres desde 1985 hasta 2010. Esto permitió que se determinara que en el distrito de Bugaba es donde se experimentó el mayor número de deslizamientos de tierra.

En un estudio más reciente, se identificaron las áreas susceptibles a deslizamientos en el corregimiento de Cerro Punta utilizando el método del índice de susceptibilidad a deslizamientos. Como parte de este análisis se elaboró un inventario de deslizamientos que incluyó 68 eventos georreferenciados. (Santamaría et al., 2021)

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Los movimientos en masa

Los movimientos en masa ocurren en diversas partes del mundo independientemente del clima o tipo de terreno generando pérdidas millonarias y causando miles de muertes y lesiones anualmente a las poblaciones (Highland & Bobrowsky, 2008).

(Glade et al., 2006), en su investigación indica que los deslizamientos de tierra son uno de los diversos procesos naturales que moldean la superficie terrestre y, también menciona que pertenecen a un grupo mucho más amplio de procesos de pendiente denominados movimientos de masas, y se refiere a todos los procesos en los que el material que conforma una pendiente se desplaza o cae hacia abajo debido a la acción de la gravedad.

El tipo de movimiento describe la mecánica interna real de cómo se desplaza la masa y los mismos se pueden clasificar como: caída, derrumbe, deslizamiento, extensión o flujo. Por lo tanto, los movimientos se describen utilizando dos términos que se refieren respectivamente al material y al movimiento de la masa (Cruden & Varnes, 1996; Highland & Bobrowsky, 2008; Hungr et al., 2014; Varnes, 1978).

Un deslizamiento de tierra es un movimiento descendente de roca, suelo o ambos, que se desplaza a lo largo de una superficie de ruptura, la cual puede ser curva (deslizamiento rotacional) o plana (deslizamiento de traslación). En este proceso, gran parte del material tiende a moverse como una masa coherente o semicoherente, con poca deformación interna (Highland & Bobrowsky, 2008). Es importante señalar que, en ciertos casos, los deslizamientos de tierra pueden incluir otros tipos de movimiento, ya sea al inicio de la falla o posteriormente, si las características del material desplazado cambian mientras desciende por la pendiente.

2.3 Elementos que conforman un deslizamiento

(Cruden & Varnes, 1996; Hungr et al., 2014), en su investigación identifican y definen diversas partes de un deslizamiento de tierra como se presenta a continuación:

Escarpe principal: es una superficie muy inclinada en el terreno natural a lo largo de la periferia del derrumbe causado por el desplazamiento del material del derrumbe fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material alterado forma la superficie de falla.

Escarpe secundario: es una superficie muy inclinada en el material original, producida por movimientos diferenciales dentro de la masa que se desliza.

Cabeza: es la parte superior del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal que se puede visualizar en la Figura 1.

Cima: es el punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

Base: es el límite del material perturbado que se encuentra más alejado del escarpe principal.

Punta: el punto del talón que se encuentra a más distancia de la cima.

Base de la superficie de falla: es la línea de intersección (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.

Costado: es un lado del deslizamiento.

Corona: es el material que está en el sitio prácticamente inalterado y adyacente a las partes más altas del escarpe principal.

Superficie original del terreno: es la pendiente que existía antes de que se presentara el movimiento que se considera. Si esta es la superficie de un antiguo derrumbe se debe anotar este hecho.

Derecha e izquierda: para describir un deslizamiento se prefiere usar la orientación geográfica, pero si se emplean las palabras derecha e izquierda, deben referirse al deslizamiento visto desde la corona.

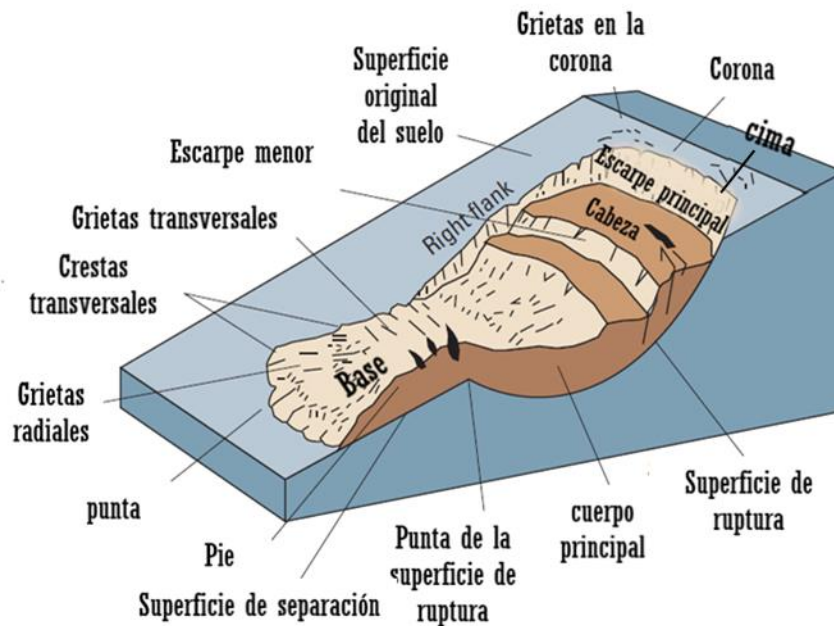


Figura 1. *Deslizamiento de tierra rotacional que se ha convertido en un flujo de tierra, también indica las partes de un deslizamiento. Fuente: (Highland & Bobrowsky, 2008)*

2.4 Clasificación de los movimientos en masa

Las clasificaciones de los movimientos en masa se refieren a los tipos de materiales involucrados, distinguiendo generalmente entre materiales rocosos, derrubios, suelos y al mecanismo y tipo de rotura considerando, también otros aspectos como contenido en agua del terreno y la velocidad y magnitud del movimiento (Tarbuck & Lutgens, 2010).

Los nombres de los tipos de materiales, como roca, escombros y tierra se mantienen sin cambios en relación con la clasificación de (Hung et al., 2014; Varnes, 1978). Los movimientos se han reorganizado en cinco categorías: caídas, derrumbes, deslizamientos, expansiones y flujos que se definen más adelante. El sexto tipo propuesto por (Varnes, 1978), los deslizamientos de tierra complejos, se utiliza para describir un estilo particular de deslizamiento, esta complejidad, también puede expresarse combinando los cinco tipos de deslizamientos de tierra.

Tabla 1 Clasificación de movimiento en masa. Fuente: (Hungr et al., 2014)

Tipo de movimiento		Tipo de material		
		Roca	Suelo	
			De grano grueso	De grano fino
Caídas o desprendimientos		caídas de rocas	Caídas de detritos	Caídas de suelos
Volcamiento		Volcamiento de rocas	Volcamiento de detritos	Volcamiento de suelos
Deslizamiento	Rotacional	Deslizamiento rotacional de rocas	Deslizamiento rotacional de detritos	Deslizamiento rotacional de suelos
	Traslacional	Deslizamiento traslacional de rocas	Deslizamiento traslacional de detritos	Deslizamiento traslacional de suelos
Separaciones laterales		separación lateral en roca	Separación lateral en detritos	Separación lateral en suelos
Flujos		Flujo de rocas	Flujo de detritos	Flujo de suelos
Complejos		Combinación de dos o más tipos de movimiento		

2.5 Clasificación y definición de los movimientos en masa

2.5.1 Desprendimientos o caídas

Se define como desprendimiento a una masa separada de un talud (desmonte, acantilado, etc.) mediante una superficie de corte normalmente pequeña y cuyo recorrido se realiza en gran parte, a través del aire (Ayala & Andreu, 1987).

(Hungr et al., 2014), es su estudio define que una caída comienza con el desprendimiento de suelo o roca, o ambos, de una pendiente pronunciada a lo largo de una superficie en la que se ha producido poco o ningún desplazamiento por corte; el material desciende principalmente cayendo, rebotando o rodando.

2.5.2 Vuelcos o basculamiento

Un vuelco se reconoce como la rotación hacia adelante desde una pendiente de una masa de suelo o roca alrededor de un punto o eje debajo del centro de gravedad de la masa desplazada.

El vuelco a veces es impulsado por la gravedad ejercida por el peso del material cuesta arriba desde la masa desplazada, también puede ser ocasionado por el agua o el hielo en las grietas de la masa. Los vuelcos pueden consistir en roca, escombros (materiales gruesos) o suelos con partículas finas.

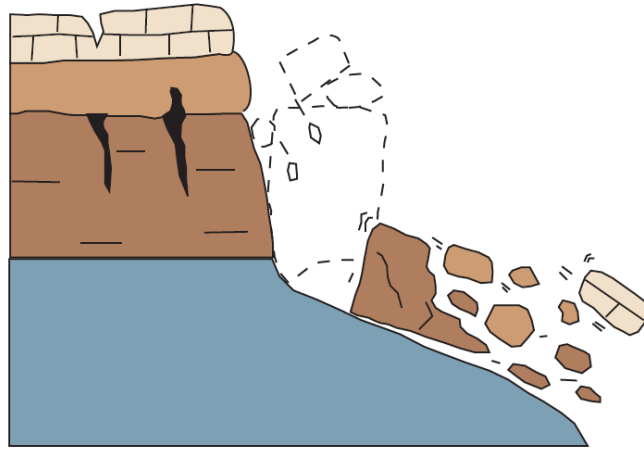


Figura 2. *Movimiento de un vuelco. Fuente: (Highland & Bobrowsky, 2008)*

2.5.3 Deslizamiento

Un deslizamiento es un movimiento descendente de un suelo o masa rocosa que ocurre en superficies de ruptura o en zonas relativamente delgadas de intensa tensión de corte. Inicialmente, el movimiento no ocurre simultáneamente en toda lo que eventualmente se convierte en la superficie de ruptura; el volumen de material desplazado aumenta desde un área de falla local. Los deslizamientos pueden ser de 2 tipos rotacional o traslacional (Varnes, 1978).

2.5.3.1 Deslizamiento rotacional

Un deslizamiento rotacional de tierra es en el que la superficie de ruptura está curvada hacia arriba (en forma de cuchara) y el movimiento del deslizamiento es más o menos rotacional alrededor de un eje paralelo al contorno de la pendiente. La masa desplazada puede, bajo ciertas circunstancias, moverse relativamente coherente a lo largo de la superficie de ruptura con poca deformación interna. La cabeza del material desplazado puede moverse casi

verticalmente hacia abajo y la superficie superior del material desplazado puede inclinarse hacia atrás, hacia el escarpe (Highland & Bobrowsky, 2008).

2.5.3.2 Deslizamiento traslacional

En un deslizamiento traslacional la masa se desplaza a lo largo de una superficie de ruptura plana u ondulada deslizándose sobre la superficie original del terreno. El deslizamiento traslacional en general es relativamente menos profundo que el deslizamiento rotacional.

Los deslizamientos traslacionales comúnmente fallan a lo largo de discontinuidades geológicas como fallas, juntas o el contacto entre roca y suelo. En ambientes de clima fríos, el deslizamiento, también puede moverse a lo largo de la capa de permafrost. (Highland & Bobrowsky, 2008)

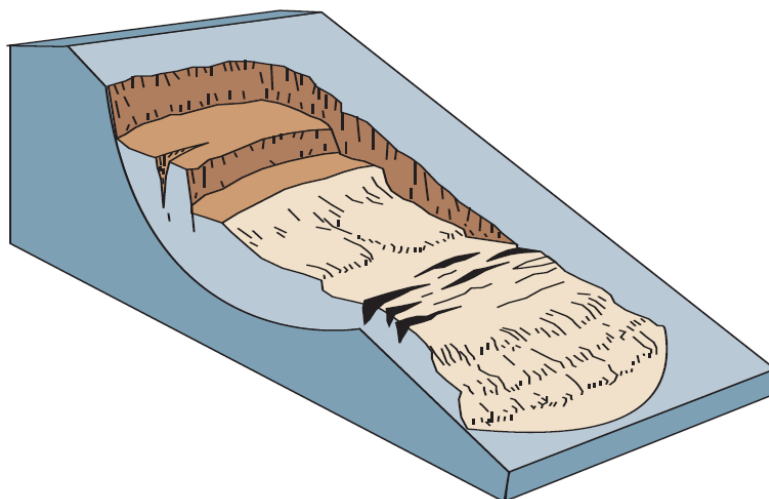


Figura 3. *Deslizamiento rotacional. Fuente: (Highland & Bobrowsky, 2008)*

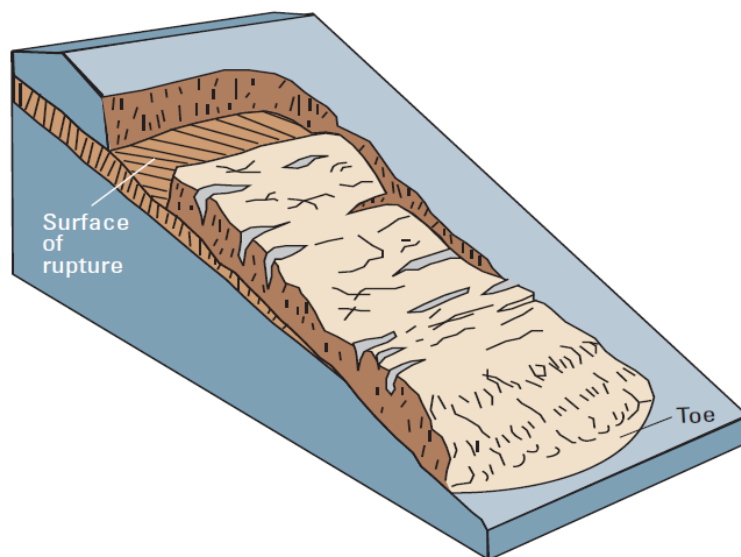


Figura 4 Ilustración de un deslizamiento traslacional. Fuente: (Highland & Bobrowsky, 2008)

2.5.4 Separaciones laterales

Las separaciones laterales las define Turner & Schuster, (1996), como una extensión de una masa de suelo o roca cohesiva combinada con un hundimiento general de la masa fracturada hacia un material subyacente más blando.

Las separaciones laterales suelen producirse en pendientes muy suaves o en terrenos esencialmente planos cuando una capa superior más fuerte de roca o suelo sufre una extensión y se desplaza por encima de una capa subyacente más blanda y débil (Highland & Bobrowsky, 2008).

Las separaciones, son la falla en los suelos más común durante los terremotos, se producen en terrenos más suaves con movimiento de unos pocos metros aproximadamente; implican fracturamiento y extensión de material coherente debido a la licuefacción o flujo plástico de material subyacente (Andrus & Youd, 1987).

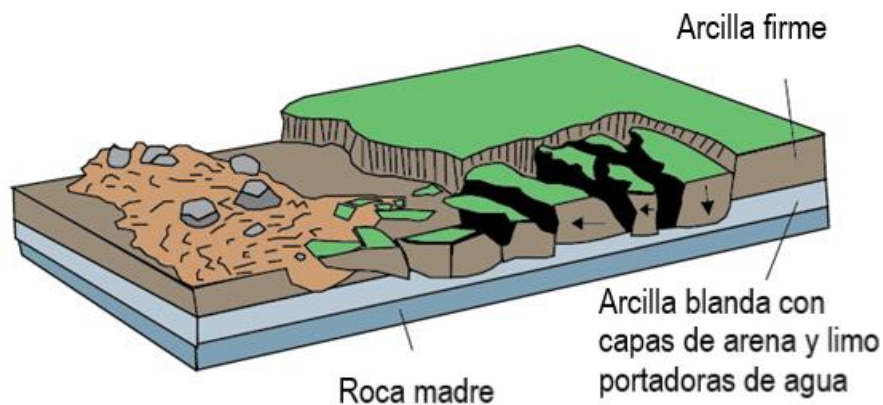


Figura 5. Esquema de una expansión lateral. Una capa licuable se encuentra debajo de la capa superficial. Fuente: (Highland & Bobrowsky, 2008)

2.5.5 Flujos o coladas

Los flujos o coladas son desplazamientos de masas de tierra (flujos de barro o tierra), escombros (*debris flow*) o fragmentos rocosos (coladas de fragmentos de roca) con alta presencia de agua, donde el material se encuentra desintegrado y actúa como un fluido experimentando una deformación continua sin la formación de superficies de ruptura definidas (Gonzáles de Vallejo, 2002).

La granulometría del material y el contenido en agua son los dos factores más determinantes en el desarrollo de este tipo de procesos (Ayala & Andreu, 1987).

El agua es el principal factor desencadenante, ya que, reduce la resistencia de los materiales poco cohesivos. Estos movimientos afectan principalmente a suelos arcillosos que pierden considerablemente su resistencia al ser movilizados y se caracterizan por ser poco profundos en comparación con su extensión; tienen una morfología similar a la de los glaciares y pueden ocurrir en laderas de bajas pendientes (Gonzáles de Vallejo, 2002).

2.5.5.1 Flujos de escombros (*debris flow*)

Los flujos de escombros (Highland & Bobrowsky, 2008), los describe como un movimiento rápido de masas en la que el suelo suelto, las rocas y, a veces, la materia orgánica se combinan con el agua para formar una suspensión que fluye pendiente abajo.

Estudios de (Corominas, 2000), indican que hay una progresión que va desde los deslizamientos hasta los flujos, la cual depende del contenido de agua, la movilidad y el desarrollo del movimiento. Un deslizamiento de escombros puede transformarse en un flujo o avalancha de escombros a medida que el material pierde cohesión, absorbe agua y se desplaza por pendientes más empinadas. Los flujos de escombros ocurren en todo el mundo, son frecuentes en barrancos, cañones empinados y, son comunes en áreas volcánicas con suelo débil (Highland & Bobrowsky, 2008).

El flujo de escombros puede descender tanto por laderas abiertas como a través de vaguadas u hondonadas del terreno, lo que da lugar a diferentes formas morfológicas. Debido a la pérdida de cohesión de sus componentes, se dispersa en la parte inferior de las laderas sin formar un depósito específico. Sin embargo, cuando se canaliza por barrancos, suele formar conos de deyección o abanico aluvial (Corominas, 2000).

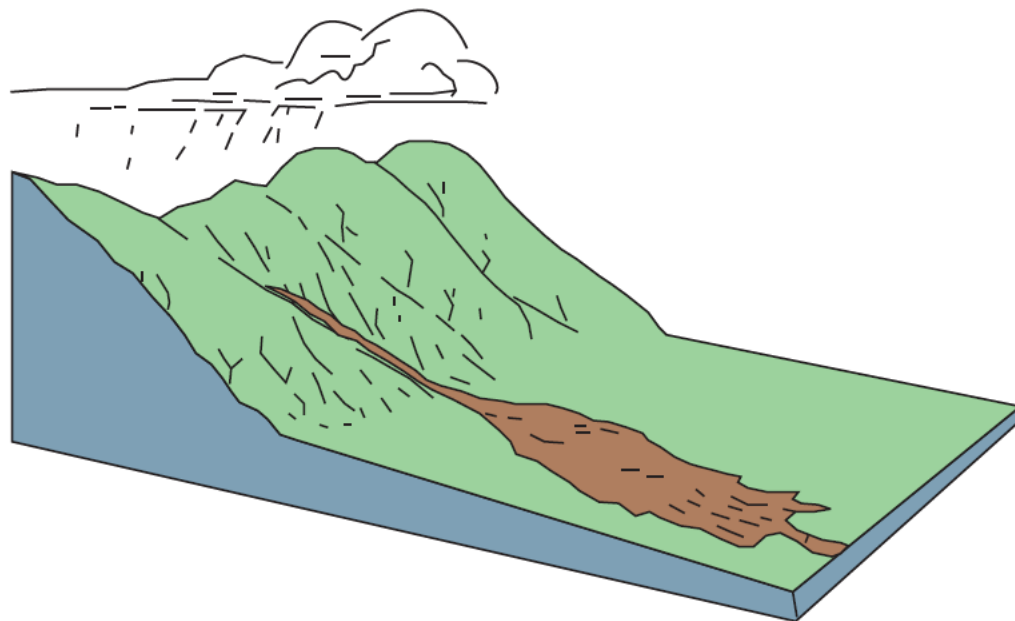


Figura 6. Esquema de un flujo de escombros. Fuente: (Highland & Bobrowsky, 2008)

2.5.5.2 Flujo o coladas de tierra (*earthflows*)

Los flujos de tierra pueden ocurrir en pendientes suaves a moderadas, generalmente en suelos de grano fino, comúnmente arcilla o limo, pero también, en lechos rocosos muy erosionados y con contenido de arcilla. La masa en un flujo de tierra se mueve como un flujo plástico o viscoso con una fuerte deformación interna. (Highland & Bobrowsky, 2008)

2.5.5.3 Flujo o coladas de barro (*mudflow*)

Este se produce en materiales con al menos un 50 % de fracción fina y con un contenido en agua suficiente, para permitir fluir al material. Existe una diversidad de características influyentes en estos movimientos que permiten una amplia definición de estos. Así, se habla de soliflucción cuando interviene el fenómeno hielo-deshielo en la parte más superficial de los suelos, (Ayala & Andreu, 1987).

2.5.6 Lahares (flujos de escombros volcánicos)

La palabra *lahar* es un término indonesio y son flujos de escombros que se originan en las laderas de casi todos los volcanes (Highland & Bobrowsky, 2008).

Los *lahares* pueden tener cientos de kilómetros cuadrados o millas de área y pueden hacerse más grandes en cuanto ganan velocidad y acumulan escombros a medida que avanzan pendiente abajo; pueden ser pequeños en volumen y afectar áreas limitadas del volcán y luego disiparse pendiente abajo.

2.6 Movimientos en masa complejos

Los movimientos complejos de un talud suelen implicar la combinación de dos o más de los principales tipos de movimiento mencionados anteriormente. Además, un proceso activo puede transformarse en otro a medida que avanza el fenómeno de desintegración. Por ejemplo, una inclinación puede acabar en un derrumbe o un deslizamiento puede convertirse en un flujo (Suárez Díaz, 1998).

2.7 Factores condicionantes y desencadenantes de los movimientos en masa

En el análisis de los movimientos en masa son de primordial importancia los factores que condicionan la estabilidad en el talud y aquellos otros que actúan como desencadenantes.

(González de Vallejo, 2002), indica que el comportamiento y las características de los materiales, que son los factores condicionantes (pasivos) están relacionados con la naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que los factores desencadenantes (activos) son factores externos que originan o provocan las inestabilidades y suelen ser responsables de la intensidad y rapidez de los movimientos.

2.7.1 Factores que condicionan los movimientos en masa

(Ayala & Andreu, 1987), menciona en su investigación que, la posibilidad de que ocurran deslizamientos en los taludes es condicionada por la estructura geológica, el tipo de roca, las condiciones hidrogeológicas y la morfología particular de una zona específica. (González de Vallejo, 2002), señala que, dentro de los factores condicionantes, las propiedades físicas, la resistencia de los materiales y las características morfológicas y geométricas de la ladera son fundamentales para la predisposición a la inestabilidad.

2.7.1.1 Estructura geológica

La estructura geológica, estratigrafía y litología evalúan la capacidad de movimiento de diversos materiales rocosos y suelos, así como la presencia de planos de discontinuidad que podrían funcionar como superficies de ruptura. Factores como la composición, resistencia, deformabilidad, grado de alteración, fracturación, porosidad y permeabilidad son determinantes en la posibilidad de que el terreno experimente rupturas y deslizamientos cuando se ve afectado por factores desencadenantes (González de Vallejo, 2002).

La geología, en términos generales, establece las características o propiedades de los suelos y rocas. La formación geológica influye en la presencia de materiales duros o de baja resistencia y las discontinuidades pueden favorecer la ocurrencia de movimientos a lo largo de planos débiles.

Los principales elementos geológicos para considerar según (Suárez Díaz, 1998):

- **Formación geológica**

Los materiales de origen ígneo o metamórfico tienen un comportamiento diferente al de los suelos de origen sedimentario, aluviones, coluviones, entre otros.

- **Estructura y discontinuidades**

En los suelos residuales y rocas, la estratificación y las discontinuidades funcionan como planos débiles o como conductores de agua subterránea. Las características de estas discontinuidades pueden favorecer los movimientos.

- **Meteorización**

La descomposición física o química altera la roca o el suelo, lo que cambia de manera significativa los parámetros de resistencia y permeabilidad facilitando la ocurrencia de deslizamientos.

2.7.1.2 Condiciones hidrogeológicas

(González de Vallejo, 2002), señala que el comportamiento hidrogeológico de los materiales está vinculado a sus propiedades litológicas, estructurales, así como al nivel de alteración y meteorización, factores que están estrechamente relacionados con las condiciones climáticas de una región específica.

En regiones lluviosas es frecuente la presencia de importantes espesores de materiales alterados y meteorizados sobre los sustratos rocosos, y de niveles freáticos elevados que influyen decisivamente en las condiciones de estabilidad. El agua juega un doble papel negativo en la resistencia de los materiales como:

- Reduce la resistencia al corte por la generación de presiones intersticiales y por la reducción de los parámetros resistentes en determinados tipos de suelos.
- Aumenta los esfuerzos de corte por el incremento del peso del terreno y por la generación de fuerzas desestabilizadoras en grietas y discontinuidades.

2.7.1.3 Características morfológicas y geométricas

El relieve tiene un papel crucial, ya que, se requiere una inclinación específica para que ocurran los movimientos gravitacionales. Las áreas montañosas son las más susceptibles al movimiento en masa (Carrasco, 2017).

La conformación topográfica del talud, altura, pendiente, curvatura, largo y ancho actuando en forma conjunta o separada, afectan la estabilidad de un talud, por cuanto determinan los niveles de esfuerzos totales y las fuerzas de gravedad que provocan los movimientos.

Las propiedades resistentes o geomecánicas controlan la resistencia al corte de los materiales y su rotura. Los suelos, por su carácter homogéneo e isótropo presentan menor complejidad en su caracterización, mientras que, en los macizos rocosos, que pueden tener muy diferente grado de fracturación, serán las propiedades de la matriz, de las discontinuidades o del macizo rocoso en su conjunto, las que determinen la resistencia y el comportamiento (González de Vallejo, 2002).

2.7.2 Factores que desencadenan los movimientos en masa

En cuanto a los factores que provocan estos movimientos, los más relevantes que es posible resaltar son: las precipitaciones, las variaciones en las condiciones hidrogeológicas de las laderas, los cambios en la geometría, la erosión y los terremotos (González de Vallejo, 2002).

La actividad antrópica provoca alteraciones en la geometría y pendiente del terreno debido a los cortes efectuados para la construcción de vías de transporte, túneles, cimentaciones u otras edificaciones que generan cargas externas que modifican las condiciones del terreno incrementando las fuerzas desestabilizadoras (Luzuriaga & Egverto, 2018).

2.7.2.1 Precipitaciones y condiciones climáticas

(González de Vallejo, 2002), indica que el desencadenamiento de los movimientos de ladera por causas meteorológicas y climáticas está relacionado fundamentalmente con el volumen, la intensidad y distribución de las precipitaciones y con el régimen climático. También, señala que las lluvias, como factores que provocan remociones en masa, están vinculadas a su intensidad, duración y distribución.

(Kim et al., 2004), señala que la rápida infiltración de las precipitaciones, que provoca la saturación del suelo y un aumento temporal de la presión de los poros es el mecanismo por el cual se generan la mayoría de los deslizamientos de tierra superficiales durante las tormentas.

De esta manera, las precipitaciones de baja intensidad durante periodos prolongados y las lluvias intensas en lapsos cortos de tiempo pueden generar movimientos en masa en áreas donde las condiciones sean propicias (González de Vallejo, 2002).

2.7.2.2 Cambio del nivel del agua

El descenso repentino del nivel del agua (reducción rápida) en una pendiente puede desencadenar deslizamientos de tierra en presas de tierra, costas y en las orillas de lagos, embalses, canales y ríos. Este descenso puede ocurrir cuando el nivel de un río disminuye tras una inundación, cuando el agua en un embalse o canal baja bruscamente, o cuando el nivel del mar desciende después de prolongadas tormentas (Wieczorek, 1996).

(González de Vallejo, 2002), señala que la inestabilidad de laderas de embalses y lagos puede darse por el descenso brusco del nivel del agua, al permanecer los materiales de las laderas con elevadas presiones intersticiales que no se disipan con la misma velocidad del descenso del nivel del agua.

2.7.2.3 Procesos erosivos

La erosión en la parte inferior de las laderas, acantilados y escarpes provocada por factores como la erosión fluvial, litoral u otros, reduce la resistencia de estas zonas y modifica el equilibrio de tensiones. Esta situación, junto con la ausencia de soporte en la parte superior puede generar inestabilidad y propiciar deslizamientos o caídas de material (González de Vallejo, 2002).

2.7.2.4 Sismos

En las laderas, según las propiedades de los materiales, la intensidad del sismo y la distancia al epicentro pueden producirse desprendimientos de bloques, deslizamientos, flujos y avalanchas rocosas durante el movimiento del terreno (González de Vallejo, 2002).

(Suárez Díaz, 1998), señala que cuando ocurre un sismo, se producen vibraciones que se desplazan como ondas de diversas frecuencias. La aceleración, tanto vertical como horizontal, relacionada con esas ondas, provoca una variación en el estado de esfuerzos dentro del terreno, lo que impacta el equilibrio de los taludes.

2.7.2.5 Procesos antropogénicos

La actividad humana es una de las principales causas de los movimientos en los taludes. Aunque estos movimientos suelen tener consecuencias menos graves que los causados por fenómenos naturales, en ocasiones pueden generar daños de mayor magnitud (Ayala & Andreu, 1987).

(Suárez Díaz, 1998), indica que la actividad humana puede ser un desencadenante de cambios en el terreno. Estas actividades afectan la estabilidad de las laderas, tales como:

- Excavaciones en laderas: modificación de terrenos para proyectos civiles como caminos, viviendas y canales.
 - Explotación de canteras: obtención de materiales para diversas necesidades.
 - Sobrecarga: la acumulación de materiales residuales de minas, canteras y excavaciones, así como el peso adicional en viviendas y terraplenes en la cima o cuerpo de las pendientes.
 - Irrigación: construcción de embalses y presas.
 - Fugas de agua: mal mantenimiento de redes de drenaje en tanques y conductos.
 - Deforestación: tala excesiva o inadecuada de bosques y selvas.
 - Vibraciones del terreno: causadas por perforaciones, explosiones, paso de vehículos pesados o maquinaria.
 - Creación de vertederos con materiales sueltos: mala compactación de residuos industriales y urbanos.
 - Acciones de cuña y palanqueo: realizadas con cuñas, explosivos y trabajos manuales.
- Estas actividades impactan negativamente la estabilidad de las pendientes y pueden provocar deslizamientos de tierra.

CAPÍTULO III

ZONA DE ESTUDIO

3.1 Generalidades del Istmo de Panamá

Panamá, se sitúa estratégicamente sobre el istmo que enlaza América Central con América del Sur, abarcando una superficie aproximada de 75 416.69 km². Panamá, se ubica geográficamente en el hemisferio noroccidental con las siguientes coordenadas: latitud norte: 7°12' a 9°39', longitud oeste: 77°10' a 83°03'; también limita al norte con el mar Caribe, al sur con el océano Pacífico, al este con Colombia y al oeste con Costa Rica. Esta ubicación geográfica ha sido determinante tanto en el contexto histórico y económico del país, como en su configuración geológica (ANAM, 2010).

El territorio panameño está conformado por una estrecha franja terrestre de orientación este-oeste con un trazado sinuoso que marca el extremo sur del Istmo Centroamericano. Una cadena montañosa, cuyo relieve en su mayoría no supera los 1 500 metros sobre el nivel del mar, se extiende a lo largo del país y culmina en el volcán Barú (3 475 msnm), ubicado cerca de la frontera con Costa Rica. Esta formación divide a Panamá en dos vertientes hidrográficas bien diferenciadas: la vertiente del Caribe al norte y la del Pacífico al sur.



Figura 7. Mapa de Panamá con sus diferentes elevaciones y límites de provincias
(Fuente: ANAM, 2010)

3.1.2 El clima de Panamá

La ubicación geográfica de Panamá, próxima al ecuador terrestre, determina un régimen climático caracterizado por temperaturas y precipitaciones relativamente constantes a lo largo del año. Debido a su limitada extensión territorial, las variaciones climáticas entre regiones son poco marcadas. El país posee un clima predominantemente tropical, con condiciones cálidas y elevada humedad relativa, alcanzando una temperatura media anual cercana a los 27 °C (McKay, 2000).

Climáticamente, el año se divide en dos estaciones principales: una temporada lluviosa, que se prolonga desde finales de abril hasta noviembre, y una estación seca que abarca desde diciembre hasta aproximadamente marzo o inicios de abril. Durante el periodo seco, se intensifica la influencia de los vientos alisios del noreste. En cuanto al régimen pluviométrico, se registran diferencias entre vertientes: en la costa caribeña, las precipitaciones anuales pueden superar los 3 500 mm, mientras que en el litoral pacífico los valores oscilan en torno a los 2 300 mm (ANAM, 2010).

Estas diferencias son reforzadas por la geomorfología del istmo, la Cordillera Central y otras elevaciones orográficas actúan como barreras naturales para el paso de los vientos húmedos del Caribe. En la costa Pacífica se presentan afloramientos marinos estacionales, particularmente en el Golfo de Panamá, asociados al ascenso de aguas frías ricas en nutrientes por efecto de los vientos alisios. Este fenómeno no se observa en el Golfo de Chiriquí, donde la mayor estabilidad térmica favorece el desarrollo de arrecifes coralinos (Moya et al., 2015).

3.1.3 Geomorfología de Panamá

El Istmo de Panamá constituye una unidad geodinámica y fisiográfica de gran variedad, resultado de una prolongada interacción entre procesos tectónicos, volcánicos, sedimentarios y climáticos a lo largo del tiempo geológico.

Su geomorfología actual refleja la convergencia y colisión entre la microplaca de Panamá y las placas del Caribe, Cocos, Nazca y Sudamérica, lo que ha generado una notable diversidad en su relieve y estructura geológica (Bergoeing, 2015; Coates et al., 2005; Montes & Hoyos, 2019).

Desde el enfoque geomorfológico, la información se desarrolla de forma regional permitiendo identificar patrones particulares en distintas zonas del país. Por lo cual el Istmo de Panamá puede agruparse en tres grandes regiones geomorfológicas: zonas montañosas, regiones intermedias de colinas y cerros bajos y, planicies litorales. Cada una de estas unidades se asocia a contextos geológicos específicos y procesos morfogenéticos distintos.

3.1.3.1 Cordilleras y zonas montañosas

Las principales zonas montañosas del Istmo de Panamá comprenden:

- Cordillera Central (Serranía de Tabasará): la continuación de la Cordillera de Talamanca (Costa Rica), forma parte del Arco Volcánico Centroamericano que incluye el volcán Barú (3 474) msnm, el punto más alto del país con evidencias de actividad reciente (Sagel et al., 2025). su origen está vinculado a procesos de subducción oceánica y actividad volcánica durante el Mioceno.

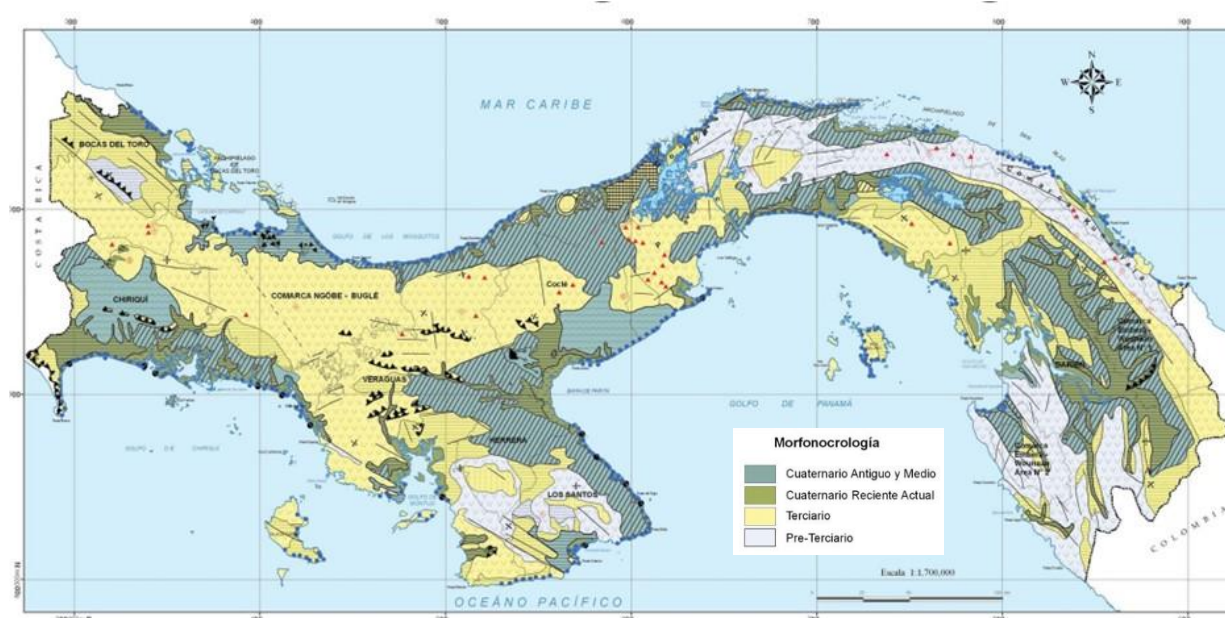


Figura 8. Mapa de las diferentes edades de roca en Panamá. Fuente (ANAM, 2010)

Según (Montes & Hoyos, 2019), la cordillera fue elevada por engrosamiento cortical asociado a la colisión entre la microplaca de Panamá y el margen noroccidental de Sudamérica. Este levantamiento se produjo en un contexto de transición desde una margen oceánica activa hacia un margen continental colisionante. La Cordillera Central está compuesta por rocas ígneas del Terciario y depósitos piroclásticos (Montes et al., 2020; LeBlanc, 2021; Terry, 1956).

- La Serranía de San Blas y la Cordillera de Majé: se ubican al este del Canal de Panamá y constituyen dos sistemas montañosos paralelos que delimitan la depresión central del Darién. La Cordillera de San Blas, situada al norte de la región, se extiende a lo largo del litoral caribeño (Bergoeing, 2015). La Cordillera de San Blas está conformada por rocas volcánicas cretácicas indiferenciadas que incluyen lavas andesíticas y basálticas, volcanoclásticas como variedad aglomerada y tobas; así como rocas intrusivas granodioritas, cuarzodioritas, tonalita, dioritas, sienita y granito (LeBlanc, 2021).
- Montañas del Darién, Serranías del Bagre y del Sapo: forman parte del bloque de Chocó (Cretácico-Eoceno). Conforman terrenos ígneos y sedimentos marinos deformados; forman un cinturón estructural complejo, con fallas activas y sinclinales profundos (LeBlanc, 2021; Marshall, 2007).

3.1.3.2 Regiones de colinas y cerros bajos

En estas regiones es factible encontrar diferentes áreas de transición entre montañas y cuencas, con altitudes de 400 – 900 msnm:

- Península de Azuero y Soná: en el suroeste del país, las penínsulas de Soná y Azuero conforman un extenso promontorio de antearco que se proyecta más de 100 km hacia el océano Pacífico delimitando los golfos de Chiriquí y Panamá. Ambas penínsulas poseen cordilleras internas que superan los 500 m de altitud y están separadas de la cordillera volcánica septentrional por una franja de tierras bajas orientadas este-oeste (Marshall, 2007)

La región está cortada por la Falla Soná-Azuero, una estructura de desgarre lateral izquierdo que genera escarpes prominentes y valles fluviales lineales a lo largo de una franja de 40 km de ancho, las rocas del basamento metamórfico de las penínsulas de Azuero y Soná, Panamá, consisten en anfibolitas esquistosas y pequeñas cantidades de metasedimento (Mann & Corrigan, 1990; Tournon et al., 1989).

(Marshall, 2007), señala que la Falla Soná-Azuero divide dos zonas con una litología diferente: al sur, afloran basaltos oceánicos homogéneos del Cretácico; al norte, un complejo volcánico heterogéneo del Cretácico tardío al Eoceno compuesto por basaltos, rocas intrusivas y lavas intermedias.

Provincia de Bocas del Toro: la provincia de Bocas del Toro presenta una compleja configuración tectónica, caracterizada por sistemas de fallas y pliegues con orientación noreste-sureste, que definen su relieve y dinámica geológica (ANAM, 2010).

(LeBlanc, 2021), indica que se observan formaciones como las colinas de Senosri y Almirante, donde predominan pliegues asociados a fallas inversas y cabalgamientos. Estas estructuras reflejan la compresión cortical vinculada a la interacción entre las placas Caribe y Nazca, típica del Cinturón Deformado del Norte de Panamá.

- Bordes del Canal de Panamá: la región de transición entre la Cordillera Central y las planicies del Pacífico en el área del Canal de Panamá está caracterizada por un relieve de altitudes medias entre 300 y 800 metros sobre el nivel del mar. Este relieve se asienta sobre una serie de formaciones volcánicas terciarias principalmente del Oligoceno y Mioceno como la Formación Bas Obispo y unidades asociadas del Grupo Panamá (Marshall, 2007). (Bergoeing, 2015), señala que las colinas presentan formas multiconvexas y están sujetas a una intensa meteorización química en condiciones tropicales húmedas, lo cual ha dado lugar a perfiles de suelo laterítico bien desarrollados.

3.1.3.3 Regiones bajas y llanuras costeras

- Zona del Canal: esta constituye una cuenca tectónica producto de una depresión de antearco, estructuralmente limitada por fallas activas como las de Limón y Pedro Miguel. Esta región está compuesta por unidades sedimentarias del Eoceno al

Plioceno como las formaciones Bohío, Caimito, Culebra y Gatún depositadas en ambientes marinos y fluviales (LeBlanc, 2021; Woodring, 1957). Estas capas están dispuestas en sinclinales marinos y muestran una historia de subsidencia progresiva y plegamiento suave (Woodring, 1957).

- Llanuras del Golfo de Chiriquí y Bocas del Toro: (LeBlanc, 2021), señala que, las llanuras costeras se formaron sobre depósitos marinos cuaternarios, manglares y arrecifes coralinos construidos sobre plataformas someras asociadas a la formación Gatún y otras unidades marinas recientes.
- Depresión del Darién (ríos Tuira y Chucunaque): llanura aluvial extensa delimitada por serranías costeras y conformada por sedimentos terciarios y cuaternarios. Corresponde a una cuenca sinclinal activa rellena por secuencias de origen fluvial y marino, como las formaciones Yaviza, Tuira y Chucunaque (Coates et al., 2004; LeBlanc, 2021).

3.1.4 Tipos de rocas en Panamá

Panamá, presenta una geología notablemente compleja que se refleja en la diversidad de tipos de rocas distribuidas a lo largo del istmo. Estas se agrupan principalmente en tres categorías: ígneas, sedimentarias y metamórficas, cuyas características, distribución y cronología han sido detalladas en trabajos fundamentales como los de (LeBlanc, 2021; Terry, 1956; Woodring, 1973).

3.1.4.1 Rocas ígneas

Las rocas ígneas constituyen una parte predominante del territorio panameño, especialmente en la región occidental del país. Estas incluyen basaltos, andesitas, dacitas, diabasas, gabros y granitos. (Terry, 1956), señala que aproximadamente la mitad de la superficie del país está compuesta por rocas ígneas, en su mayoría extrusivas de composición básica, asociadas a antiguos arcos volcánicos. Ejemplos relevantes se encuentran en la Cordillera Central, la Península de Azuero, Chiriquí y sectores del Canal de Panamá.

(LeBlanc, 2021), identifica múltiples formaciones ígneas como Pedro Miguel, Bas Obispo y Panamá, compuestas por tobas, aglomerados, dacitas y lavas andesíticas que datan del Oligoceno al Mioceno. Estas unidades están ligadas a episodios de actividad volcánica submarina que caracterizaron el desarrollo del arco ígneo panameño.

3.1.4.2 Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias están ampliamente representadas en las zonas bajas y cuencas del país. Incluyen calizas, areniscas, limolitas, arcillas, conglomerados y depósitos volcanoclásticos. (Terry, 1956) destaca la presencia de extensas secuencias terciarias en el Darién, compuestas por lutitas, turbas y conglomerados marinos y continentales.

(LeBlanc, 2021), proporciona un análisis estratigráfico detallado de unidades sedimentarias como las formaciones Gatún, Culebra, Caimito y Bohío, que abarcan desde el Eoceno al Plioceno, depositadas en ambientes marinos, costeros y fluviales. Estas rocas se distribuyen principalmente en la Zona del Canal, Bocas del Toro, Darién y otras áreas litorales como Burica y Tonosí.

3.1.4.3 Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas son menos abundantes, pero están presentes en regiones aisladas como el Darién, Veraguas, Chiriquí y la Península de Azuero (ANAM, 2010).

Según (Terry, 1956), estas rocas incluyen esquistos, pizarras y argilitas metamorfoseadas por contacto con intrusiones ígneas. Se identifican en localidades como los ríos Marea y Congo (Darién), el Morro de Puercos (Azuero) y el río Chiriquí.

3.1.5 Tectónica de Panamá

La configuración tectónica de Panamá está dominada por dos elementos principales: la microplaca de Panamá y la zona de fractura de Panamá. Ambos sistemas estructurales son fundamentales para entender la evolución geológica del istmo, la distribución de los recursos geológicos y la actividad sísmica regional.

3.1.6 Microplaca de Panamá

El bloque de Panamá, también conocido como microplaca de Panamá, es una unidad tectónica ubicada entre las placas del Caribe (al norte), Cocos (al suroeste), Nazca (al sur) y Sudamérica (al este). Este bloque presenta un desplazamiento hacia el noreste con una rotación en sentido horario (Kellogg & Vega, 1995; Alvarado et al., 2016).

Sus límites geológicos y sísmicos están definidos por cinturones de deformación tectónica:

- **Al norte:** el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (NPDB), un sistema de fallas inversas submarinas, generado por la convergencia con la placa Caribe. Esta zona registra sismos profundos, hasta 80 km, y aloja la zona de subducción incipiente bajo el Caribe (Adamek et al., 1988; Camacho et al., 2010).
- **Al sur:** el Cinturón Deformado del Sur (SPDB) se extiende por la Fosa de Panamá, donde la placa Nazca subduce oblicuamente bajo el bloque de Panamá con un ángulo $<20^\circ$ (Silver et al., 1990).
- **Al este:** el Cinturón Deformado del Este (EPDB) corresponde al frente de colisión activa con la placa Sudamericana, zona que ha generado elevación tectónica y actividad sísmica en el Darién (Morell, 2016).
- **Al oeste:** una zona de fallamiento difuso y un lineamiento gravimétrico de orientación NE–SW marca la frontera con Costa Rica (Montero, 2001; Marshall et al., 2000).

Un evento tectónico destacado es el terremoto de San Blas de 1882 (Mw 7.9), asociado al NPDB, que provocó un tsunami y se considera evidencia de subducción activa en el Caribe panameño (Mendoza & Nishenko, 1989).

(Montero et al., 1994), señala que el bloque de Panamá se divide en cinco zonas sismogénicas en el territorio panameño. Empezando en el suroeste y moviéndose en el sentido contrario de las manecillas del reloj, estas son la zonas de Chiriquí, la región de Azuero, la zona este de la Península de Azuero y sur del Golfo de Panamá, la zona Este y la zona Caribe.

3.1.7 Zona de Fractura de Panamá

La Zona de Fractura de Panamá constituye un límite tectónico transformante activo entre las placas oceánicas de Cocos y Nazca, situada en el margen suroeste del país. Se origina como una falla oceánica dextral (de desplazamiento lateral derecho) en el extremo este del centro de dispersión Coco-Nazca, y a partir de los 6°N de latitud se bifurca en dos fallas principales (Adamek et al., 1988).

Este sistema se encuentra en una región de convergencia tectónica compleja donde confluyen las placas de Cocos, Nazca y la microplaca de Panamá. La Fosa Mesoamericana desaparece en esta zona, que conecta con el límite entre la placa Nazca y la microplaca de Panamá, ubicada al sur del istmo (Camacho, 1991).

3.2 Zona de estudio corregimiento de Nueva California-distrito de Tierras Altas - provincia de Chiriquí

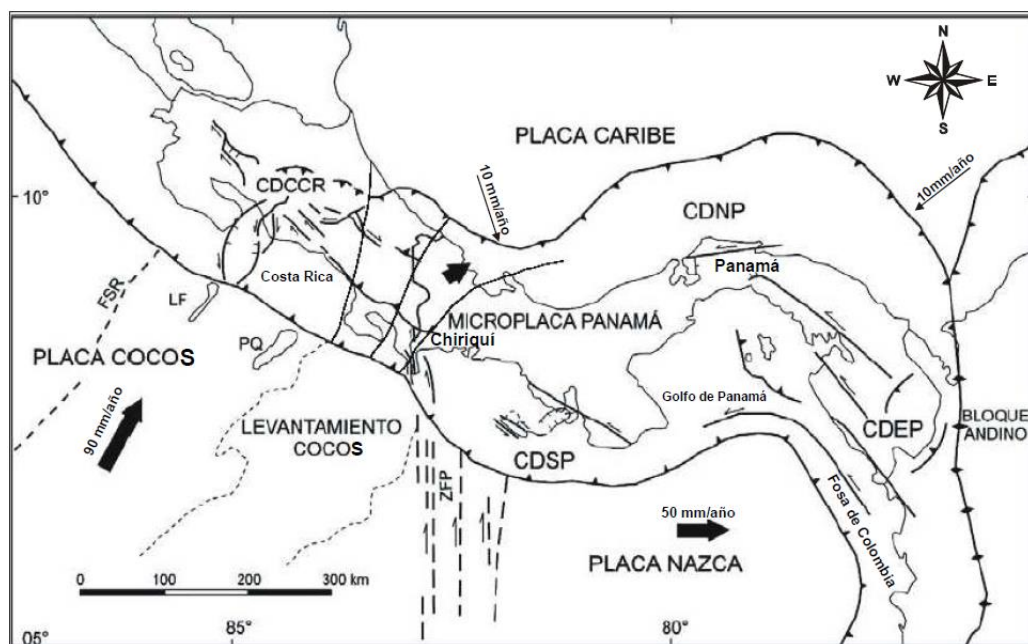


Figura 8. Las diferentes placas tectónicas que interactúan con la microplaca de Panamá
Fuente: (Montero, 2001)

3.2.1 Características generales de la provincia de Chiriquí

La provincia de Chiriquí, localizada en el extremo occidental de Panamá, colinda al norte con Bocas del Toro, al este con Veraguas, al sur con el Océano Pacífico y al oeste con Costa Rica. Es una de las regiones más diversas topográfica, climática y ecológicamente del país destacándose por su altitud, abundantes precipitaciones y productividad agrícola (ANAM, 2010).

El relieve es dominado por la Cordillera Central, que en esta zona alcanza sus máximas altitudes, con picos como el volcán Barú (3 474 m s. n. m.), el más alto del país. Las pendientes escarpadas y los valles profundos reflejan una intensa actividad geológica y procesos erosivos significativos. Las regiones del norte son más elevadas y húmedas, mientras que las del sur presentan llanuras costeras (ANAM, 2010; ETESA, 1999).

Desde el punto de vista geológico, Chiriquí se compone en su mayoría por rocas volcánicas del Terciario y Cuaternario, como andesitas, basaltos, tobas y lavas, así como sedimentos aluviales recientes. Estas formaciones dan lugar a suelos fértiles que sustentan la actividad agrícola en el área (ETESA, 1999).

3.2.2 Clima y precipitaciones

Según (ANAM, 2010), el clima en Chiriquí varía con la altitud, en las zonas altas como Boquete, Cerro Punta y Bambito; se registra una media anual de precipitaciones entre 6 000 y 7 000 mm, dominada por lluvias orográficas y nieblas persistentes. Por otro lado, las tierras bajas, como David y Puerto Armuelles, reciben entre 2 000 y 2 800 mm/año (ETESA, 1999).

3.3 Corregimiento de Nueva California, Distrito de Tierras Altas

Nueva California, es uno de los cinco corregimientos junto a Cuesta de Piedra, Paso Ancho, Cerro Punta y Volcán que conforman el distrito de Tierras Altas, creado el 13 de septiembre del 2013 mediante la Ley 55. Es el corregimiento más extenso, con una superficie de 123.1 km² y una población de 5 995 personas, (INEC, 2023).

Se localiza al este de Bambito en las coordenadas geográficas 8°50'37"N 82°41'00"O, es un entorno montañoso caracterizado por un clima tropical de montaña, con temperaturas

promedio entre 11 °C y 24 °C y precipitaciones anuales superiores a 3 700 mm alcanzando valores de hasta 6 000 mm. (ANAM, 2010).

La topografía del corregimiento presenta pendientes pronunciadas, suelos volcánicos fértiles y cobertura boscosa natural y secundaria. Estas condiciones permiten el desarrollo de actividades agrícolas especializadas como: café, hortalizas y flores (ANAM, 2010).

Es viable mencionar que en el área se reconocen dos grandes unidades geológicas según el mapa geológico de Panamá, las cuales se pueden visualizar en la Figura 11.

1. (QPS-BA), Cuaternario (2.58 Ma – Presente) – Formación Barú

Corresponde a depósitos y productos volcánicos recientes asociados al volcán Barú. Incluye basaltos, andesitas, cenizas volcánicas, tobas aglomeradas y lavas, típicos de actividad volcánica explosiva y efusiva del periodo Cuaternario.

2. (TM-CAvi), Terciario (66 – 2.58 Ma) – Grupo Cañazas, Formación Virigua

Representa rocas volcánicas más antiguas formadas durante el Terciario. Está compuesta por andesitas, basaltos, brechas volcánicas, tobas, bloques, cuerpos subintrusivos, varios conjuntos de diques (*dike swarms*) y sedimentos volcánicos indicando un ambiente geológico dominado por volcanismo intenso y estructuración magmática.

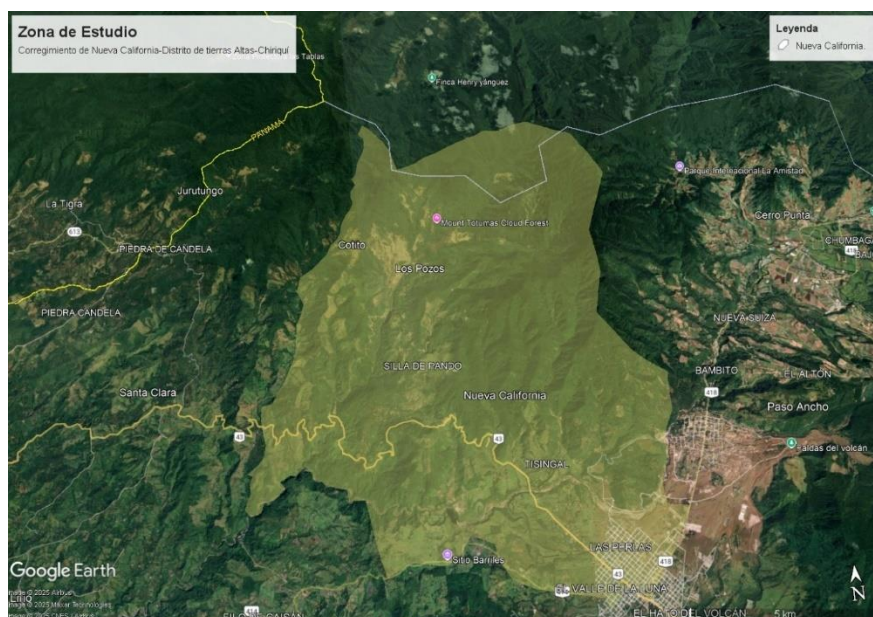


Figura 9. Ubicación de la zona de estudio. Fuente: (Google earth pro.)

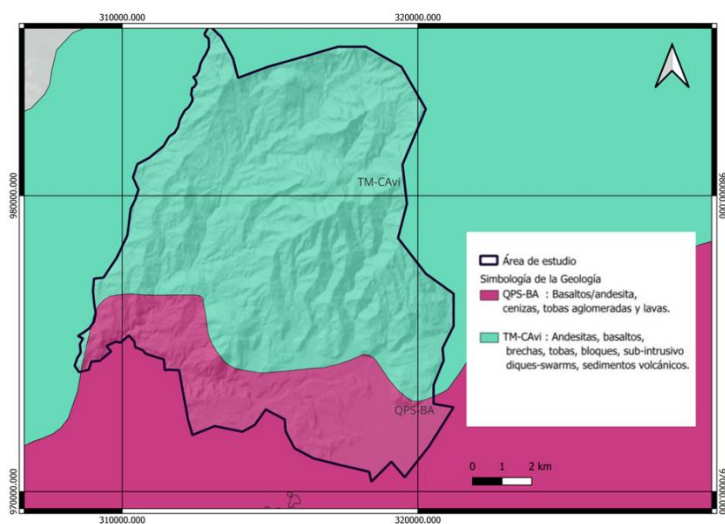


Figura 10. Diferentes formaciones geológicas en Nueva California. Fuente (MICI, 1990)

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4. Metodología para la elaboración de inventarios de deslizamientos usando Google Earth pro

4.1 Antecedentes

El inventario de deslizamientos constituye el pilar fundamental para el desarrollo del modelo de susceptibilidad mediante el método del índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI). Este inventario permite identificar la distribución espacial de eventos previos de deslizamiento, sirviendo como referencia para correlacionarlos con los factores condicionantes del terreno.

Uno de los métodos más accesibles y replicables para la construcción de este inventario es el uso de imágenes satelitales históricas disponibles a través de plataformas como Google Earth Pro. Esta herramienta ofrece imágenes multitemporales con alta resolución espacial, permitiendo al analista interpretar y digitalizar manualmente cicatrices de deslizamiento visibles, incluso en regiones de difícil acceso.

Según Bennett et al. (2016), el análisis visual en Google Earth es comparable en precisión al uso de ortofotos, especialmente cuando se integra una revisión temporal desde décadas anteriores. Estos autores emplearon imágenes satelitales desde 1988 hasta 2014 para cartografiar eventos de deslizamiento, apoyándose en criterios visuales como pérdida de vegetación, escarpes activos, acumulación de material en la base del talud y otros patrones morfológicos identificables.

De forma similar, Fisher et al. (2012), destacan la efectividad de Google Earth Pro como herramienta para investigaciones geológicas y geomorfológicas dada su facilidad de uso y disponibilidad gratuita. Subrayan que las imágenes deben interpretarse con conocimiento experto considerando la iluminación solar, la topografía local y las condiciones climáticas de las fechas observadas.

Teniendo en cuenta las antecedentes investigaciones utilizando el programa, se ideó una metodología que ayude al realizar el inventario de diferentes movimientos en masa ocurridos:

Selección del área de estudio:

- Delimita la zona de estudio mediante coordenadas o polígonos vectoriales en QGIS y la exporta como archivo KML para usarla en Google Earth Pro.
- Se crearon diferentes polígonos dentro de la zona de estudio, para una mejor evaluación de las imágenes satelitales.

Revisión de imágenes multitemporales:

- Se usaron imágenes de distintas fechas (2015-2024) disponibles en el historial de Google Earth.
- La comparación entre años permite identificar movimientos activos (cambios en vegetación, escarpes y desplazamientos del terreno).

Identificación visual de deslizamientos:

- Se reconocen por su morfología característica: cicatrices, zonas de arrastre, acumulación, vegetación más clara o removida para poder realizar la clasificación.

Digitalización manual en Google Earth Pro:

- Se trazan los polígonos directamente sobre las zonas afectadas.
- Se nombra y agrupa cada movimiento en masa según la fecha estimada en que ocurrieron.

Exportación del inventario:

- Se guarda como archivo KML/KMZ y se convierte en archivo de formato *shapefile* para su análisis en QGIS.

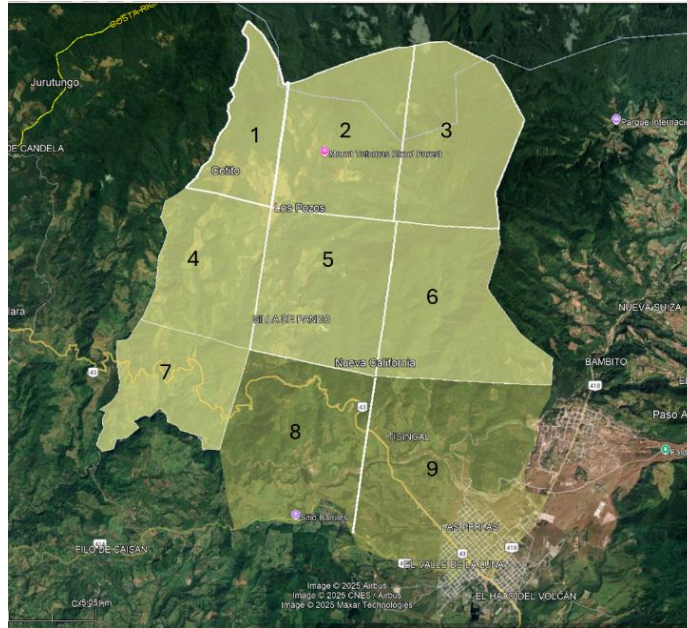


Figura 11. Zona de estudio y los diferentes polígonos en que se dividieron para llevar un mejor orden en el análisis de las imágenes satelitales. Fuente: (Google Earth pro).

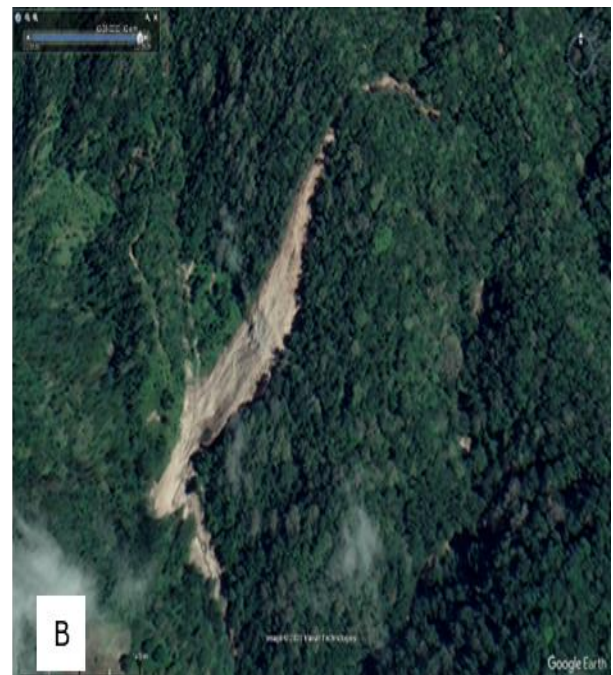


Figura 12. La imagen A no muestra ningún cambio en enero del 2020 y la imagen B muestra que ocurrió un movimiento en masa en la región en diciembre del 2020



Figura 13. *Interpretación de la masa desplazada y cartografía digital*
Fuente: (Google Earth pro.)

4.2 Parámetros seleccionados para el estudio

En la elaboración del índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI), la selección de variables condicionantes es un paso fundamental, pues permite reflejar los factores que influyen directamente en la ocurrencia de inestabilidades de ladera. En este estudio se incorporaron siete parámetros: pendiente, orientación (aspecto), curvatura, cobertura boscosa, cercanía a ríos y la red vial (calles de tierra y calles asfaltadas). Estos factores fueron elegidos por su relevancia geomorfológica, hidrológica y antrópica, y por su disponibilidad en formato geoespacial derivado del modelo digital de elevación (DEM) y otros datos disponibles en la web.

a. Pendiente

La pendiente es uno de los factores más determinantes en la estabilidad de las laderas, ya que, el incremento de la inclinación eleva las tensiones gravitacionales favoreciendo el movimiento de masas. Diversos estudios destacan la pendiente como la variable con mayor

peso explicativo dentro de los modelos LSI y FR (Muhimbula et al., 2025; Tesfaye et al., 2024). En este estudio, la pendiente se obtuvo a partir del análisis de terreno sobre el DEM, expresada en grados. Se considera que valores superiores a 30° están frecuentemente asociados a zonas inestables (Van et al., 1997).

b. Orientación (aspecto)

El aspecto u orientación de la ladera controla la exposición solar, el régimen de humedad y el microclima del suelo, influyendo en los procesos de meteorización y estabilidad del terreno. Se mide en el sentido de las agujas del reloj, de 0° a 360°, donde 0° y 360° corresponden al norte, como se muestra en la Figura 14. Las áreas planas sin dirección de flujo reciben un valor de -1. Para este estudio, el aspecto se clasificó en ocho direcciones cardinales (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) y una categoría adicional de zonas planas. Investigaciones previas en África Oriental y Asia evidencian que ciertas orientaciones acumulan mayor humedad incrementando la susceptibilidad (Getachew & Meten, 2021; Lu et al., 2023).

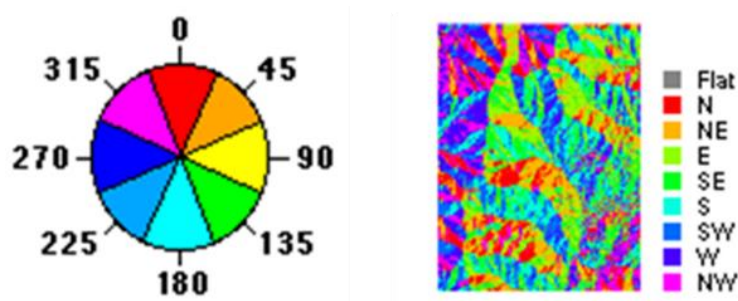


Figura 14. La imagen muestra los diferentes ángulos y qué dirección representa según los puntos cardinales. Fuente: (ESRI, 2023)

c. Curvatura

La curvatura describe la forma del terreno y determina si una superficie es cóncava, convexa o plana. Este parámetro se deriva del DEM mediante herramientas de análisis de curvatura (perfil, plana y planimétrica). En este trabajo se priorizó la curvatura de perfil, por su relación directa con la aceleración del flujo superficial y la acumulación de agua, factores que afectan la estabilidad del suelo. Las zonas cóncavas tienden a acumular humedad y sedimentos, aumentando la inestabilidad, mientras que las convexas son generalmente más estables esto

se puede comprender con la Figura 15. Modelos estadísticos en Etiopía y China confirman que la curvatura es un predictor significativo de la distribución de deslizamientos (Getachew & Meten, 2021; Lu et al., 2023).

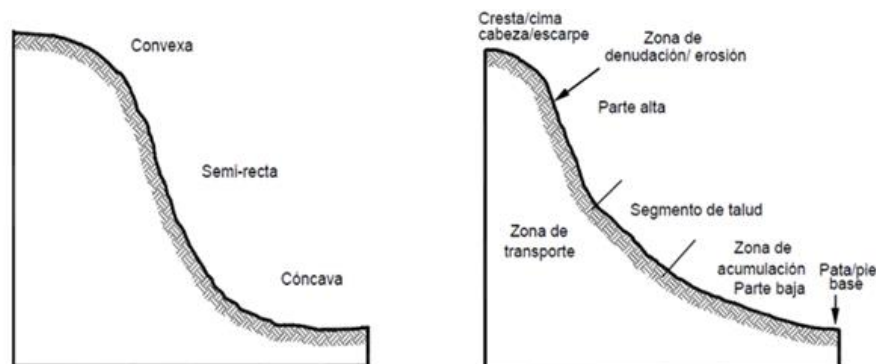


Figura 15. El diagrama de la izquierda muestra la forma de un talud y a la derecha las diferentes zonas de transporte y deposición de sedimentos. Fuente: (Díaz, 2009)

d. Cobertura boscosa

La cobertura vegetal actúa como factor protector frente a los deslizamientos, pues las raíces estabilizan el suelo, interceptan lluvias y reducen la escorrentía. Meneses et al. (2019), demostraron que las zonas con mayor cobertura forestal presentan una menor propensión a deslizamientos, mientras que las áreas deforestadas o agrícolas incrementan el riesgo. Para este análisis se utilizó la capa de cobertura boscosa obtenida del (SINIA, 2021).

e. Cercanía a ríos

La proximidad a ríos y quebradas es un factor determinante, debido a que la erosión lateral debilita las bases de los taludes y modifica su equilibrio. La distancia se calculó mediante la herramienta de distancia euclidiana aplicada a la capa vectorial de ríos generando un ráster que representa la distancia desde cada celda al cauce más cercano. Estudios en Tanzania e Indonesia confirman que la cercanía a los ríos es una de las variables topográficas más influyentes en los mapas de susceptibilidad (Muhimbula et al., 2025; Silalahi et al., 2019).

f. Red vial (calles de tierra y calles asfaltadas)

La red vial fue incluida por su influencia antrópica sobre la estabilidad del terreno. Los caminos y carreteras modifican el drenaje natural, generan cortes en laderas y aumentan las cargas dinámicas sobre los suelos. (Meneses et al., 2019), identificaron que los caminos no pavimentados incrementan la susceptibilidad local a los deslizamientos, mientras que Tesfaye et al. (2023), demostraron la importancia de incorporar la red vial en los modelos de zonas montañosas.

4.3 Reclasificación de variables para el LSI

La reclasificación de las capas temáticas constituyó un paso esencial para la aplicación del modelo de índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI). Este procedimiento permitió transformar variables continuas y categóricas en clases discretas con el fin de calcular la frecuencia relativa de deslizamientos en cada categoría y establecer su peso dentro del modelo estadístico.

La reclasificación se realizó para poder homogenizar las características del terreno para que puedan ser comparadas estadísticamente con el inventario de deslizamientos. Cada categoría se asoció a un rango específico de valores y posteriormente se calcularon los índices $N(m,n)/A(m,n)$ para compararlos con N_T/A_T , según lo propuesto por Lee y Pradhan (2007), y utilizado ampliamente en estudios posteriores (Santamaría et al., 2021; Yilmaz, 2010).

4.4 Bases teóricas y metodológicas del análisis de susceptibilidad a deslizamientos (LSI)

4.4.1 Introducción al LSI

El índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI, por sus siglas en inglés: Landslide Susceptibility Index) es una técnica basada en el análisis estadístico que permite determinar la probabilidad espacial de ocurrencia de deslizamientos considerando una serie de factores condicionantes del terreno y esto se obtiene a través de los usos de los SIG. En el LSI, se quiere saber qué tan fuerte es la relación entre los deslizamientos y los factores condicionantes (pendiente, litología, cobertura, ríos, etc.).

Cada parámetro del terreno se divide en clases (intervalos de pendiente, tipos de cobertura, distancias a ríos, etc.) y para cada clase se calcula la razón de frecuencia (FR), definida como la relación entre la densidad de deslizamientos en la clase y la densidad promedio del área de estudio (Lee & Pradhan, 2007; Heinz & Saavedra, 2019).

Una característica importante del método es que puede aplicarse tanto a modelos ráster basados en píxeles como a modelos vectoriales basados en áreas o polígonos. En su forma más común, el LSI se implementa sobre capas ráster, donde cada píxel representa una unidad mínima del terreno, permitiendo una evaluación espacial continua. En este enfoque, los valores N_i y A_i se derivan del conteo de píxeles que contienen deslizamientos y del número total de píxeles que conforman una clase del factor (Santamaría et al., 2021).

Sin embargo, diversos estudios han demostrado que, también es posible trabajar con unidades de área, tales como polígonos de cobertura de suelo, clases de geología, cuencas, subcuencas o sectores geomorfológicos. En este caso, la relación se expresa a partir del área física en km² o m² correspondiente a cada clase (Medina et al., 2021). Esto hace que el método sea flexible, permitiendo su uso en escalas locales o regionales, así como en zonas donde los datos ráster de alta resolución no están disponibles.

De acuerdo con Heinz & Saavedra (2019), el método es matemáticamente equivalente cuando se expresa en función del número de píxeles o del área total, siempre que la densidad de deslizamientos se calcule como razón entre evento/superficie garantizando la consistencia estadística del modelo.

Para estabilizar la variación entre clases y permitir comparaciones entre factores, se aplica una transformación logarítmica base 10:

$$LSI_i = \log_{10}(FR_i)$$

Valores positivos indican una mayor propensión a deslizamientos y valores negativos indican una menor contribución relativa. Su interpretación es directa: cuanto mayor es el valor del $\log_{10}$, mayor es la influencia de la clase sobre la ocurrencia de deslizamientos.

El uso del logaritmo en el LSI ha sido ampliamente utilizado en (Lee & Pradhan, 2007; Santamaría et al., 2021), ya que, evita concentraciones extremas de FR y permite comparar factores muy distintos (pendiente, curvatura, uso de suelo, etc.) bajo una escala común. Asimismo, su aplicación sobre áreas o píxeles mantiene exactamente el mismo fundamento matemático.

4.5 Fundamento teórico

El LSI se basa en la relación estadística entre la ocurrencia de deslizamientos conocidos (inventario) y los factores del medio físico que influyen en su aparición. A través de la clasificación de cada factor en intervalos se determina cuánta superficie con deslizamientos hay en cada clase y se compara con la superficie total de dicha clase. Esto permite identificar qué combinaciones de condiciones son más propensas a presentar deslizamientos (Lee & Pradhan, 2007; Santamaría et al., 2021).

Fórmulas del LSI (razón de frecuencia):

$$LSI_{(m,n)} = \left(\frac{N_{(m,n)}}{A_{(m,n)}} / \frac{N_T}{A_T} \right) \quad \text{Ó} \quad LSI = \frac{N_{pixeles}(Si)/N_{pixeles}(Ni)}{\Sigma N_{pixeles}(S)/\Sigma N_{pixeles}(N)}$$

La metodología empleada en este estudio calcula el índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI) mediante la comparación entre la densidad de deslizamientos por categoría y la densidad promedio de deslizamientos en toda el área de estudio.

Donde:

- $N_{(m,n)}$: número de deslizamientos registrados dentro de la clase m, n .
- $A_{(m,n)}$: área total de la clase m, n (en m²).
- N_T : número total de deslizamientos inventariados (en este estudio, 115 eventos).
- A_T : área total del territorio analizado (en este estudio, 123 073 716.3 m²).

Esta ecuación expresa un principio estadístico sencillo, sobre cuánto mayor (o menor) es la concentración de deslizamientos en una clase específica respecto al promedio del territorio.

1. Primera parte:

$$\frac{N_{(m,n)}}{A_{(m,n)}}$$

Esto calcula la densidad de deslizamientos en cada categoría. Ejemplo: número de deslizamientos por metro cuadrado en una clase de pendiente, curvatura, aspecto, etc.

2. Segunda parte:

$$\frac{N_T}{A_T}$$

Esto representa la densidad promedio de deslizamientos para toda el área de estudio.

3. Relación entre ambas:

$$LSI = \frac{\text{densidad por clase}}{\text{densidad promedio}}$$

Una vez calculado el valor del LSI para cada categoría dentro de un parámetro (por ejemplo: Pendiente clase 2, 3, 4, 5), es necesario determinar cuál es el aporte total del parámetro al modelo general. Para ello se realiza la sumatoria de los LSI individuales:

$$LSI_{\text{parámetro}} = \sum LSI_{(m,n)}$$

Esta suma permite identificar el peso estadístico natural que tiene cada parámetro según su comportamiento frente a los deslizamientos.

Ese valor representa la susceptibilidad total, cuanto mayor sea, mayor es la probabilidad relativa de ocurrencia de deslizamientos.

La validación del modelo puede realizarse de dos formas principales:

1. Clasificación de susceptibilidad: se agrupan los valores del mapa LSI en clases de riesgo de muy bajo, bajo, moderado, medio alto y alto o en dos categorías (estable/inestable). Luego, se calcula el porcentaje de deslizamientos reales que caen en cada clase. Cuanto mayor sea el porcentaje de deslizamientos en las clases altas, mejor es el modelo.
2. Curva de tasa de éxito (Success Rate Curve): es un método estadístico que permite determinar cuán bien el mapa de riesgo clasifica las zonas donde ya han ocurrido deslizamientos. Se ordenan los valores de LSI desde el más alto al más bajo y se divide el mapa en intervalos iguales del histograma. Para cada clase, se calcula el porcentaje de deslizamientos que se encuentran en ella y se grafica en una curva acumulada: porcentaje del área en el eje X y porcentaje de deslizamientos en el eje Y. Una curva más pronunciada indica mejor rendimiento del modelo.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUCIONES

5.1 Inventario de deslizamientos

El inventario de deslizamientos constituye la base fundamental del análisis de susceptibilidad realizado en el presente estudio. A través de la fotointerpretación de imágenes satelitales Google Earth Pro (2014-2024), de los cuales los años 2024, 2016, 2017, 2022 y 2023 no se evaluaron por la falta en la resolución de la imagen.

Se logró identificar un total de 158 deslizamientos dentro del área de estudio. La distribución temporal de los eventos muestra una marcada variabilidad interanual, con un incremento significativo a partir del año 2019, visualizados en la Figura 16.

Tabla 2. *Inventarios de movimientos en masa (158) mediante el análisis de imágenes satelitales (2015-2024)*

Año	N.º de deslizamientos
2015	4
2018	5
2019	11
2020	32
2021	102
2024	4

Los resultados indican que los años 2020 y 2021 concentraron aproximadamente el 85 % de los deslizamientos totales. Este fenómeno coincide temporalmente con la emergencia

generada por los huracanes Eta e Iota, que, aunque no tocaron tierra en Panamá, provocaron intensas lluvias, desbordamientos de ríos y derrumbes en la región occidental de Panamá.

5.2 Elaboración de capas del DEM de 5 m

El modelo digital de elevación (DEM) utilizado para este estudio fue obtenido del Instituto Geográfico Nacional “Tommy Guardia” con una resolución espacial de 5 metros, lo que permitió un análisis detallado de la morfología del terreno en el área de estudio. A partir de este modelo se generaron las principales variables topográficas empleadas en el análisis de susceptibilidad a deslizamientos, tales como la pendiente, la orientación de laderas (*aspect*)

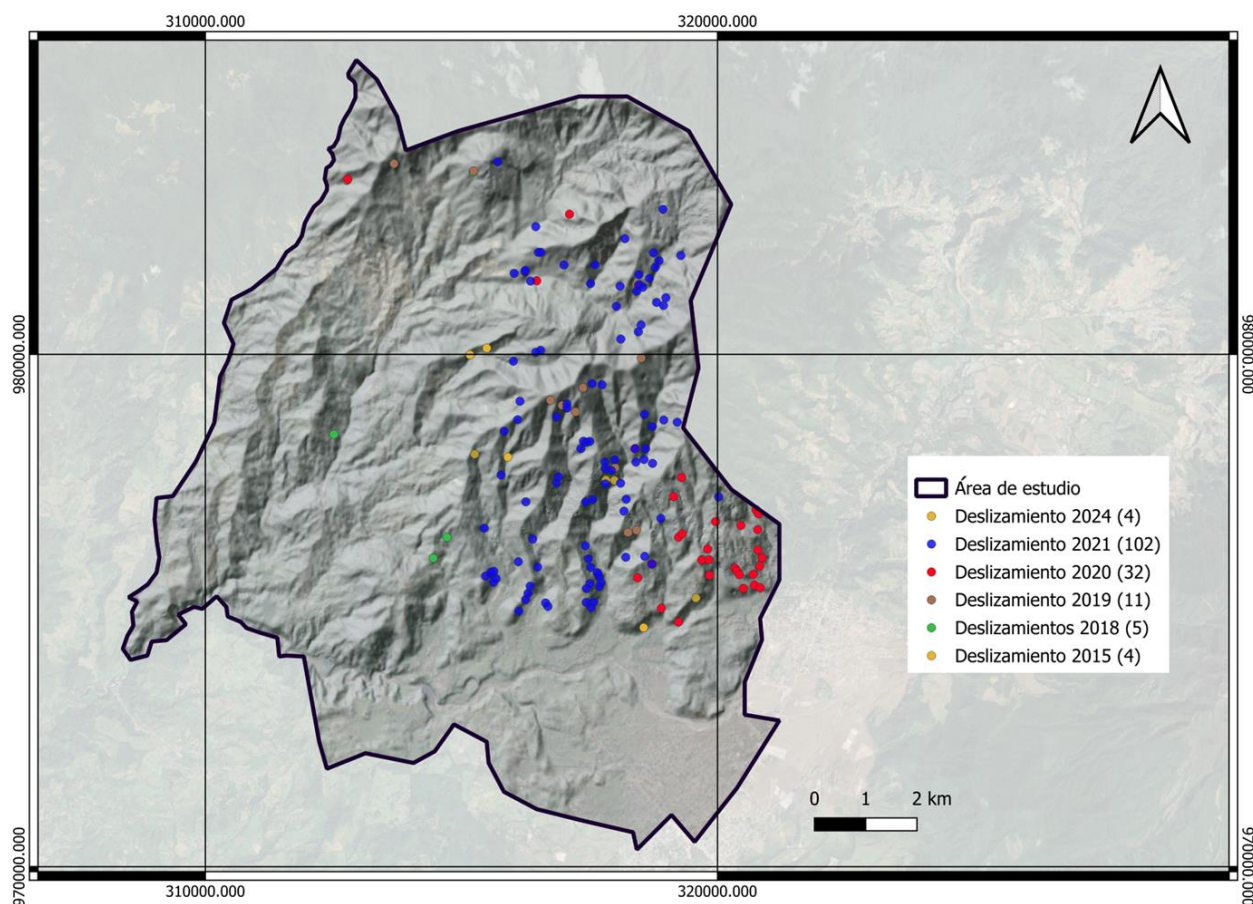
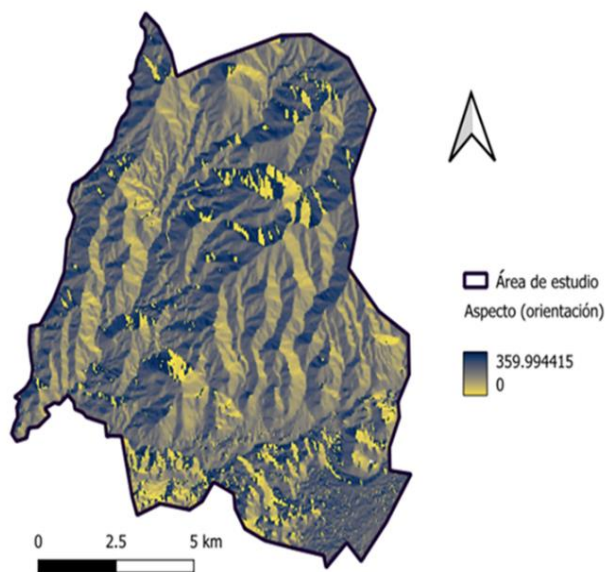


Figura 16. Representación espacial de los diferentes deslizamientos encontrados

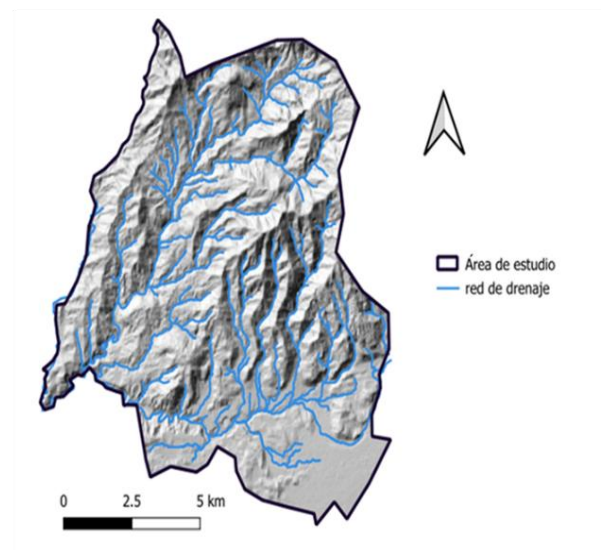
Fuente: (autor)

y la curvatura del terreno, procesadas mediante el módulo de análisis de terreno del *software* QGIS 3.42, observados en la Figura 18. Estas capas representan los atributos geomorfológicos que condicionan la estabilidad del terreno influyendo en la concentración de agua, la

exposición a las lluvias y la inclinación de las laderas. Además, se integraron capas temáticas complementarias como la red de drenaje, la red vial y la cobertura boscosa que reflejan tanto los factores naturales como los impactos antrópicos sobre la estabilidad del relieve. En conjunto, estas variables constituyen la base espacial para el cálculo del índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI) en el área de estudio.



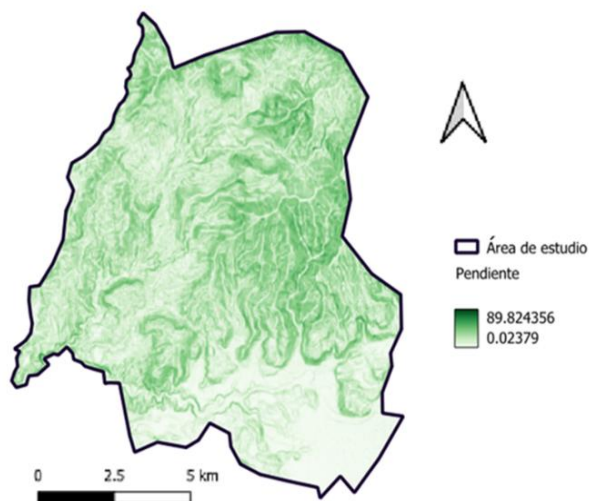
c) Aspecto



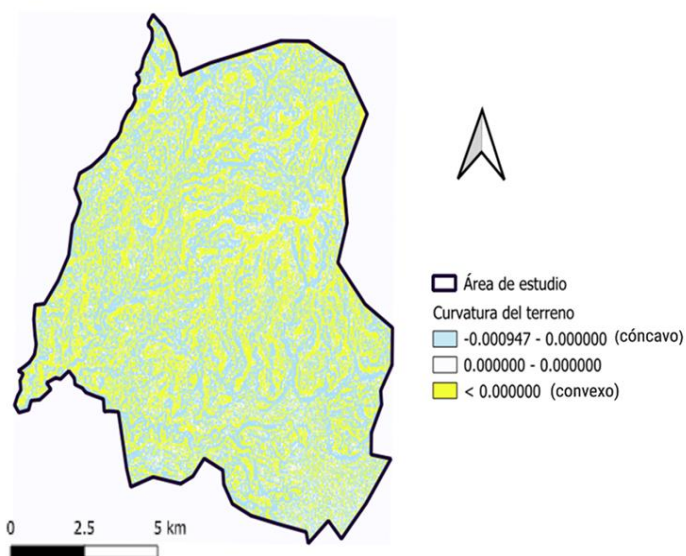
d) Red de drenaje



a) DEM de 5M



b) Pendiente



e) Curvatura del terreno

Figura 17. Representación de las diferentes capas obtenidas del DEM de 5m de resolución: a) DEM, b) pendiente, c) aspecto, d) red de drenaje, e) curvatura del terreno.
Fuente: autor

La capa uso del suelo y cobertura boscosa empleada en este estudio fue obtenida del Sistema Nacional de Información Ambiental de Panamá (SINIA). Esta base geoespacial constituye la fuente oficial de referencia ambiental en Panamá, lo que garantiza la confiabilidad y homogeneidad de las categorías utilizadas.

La capa incluye más de treinta clases temáticas abarcando diferentes tipos de bosques (latifoliado maduro, secundario, manglar, coníferas, vegetación arbustiva, herbácea y áreas inundables); además, de categorías agrícolas (plátano, banano, palma aceitera, café, cítricos, arroz, caña de azúcar, maíz, horticultura y cultivos permanentes); pastos, áreas de infraestructura, zonas pobladas, afloramientos rocosos, cuerpos de agua (SINIA, 2021).

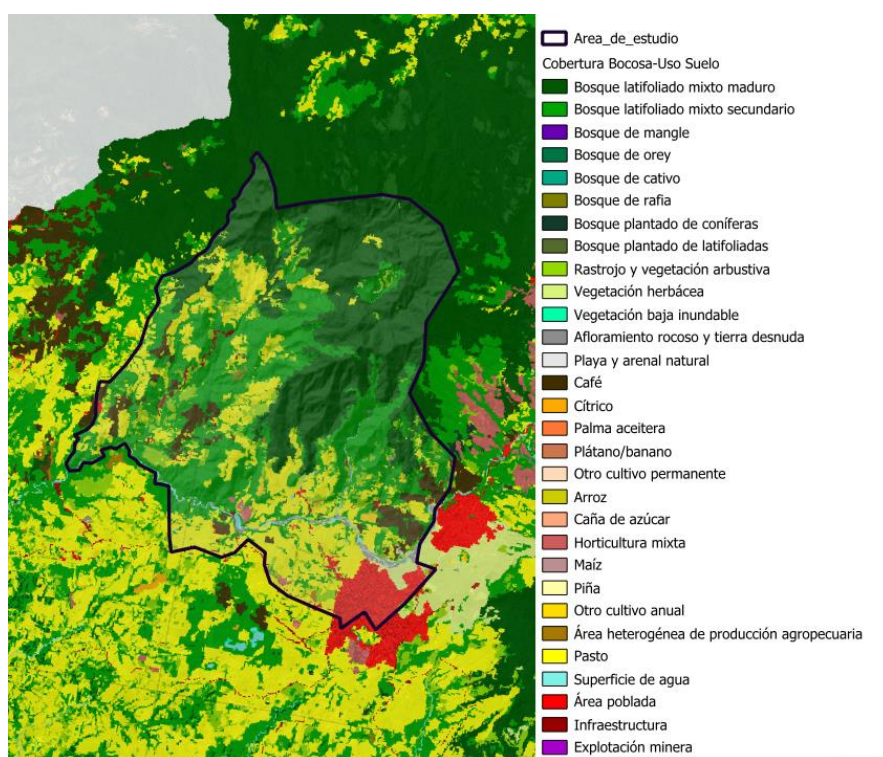


Figura 18. *Distribución espacial de las principales categorías de cobertura, áreas agropecuarias, que se encuentran en Nueva California. Fuente: (SINIA, 2021)*

La red vial constituye uno de los factores antrópicos más relevantes en la generación de deslizamientos debido a que la construcción de caminos, cortes en taludes y modificaciones

del drenaje superficial altera directamente la estabilidad de las laderas. En este estudio, la red vial fue digitalizada mediante fotointerpretación apoyada en imágenes satelitales de Google Earth Pro y la capa base de Google Maps Road, diferenciando entre calles urbanas asfaltadas y caminos de tierra, estos últimos identificados como los de mayor impacto geomorfológico.

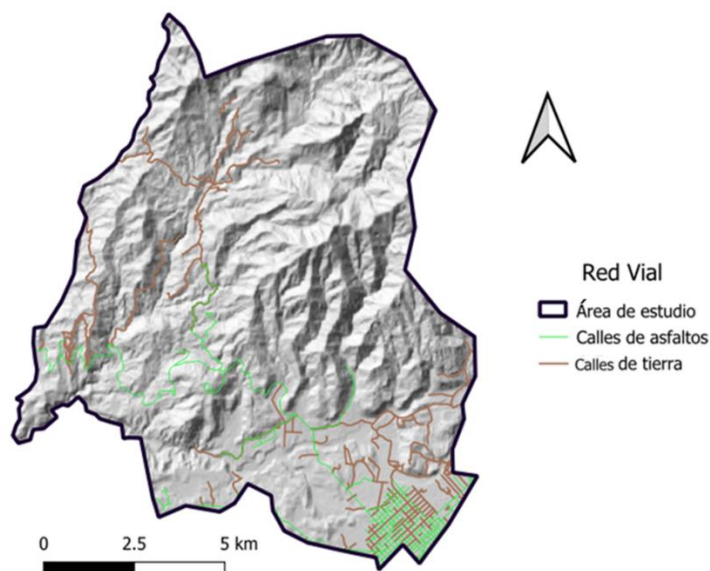


Figura 19. Representación de la red vial del área de estudio, diferenciada en calles urbanas asfaltadas y caminos de tierra, generada mediante fotointerpretación de imágenes satelitales. Fuente: (autor)

5.3 Reclasificación y resultados obtenidos de las variables para el método LSI

La reclasificación de las capas condicionantes es un paso fundamental dentro de la metodología del índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI), ya que, permite transformar variables continuas o muy heterogéneas en clases discretas con significado geomorfológico y estadístico; se pueden visualizar estos datos en la Tabla 3. Este proceso es ampliamente utilizado en estudios de susceptibilidad debido a que la relación entre los deslizamientos y los factores del terreno no suele ser lineal, sino que responde a umbrales y rangos críticos específicos (Lee & Pradhan, 2007; Santamaría et al., 2021).

Tabla 3. *Diferentes parámetros considerados y las categorías asignadas para la elaboración del LSI*

Parámetros	Categoría	Rangos
Aspecto	1	-1 (Plana)
Aspecto	2	337.5°–22.5°
Aspecto	3	22.5°–112.5°
Aspecto	4	112.5°–247.5°
Aspecto	5	247.5°–337.5°
Calles de tierra	1	100 m
Calles de tierra	2	75-100 m
Calles de tierra	3	50-75 m
Calles de tierra	5	25-50 m
Calles urbanas	1	0-25 m
Calles urbanas	2	100 m
Cobertura boscosa	1	Bosques
Cobertura boscosa	2	Vegetación arbustiva y herbácea
Cobertura boscosa	3	Áreas abiertas sin o con poca vegetación
Cobertura boscosa	4	Suelo intervenido
Curvatura	1	Cóncava
Curvatura	2	Plana
Curvatura	3	Convexa
Pendiente	1	0 - 8.5
Pendiente	2	8.5 - 16.7
Pendiente	3	16.7 - 26.6
Pendiente	4	26.6 - 45
Pendiente	5	< 45
Ríos	1	200–1000 m
Ríos	2	150–200 m
Ríos	3	100–150 m
Ríos	4	50–100 m
Ríos	5	0–50 m

5.4 Valores obtenidos para aplicar el LSI

Para el cálculo del índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI) fue necesario establecer dos valores base que permanecen constantes a lo largo de todo el análisis: el área total del sector de estudio y el número total de deslizamientos inventariados. El área total, calculada a partir de los límites geográficos del proyecto, corresponde a 123 073 716.3 m², este valor se utiliza como denominador común para obtener la densidad de deslizamientos por unidad de superficie. Se utilizaron 115 deslizamientos obtenidos del inventario los cuales representan el total de eventos empleados para la elaboración del modelo. En conjunto, ambos valores permiten calcular la razón global N_T/A_T , que en este estudio equivale a 9.34×10^{-7} . Esta razón constituye el valor de referencia contra el cual se comparan todas las clases de cada parámetro permitiendo determinar cuándo una categoría presenta mayor o menor concentración de deslizamientos respecto al promedio del área de estudio.

Tabla 4. Información obtenida de los diferentes parámetros y deslizamientos ocupadas por cada área de influencia

Parámetro	Cate goría	Desliza mientos	Área en m ²	$N(m,n)/$ $A(m,n)$	Deslizamien tos totales	N_T/A_T
Aspecto	1	0	0	0	0	0
Aspecto	2	41	22 524.55 0	1.82E-06	115	9.34E-07
Aspecto	3	48	37 720.45 0	1.27E-06	115	9.34E-07
Aspecto	4	17	45 751.60 0	3.72E-07	115	9.34E-07
Aspecto	5	9	17 170.42 5	5.24E-07	115	9.34E-07
Calles de tierra	1	109	105 473.65 1	1.03E-06	115	9.34E-07
Calles de tierra	2	3	38 058.76	7.88E-07	115	9.34E-07
Calles de tierra	3	2	41 412.45	4.83E-07	115	9.34E-07
Calles de tierra	5	1	50 071.69	2.00E-07	115	9.34E-07

Calles urbanas	1	114	1 131 139.67	1.01E-06	115	9.34E-07
Calles urbanas	5	1	32 620.79	3.07E-07	115	9.34E-07
Cobertura boscosa	1	99	790 424.00	1.25E-06	115	9.34E-07
Cobertura boscosa	2	9	32 056 800	2.81E-07	115	9.34E-07
Cobertura boscosa	3	1	41 638.00	2.40E-07	115	9.34E-07
Cobertura boscosa	4	6	5 507 400	1.09E-06	115	9.34E-07
Curvatura	1	30	23 568 775	1.27E-06	115	9.34E-07
Curvatura	2	22	37 647 050	5.84E-07	115	9.34E-07
Curvatura	3	63	61 863 075	1.02E-06	115	9.34E-07
Pendiente	2	4	19 723 875	2.03E-07	115	9.34E-07
Pendiente	3	12	31 292 450	3.83E-07	115	9.34E-07
Pendiente	4	77	45 909 425	1.68E-06	115	9.34E-07
Pendiente	5	22	53 944.50	4.08E-06	115	9.34E-07
Ríos	1	51	74 159 198	6.88E-07	115	9.34E-07
Ríos	2	19	10 864 337	1.75E-06	115	9.34E-07
Ríos	3	20	11 727 423	1.71E-06	115	9.34E-07
Ríos	4	12	12 706 744	9.44E-07	115	9.34E-07
Ríos	5	13	13 621 223	9.54E-07	115	9.34E-07

Tabla 5. Valores obtenidos de LSI por categoría

Parámetro	Categoría	LSI	Log 10
Aspecto	1	Sin evaluación	0
Aspecto	2	1.94802806	0.28959521
Aspecto	3	1.36185806	0.13413185
Aspecto	4	0.39765835	-0.40048989
Aspecto	5	0.56095618	-0.25107106
Calles de tierra	1	1.10598693	0.04374999
Calles de tierra	2	0.84359519	-0.07386591

Calles de tierra	3	0.51685241	-0.28663345
Calles de tierra	5	0.21373479	-0.67012478
Calles urbanas	1	1.07858926	0.03285609
Calles urbanas	5	0.3280749	-0.484027
Cobertura boscosa	1	1.3404251	0.12724255
Cobertura boscosa	2	0.30046218	-0.52221018
Cobertura boscosa	3	0.25702633	-0.59002239
Cobertura boscosa	4	1.165929	0.0666721
Curvatura	1	1.36223401	0.13425172
Curvatura	2	0.62540191	-0.2038408
Curvatura	3	1.08987457	0.03737652
Pendiente	2	0.21703772	-0.66346478
Pendiente	3	0.4104017	-0.38679085
Pendiente	4	1.79496649	0.25405635
Pendiente	5	4.36458528	0.63994298
Ríos	1	0.73599121	-0.13312737
Ríos	2	1.87162073	0.27221785
Ríos	3	1.82513452	0.26129488
Ríos	4	1.01068179	0.00461444
Ríos	5	1.02139734	0.00919472

5.5 Ajuste de los datos obtenidos del LSI

Se presenta la suma de los valores LSI por parámetro, su conversión logarítmica y el porcentaje relativo dentro del modelo. Además, se aplicaron factores de ponderación basados en la literatura y la respuesta geomorfológica observada en la zona de estudio asignando mayor importancia a la pendiente (factor 2) y moderando la influencia de la red vial (factor 0.8). Esto permitió obtener porcentajes recalculados que expresan el peso real de cada parámetro en la generación del mapa final de susceptibilidad; se puede visualizar en la Tabla 5.

Tabla 6. *Suma de los datos del LSI y ajuste de los datos*

Parámetro	Suma	Log 10	% natural	Factor multiplicador	% recalculado	Recalculado
Aspecto	4.26850066	0.2342743	15.3828136	1	15.3828	12.6593641
Calles de tierra	2.68016932	0.37311076	9.65878851	0.8	7.727	6.358999

Calles urbanas	1.40666416	0.71090174	5.06933331	0.8	4.0554	3.33746674
Cobertura boscosa	3.06384261	0.32638752	11.0414695	1	11.0415	9.08663304
Curvatura	3.07751049	0.32493797	11.0907258	1	11.0907	9.12716876
Pendiente	6.7869912	0.1473407	24.4589445	2	48.9178	40.2572236
Ríos	6.46482559	0.15468321	23.2979248	1	23.2979	19.1731448
Total			100		121.5131	100

5.6 Obtención del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa en corregimiento de Nueva California, provincia de Chiriquí

El mapa final de susceptibilidad obtenido mediante el índice LSI permitió identificar la distribución espacial de las zonas con mayor propensión a movimientos en masa dentro del área de estudio. Los valores resultantes del índice variaron entre 1.12 y 4.52 reflejando contrastes claros en la influencia relativa de los factores condicionantes. Con base en estos valores, se estableció una reclasificación en cinco niveles de susceptibilidad que se observan en la Tabla 6. Los resultados muestran que la mayor parte del territorio (56 %) se ubica en una categoría de susceptibilidad moderada, mientras que el 32 % del área presenta condiciones de alto a muy alto riesgo. Estas zonas coinciden espacialmente con las pendientes pronunciadas, proximidad a cauces de drenaje y sectores de relieve abrupto que fueron identificados previamente como factores críticos

Tabla 7. *Clasificación del LSI obtenidos dentro del análisis multivariable*

CLASIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD		
Rango LSI	Nivel de susceptibilidad	% del área
0.00 - 2.00	Muy bajo	0 %
2.00 - 2.50	Bajo	12 %
2.50 - 3.00	Moderado	56 %
3.00 - 3.50	Alto	30 %
> 3.50	Muy alto	2 %

5.7 Validación del método del LSI

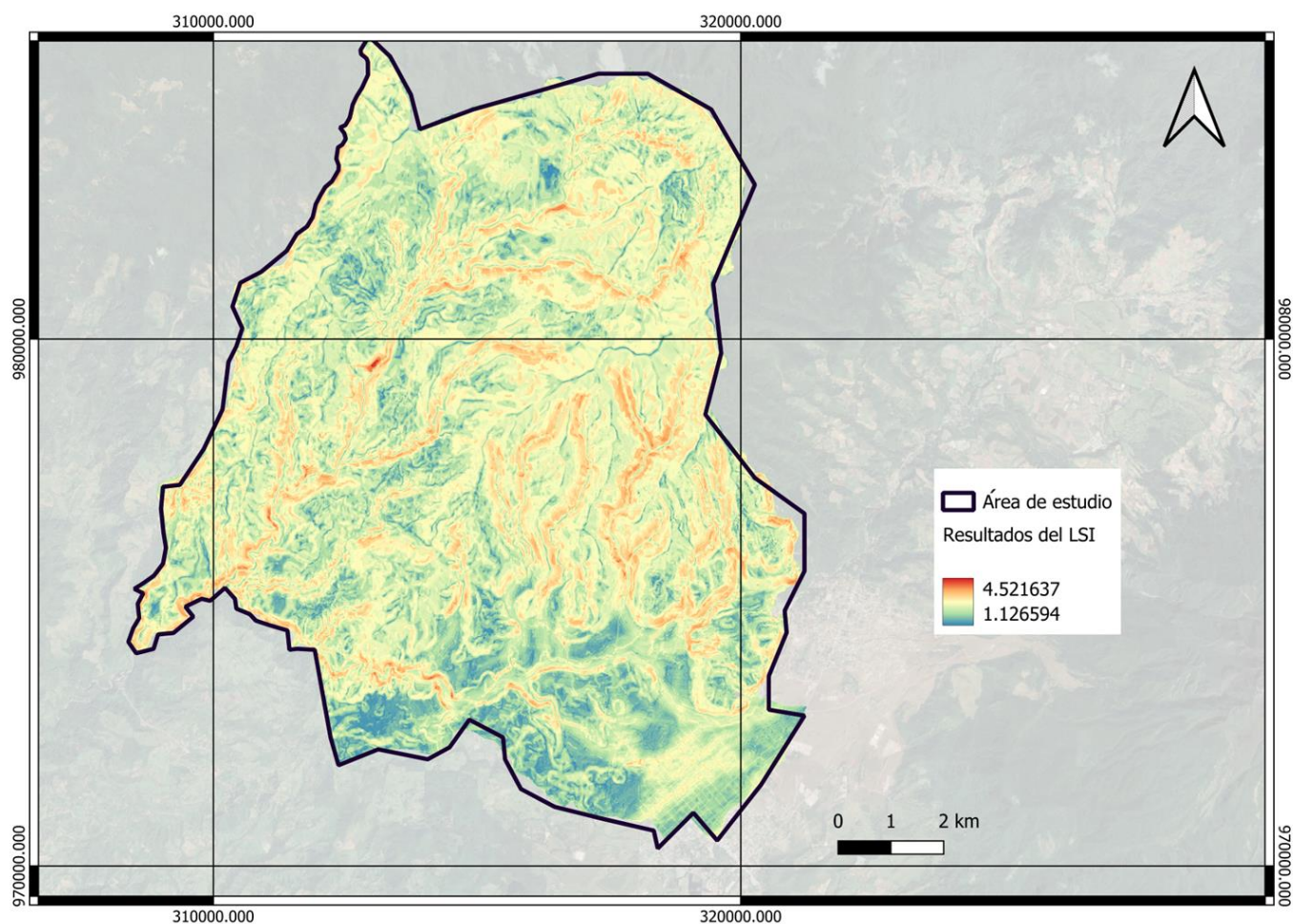


Figura 20. Mapa de susceptibilidad del corregimiento de Nueva California obtenida través de la metodología del LSI (Fuente: autor)

Mapa final de susceptibilidad a deslizamientos (LSI) en la zona de estudio junto con la distribución espacial de los 102 deslizamientos inventariados para el año 2021. El modelo LSI presenta valores que oscilan entre 1.12 y 4.52, donde los valores más altos indican una mayor propensión al desencadenamiento de movimientos en masa. Las tonalidades cálidas (rojo–naranja) representan zonas clasificadas como susceptibilidad alta y muy alta, mientras que las tonalidades frías (verde–azul) corresponden a áreas de susceptibilidad baja y muy baja.

Al superponer los 102 deslizamientos de validación sobre el ráster de susceptibilidad se observa que la gran mayoría de los eventos se concentran dentro de las zonas clasificadas con valores altos y muy altos del LSI especialmente en los sectores centrales y orientales del área de estudio.

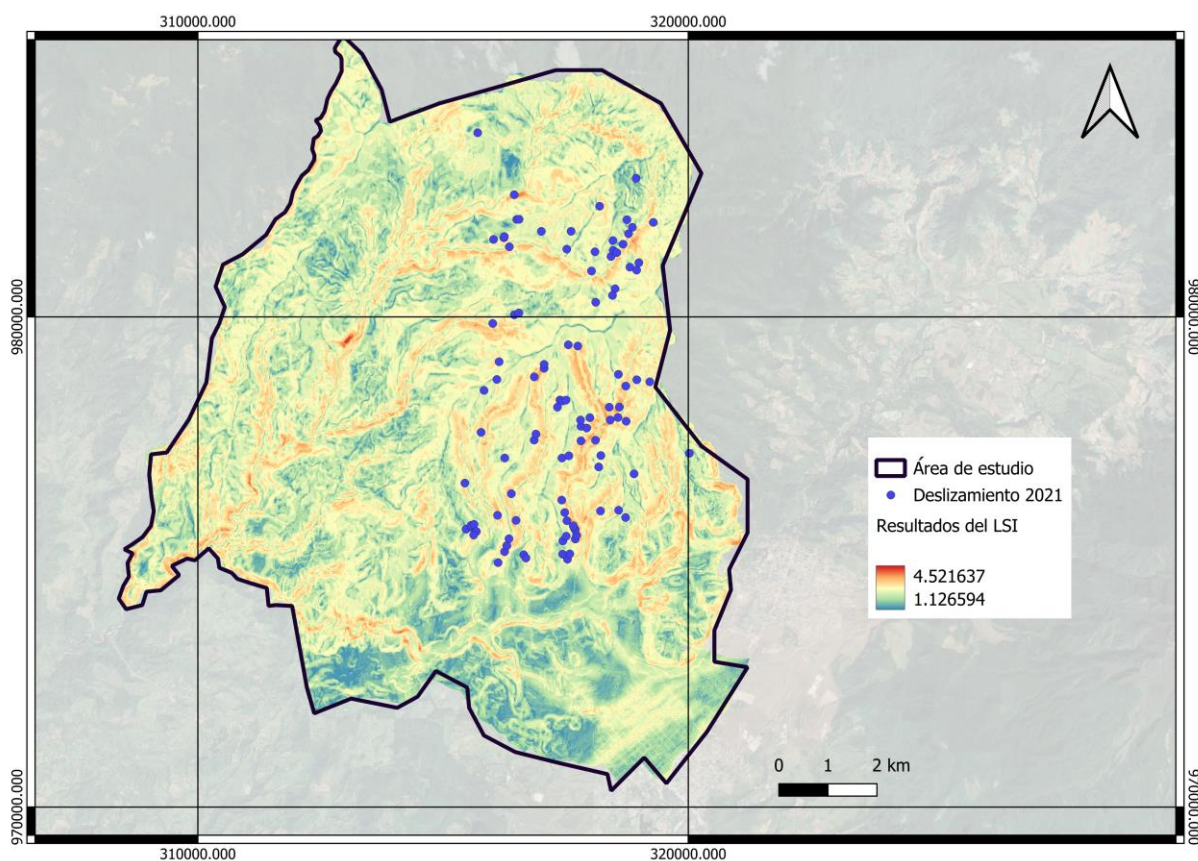


Figura 21. Validación del mapa de susceptibilidad con los deslizamientos inventariados del 2021 (102). Fuente: (Autor)

5.8 Discusión

El análisis del índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI) permitió identificar la relación entre la ocurrencia de deslizamientos y los principales factores condicionantes del área de estudio. Los resultados obtenidos evidencian que la distribución espacial de los deslizamientos no es aleatoria, sino que responde a condiciones geomorfológicas, hidrológicas y antrópicas específicas, las cuales influyen directamente en la estabilidad del terreno.

Entre los factores analizados, la pendiente del terreno resultó ser el parámetro más influyente en la ocurrencia de deslizamientos. Las clases de pendiente media y alta presentaron las mayores densidades de eventos, lo que indica que a medida que aumenta la inclinación del terreno, también se incrementa la probabilidad de inestabilidad. Este comportamiento es consistente con los principios geomorfológicos, ya que, en pendientes pronunciadas actúan mayores fuerzas gravitacionales y de corte reduciendo la estabilidad de los materiales superficiales especialmente en condiciones de saturación por lluvia. Estos resultados coinciden con lo reportado en estudios previos de susceptibilidad a deslizamientos en regiones montañosas.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

1. El método LSI permitió identificar de forma efectiva las áreas con mayor susceptibilidad a deslizamientos en Nueva California demostrando ser una metodología adecuada para zonas montañosas con características similares.
2. La mayor parte del área (56 %) presenta susceptibilidad moderada y un 32 % adicional entra en alto o muy alto, lo que indica que gran parte del territorio posee condiciones naturales que favorecen la inestabilidad.
3. La verificación con 102 deslizamientos reales mostró que el modelo logra una alta coincidencia espacial validando su utilidad para la planificación, mitigación y gestión del riesgo.
4. El inventario de deslizamientos mostró una fuerte concentración espacial y temporal, especialmente coherente con eventos climáticos extremos regionales asociados a los huracanes ETA e IOTA durante los años 2020 y el frente frío en el 2021.

RECOMENDACIONES

1. Mejorar los inventarios de los movimientos en masa en función de su tipología descrita por (Hung et al., 2014).
2. Implementar sistemas de monitoreo y alerta temprana en las zonas clasificadas como “Alta” y “Muy Alta” priorizando viviendas, carreteras y áreas productivas expuestas.
3. Evitar el desarrollo urbano en zonas críticas identificadas por el método o exigir estudios geotécnicos detallados antes de autorizar nuevas construcciones.
4. Reforzar medidas de control de escorrentía y estabilidad de taludes especialmente en terrenos intervenidos por obras viales.
5. Incorporar este mapa de susceptibilidad en los planes municipales de ordenamiento territorial, para orientar decisiones sobre infraestructura, agricultura y expansión urbana.
6. Actualizar periódicamente el inventario de deslizamientos y recalibrar el modelo para mejorar su precisión conforme se obtengan nuevos datos.

REFERENCIAS

- ANAM. (2010). *Atlas Ambiental de la Republica de Panama 2010 (Primera Versión)*. Autoridad Nacional del Ambiente. <http://hdl.handle.net/1834/7995>
- Andrus, R., & Youd, T. (1987). *Subsurface Investigation of a Liquefaction-Induced Lateral Spread, Thousand Springs Valley, Idaho*. 132.
- Ayala, F. J., & Andreu, F. J. (1987). *Manual de ingeniería de taludes*. IGME.
- Bekaert, D. P. S., Handwerger, A. L., Agram, P., & Kirschbaum, D. B. (2020). InSAR-based detection method for mapping and monitoring slow-moving landslides in remote regions with steep and mountainous terrain: An application to Nepal. *Remote Sensing of Environment*, 249, 111983. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111983>
- Bergoeing, J. P. (2015). Chapter 8—Geomorphological Characteristics of Panama. En J. P. Bergoeing (Ed.), *Geomorphology of Central America* (pp. 121-133). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803159-9.00008-X>
- Carrasco, F. A. (2017). Influencia de los parámetros condicionantes y desencadenantes en el deslizamiento de masas de suelos en la quebrada Huayllapampa. *Universidad Nacional de Cajamarca*. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/1491>
- Coates, A. G., Collins, L. S., Aubry, M.-P., & Berggren, W. A. (2004). The Geology of the Darien, Panama, and the late Miocene-Pliocene collision of the Panama arc with northwestern South America. *GSA Bulletin*, 116(11-12), 1327-1344. <https://doi.org/10.1130/B25275.1>
- Coates, A. G., McNeill, D. F., Aubry, M.-P., Berggren, W. A., & Collins, L. S. (2005). *An Introduction to the Geology of the Bocas Del Toro Archipelago, Panamá*. <http://repository.si.edu/xmlui/handle/10088/3831>
- Corominas, J. (2000). Tipos de rotura en laderas y taludes. *Universidad Politécnica de Cataluña*. https://www.academia.edu/11425017/Tipos_de_rotura_en_laderas_y_taludes

- Cruden, D., & Varnes, D. (1996). Landslide types and processes. En *Landslides: Investigation and Mitigation (National Research Council (U.s.) Transportation Research Board Special Report)*. Transportation Research Board.
<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247.pdf>
- Díaz, J. S. (2009). *Deslizamientos*. División de Publicaciones UIS.
- ESRI. (2023). Cómo funciona Orientación. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>
- ETESA. (1999). *Mapa Hidrogeológico de Panamá*.
https://www.imhpa.gob.pa/uploads/documentos/Nota_Explicativa_Hidrogeologico.pdf
- Gálvez, C. (2010). *Evaluación del riesgo a inundaciones y deslizamientos en la parte alta de la cuenca del río Chiriquí Viejo, Panamá*. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5072>
- Getachew, N., & Meten, M. (2021). Weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping of Kabi-Gebro locality, Gundomeskel area, Central Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 8(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00177-z>
- Glade, T., Anderson, M. G., & Crozier, M. J. (Eds.). (2006). *Landslide hazard and risk* (Reprinted with corrections). Wiley.
- González de Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- Heinz, D., & Saavedra, C. (2019). Analysis of the relationship between landslides and precipitation events in Chiriquí Province, Panama. *Revista de Iniciación Científica*, 5(1), 57-60.
<https://doi.org/10.33412/rev-ric.v5.1.2237>
- Highland, L., & Bobrowsky, P. (2008). *USGS Circular 1325: The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides*. <https://pubs.usgs.gov/circ/1325/>
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>

- INEC. (2023). *Instituto Nacional de Estadística y Censo*.
https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_PUBLICACION=1199&ID_CATEGORIA=19&ID_SUBCATEGORIA=71
- Kim, J., Jeong, S., Park, S., & Sharma, J. (2004). Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. *Engineering Geology*, 75(3-4), 251-262.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.017>
- LeBlanc, J. (2021). Stratigraphic Lexicon: The Onshore Cenozoic Sedimentary Formations of The Republic of Panama. *Biosis: Biological Systems (Inactive)*, 2(1), Article 1.
<https://doi.org/10.37819/biosis.002.01.0095>
- Lee, S., & Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4(1), 33-41.
<https://doi.org/10.1007/s10346-006-0047-y>
- Lu, J., Ren, C., Yue, W., Zhou, Y., Xue, X., Liu, Y., & Ding, C. (2023). Investigation of Landslide Susceptibility Decision Mechanisms in Different Ensemble-Based Machine Learning Models with Various Types of Factor Data. *Sustainability*, 15(18), 13563.
<https://doi.org/10.3390/su151813563>
- Luzuriaga, S., & Egvert, J. (2018). *Análisis de la peligrosidad frente a los movimientos de ladera en la Cuenca de Loja (Ecuador)*. <https://digital.csic.es/handle/10261/214813>
- Mann, P., & Corrigan, J. (1990). Model for late Neogene deformation in Panama. *Geology*, 18(6), 558-562. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018%253C0558:MFLNDI%253E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018%253C0558:MFLNDI%253E2.3.CO;2)
- Marshall, J. (2007). *Geomorphology and physiographic provinces*.
<https://doi.org/10.1201/9780203947043.pt2>
- McKay, A. A. (2000). Clima y biodiversidad: Una nueva clasificación de los climas de Panamá. *Revista Lotería*, 431, Article 431.

- Mendoza, C., & Nishenko, S. (1989). The north Panama earthquake of 7 September 1882: Evidence for active underthrusting. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79(4), 1264-1269. <https://doi.org/10.1785/BSSA0790041264>
- Meneses, B. M., Pereira, S., & Reis, E. (2019). Effects of different land use and land cover data on the landslide susceptibility zonation of road networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(3), 471-487. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-471-2019>
- MICI. (1990). *Panamá, mapa geológico 1:250,000 / impreso por el Instituto Geográfico Nacional «Tommy Guardia», Marzo de 1990 | Smithsonian Institution*. https://www.si.edu/object/siris_sil_567512
- Montero, W. (2001). Neotectónica de la región central de Costa Rica: Frontera oeste de la microplaca de Panamá. *Revista geológica de América central*, 24. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i24.8551>
- Montero, W., Camacho, E., Espinosa, A. F., & Boschini, I. (1994). Sismicidad y marco neotectónico de Costa Rica y Panamá. *Revista geológica de América central*. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i0.13424>
- Montes, C., & Hoyos, N. (2019). *Isthmian Bedrock Geology: Tilted, Bent, and Broken* (Vol. 3). Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.15>
- Moya, M., Coates, A., O'Dea, A., Rodríguez-Mejía, F., De Gracia, C., Lopez, O., Pacheco, R., Cramer, K., Lezcano, J., Stallard, R., Jacome, G., Jr, E., & Vermeij, G. (2015). *HISTORIA NATURAL DEL ISTMO DE PANAMA*.
- Muhimbula, J., Sumari, N. S., & Balz, T. (2025). Landslide Susceptibility Assessment Using AHP, Frequency Ratio, and LSI Models: Understanding Topographical Controls in Hanang District, Tanzania. *GeoHazards*, 6(3), 58. <https://doi.org/10.3390/geohazards6030058>
- O'Callaghan, J. (2020). *La ONU contribuye con ayuda humanitaria para atender la emergencia generada por Eta y Iota en Panamá | Naciones Unidas en Panamá*. <https://panama.un.org/es/102213-la-onu-contribuye-con-ayuda-humanitaria-para-atender->

- la-emergencia-generada-por-eta-y-iota, <https://panama.un.org/es/102213-la-onu-contribuye-con-ayuda-humanitaria-para-atender-la-emergencia-generada-por-eta-y-iota>
- Sagel, D., Astigarrabía, E. C., & Serrano, I. (2025). Tomografía sísmica del Volcán Barú y alrededores, provincia de Chiriquí, sur occidente de Panamá. *Tecnociencia*, 27(1), Article 1. <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n1.a6648>
- Santamaría, T., Samudio, M., & Sáez, D. (2021). Determinación de áreas susceptibles a deslizamientos en el corregimiento de Cerro Punta, provincia de Chiriquí, Panamá. *Revista de Iniciación Científica*, 7, 9-18. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v7.0.3242>
- Silalahi, F. E. S., Pamela, Arifianti, Y., & Hidayat, F. (2019). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia. *Geoscience Letters*, 6(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s40562-019-0140-4>
- SINIA. (2021). <https://sinia.gob.pa/datos-abiertos-y-geoservicios/>
- Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales* (1a ed). Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2010). *Ciencias de la tierra: Una introducción a la geología física*. Pearson Educación Prentice Hall.
- Terry, R. A. (1956). *A Geological Reconnaissance of Panama*. California Academy of Sciences.
- Tesfaye, B., Jothimani, M., & Dawit, Z. (2024). Mapping landslide susceptibility in the Debreabor-Alember road sector, Northwestern Ethiopia through geospatial tools and statistical approaches. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 11(2), 5169-5179. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2024.112.5169>
- Tournon, J., Triboulet, C., & Azema, J. (1989). Amphibolites from Panama: Anticlockwise P-T paths from a Pre-upper Cretaceous metamorphic basement in Isthmian Central America. *Journal of Metamorphic Geology*, 7(5), 539-546. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1989.tb00616.x>

- Turner, A. K., & Schuster, R. L. (Eds.). (1996). *Landslides: Investigation and mitigation*. National Academy Press.
- Van, C. J., Rengers, N., Terlien, M. T. J., & Soeters, R. (1997). Prediction of the occurrence of slope instability phenomenon through GIS-based hazard zonation. *International Journal of Earth Sciences*, 86, 404-414.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. En *Landslide: Analysis and Control*.
<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr176/176.pdf>
- Wieczorek, G. (Ed.). (1996). *Landslides: Investigation and mitigation*. National Academy Press.
- Woodring, W. P. (1973). *Geology and Paleontology of Canal Zone and Adjoining Parts of Panama: Description of Tertiary Mollusks (additions to Gastropods, Scaphopods, Pelecypods: Nuclidae to Malleidae)*. U.S. Government Printing Office.