



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ANÁLISIS DE LA AMENAZA HIDROMETEOROLÓGICA DE
DERRUMBES EN LAS QUEBRADAS “LOMA DE LOS VIENTOS
Y VALLE ALTO” EN PORTOVIEJO, ECUADOR.**

**PLAN DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO HIDRÁULICO**

AUTORES:

Cristofer Jonathan Chamorro Espinoza

Joseph Eliazar Granja Vallejo

TUTOR:

Ing. Rudys Rafael Cusme Intriago Msc.

LATACUNGA – ECUADOR

AGOSTO, 2025

DECLARACIÓN DE AUTORIA

Chamorro Espinoza Cristofer Jonathan, con cedula de ciudadanía N°. 17555552-9 y **Granja Vallejo Joseph Eliazar**, con cedula de ciudadanía N°. 055027214-0, declaramos ser autores del presente Proyecto De Investigación: Análisis de la amenaza hidrometeorológica de derrumbes en las quebradas “Loma de los Vientos y Valle Alto” en Portoviejo, Ecuador, siendo el Ing. Rudys Rafael Cusme Intriago Msc., tutor del presente trabajo; y exigimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo tecnológico, son de nuestra exclusividad responsabilidad.

Latacunga, julio 28 del 2025



Chamorro Espinoza Cristofer Jonathan
C.C.: 17555552-9



Granja Vallejo Joseph Eliazar
C.C.: 055027214-0

Latacunga, 25 julio 2025

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: Análisis de la amenaza hidrometeorológica de derrumbes en las quebradas “Loma de los Vientos y Valle Alto” en Portoviejo, Ecuador. Propuesto por los estudiantes Cristofer Jonathan Chamorro Espinoza y Joseph Eliazar Granja Vallejo, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



Ing. Rudys Rafael Cusme Intriago Msc.
C.C 1313770891
TUTOR


Latacunga, 29 julio 2025

AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES

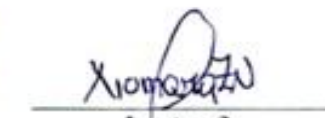
Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título "Análisis de la amenaza hidrometeorológica de derrumbes en las quebradas "Loma de los Vientos y Valle Alto" en Portoviejo, Ecuador", propuesto por el estudiante Chamorro Espinoza Cristofer Jonathan y Granja Vallejo Joseph Eliazar de la Carrera de Ingeniería Hidráulica, me permito indicar que los estudiantes ha concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad _Proyecto de investigación en virtud de lo cual el o la postulante puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

Atentamente,


Lector 1 (Presidente)
Ing. Giler Ormaza
Andy Miguel MSc.
CC:1312820325


Lector 2
Ing. Zambrano Valverde
Mariella Fernanda MSc.
CC:0603324401


Lector 3
Ing. Zambrano Navarrete
Xiomara Alejandra MSc.
CC:1313058453

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a Dios por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta meta tan importante.

A mi madre Juana y a mi padre Luis, quienes con su amor, sacrificio y ejemplo me enseñaron a luchar por mis sueños. Sin ustedes, nada de esto habría sido posible.

A mis hermanos/as Carlos, Gabriela, Fernanda, Maribel, Verónica, Luisa, Dayana, Roberto y Saúl, por su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y por estar siempre presentes en cada paso de este camino.

A mi cuñado Héctor, quien más que un cuñado ha sido un hermano, por sus consejos, apoyo incondicional y A todos mis sobrinos, que con su cariño y alegría me recordaron siempre la importancia de seguir adelante.

A mis amigos/as Johan, Marco, Joseph, Angeles, Jhon y Lucho, quienes fueron mucho más que compañía en este proceso en los que hubo momentos de locuras, alegrías, tristezas y incertidumbres. Gracias por cada palabra, cada abrazo y cada instante compartido, que hicieron de este camino no solo más llevadero, sino verdaderamente inolvidable.

A mi tutor, Ing. Rudys Cusme, por su guía, paciencia y valiosos aportes que hicieron posible el desarrollo de este trabajo y a la Ing. Xiomara Zambrano, por su orientación y apoyo, que fueron fundamentales para el cumplimiento de cada etapa de este proceso.

Y a todas las personas que, de una u otra manera, me acompañaron en este proceso gracias por ser parte de este logro, que no es solo mío, sino de todos ustedes.

Cristofer Chamorro

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a todas las personas que hicieron posible la culminación de esta tesis, quienes me acompañaron en este camino lleno de retos, aprendizajes y crecimiento personal.

En primer lugar, a mi madre Karla Vallejo y a mi padre Darwin Granja, por ser el motor de mi vida. Gracias por su amor incondicional, por su sacrificio diario y por brindarme siempre su apoyo sin límites. Todo lo que soy y he logrado es gracias a ustedes.

A mis amigos, que más que amigos se han convertido en hermanos del alma: Cristofer (Pony), Johan (La Rata), Luis (El Cadenita), Marco (El Zorro), Juan (El Carpintero) y Jhon (Novita). Gracias por sus consejos, por las risas, por estar presentes en los buenos y malos momentos, y por ser parte fundamental de este proceso.

A mi novia, por su paciencia, comprensión y amor. Gracias por acompañarme en cada paso, por tus palabras de aliento y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Tu apoyo ha sido clave para mantenerme firme y motivado.

Y no puedo dejar de agradecer a mi tutor, el Ing. Rudys Cusme, por su guía, dedicación y valiosas observaciones a lo largo de este trabajo. Su acompañamiento fue esencial para llevar esta tesis a buen puerto.

A todos ustedes, gracias de corazón. Este logro también es suyo.

Joseph Granja

Dedicatoria

Dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud a mis padres, quienes con su ejemplo, sacrificio y apoyo incondicional me enseñaron que los sueños se alcanzan con esfuerzo y perseverancia.

A mis hermanos/as, por ser mi fuerza, mi compañía y mi mayor motivación en los momentos más difíciles.

A mis amigos/as, quienes con su amistad sincera y constante apoyo hicieron que este camino académico fuera más llevadero y lleno de momentos valiosos.

Y con especial agradecimiento a mi tutor, por su guía, paciencia y compromiso en cada etapa de este proyecto.

Este logro es de todos ustedes, porque cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo y cada muestra de cariño me ayudó a llegar hasta aquí.

Cristofer Chamorro

DEDICATORIA

*Dedico esta tesis con todo mi amor a mi madre Karla Vallejo y a mi padre Darwin Granja, por ser mi guía, mi fuerza y mi mayor ejemplo de esfuerzo y dedicación.
A mis hermanos Martín y Sebastián, por ser mi inspiración diaria y recordarme siempre por qué vale la pena luchar por los sueños.
Este logro es también de ustedes.*

Joseph Granja

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TEMA: “Análisis de la Amenaza Hidrometeorológica de Derrumbes en las Quebradas “Loma de los Vientos y Valle Alto” en Portoviejo, Ecuador”

Autores:

Cristofer Jonathan Chamorro Espinoza
Joseph Eliazar Granja Vallejo

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo evaluar los cambios en el uso de la tierra y sus implicaciones en la amenaza de deslizamientos en la quebrada “Loma de los Vientos y Valle Alto”, ubicada en Portoviejo, Ecuador. La investigación respondió a la necesidad de comprender la interacción entre las áreas urbanas, la tierra de cultivo, la cobertura arbórea y tierra vacía frente a la amenaza que representan los deslizamientos para la población local.

Se utilizaron imágenes satelitales Landsat correspondientes a los años 2005 y 2025, sometidas a correcciones atmosféricas (método DOS1) y topográficas, así como a procesos de clasificación no supervisada y supervisada para identificar las coberturas del suelo. Adicionalmente, se elaboraron mapas temáticos de pendiente, textura del suelo y precipitaciones, integrando esta información en un análisis multicriterio mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) para vincular los cambios en el uso de la tierra con la susceptibilidad a deslizamientos.

Los resultados mostraron una reducción del área destinada a cobertura arbórea del 38,64 % al 20,93 % lo que sugiere procesos de restauración vegetal y una disminución en la tierra de cultivo del 14,3% al 13,15%, el incremento de la tierra vacía del 45,55 % al 47,64 % y un aumento en el área urbana del 1,04 % al 17,32 %, evidenciando una expansión poblacional sobre zonas potencialmente inestables. El análisis de pendientes reveló predominio de inclinaciones medias y altas (0.0021 - 31,45), mientras que el 78,08 % del suelo fue identificado como franco limoso, aumentando la vulnerabilidad a deslizamientos.

El estudio aporta información clave para la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial, destacando la necesidad de implementar prácticas sostenibles y medidas preventivas.

Palabras clave: Uso de la tierra, deslizamientos, teledetección, SIG, clasificación.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

Theme: “Analysis of the Hydro-Meteorological Threat of Landslides in the Loma de los Vientos and Valle Alto Rivers in Portoviejo, Ecuador.”

Authors:
Cristofer Jonathan Chamorro Espinoza
Joseph Eliazar Granja Vallejo

ABSTRACT

The study aimed to evaluate changes in land use and their implications for the threat of landslides in the “Loma de los Vientos and Valle Alto Ravines,” located in Portoviejo, Ecuador. The research aimed to understand the interaction between urban areas, farmland, and forest cover regarding the risk posed by landslides and empty land to the local population. Landsat satellite images from 2005 and 2025 were used, subjected to atmospheric (DOS1 method) and topographic corrections, as well as unsupervised and supervised classification. Processes to identify land cover. In addition, thematic maps of slope, soil texture, and precipitation were produced, integrating this information into a multi-criteria analysis using Geographic Information Systems (GIS) to link changes in land use with susceptibility to landslides. The results showed a reduction in the area devoted to tree cover from 38.64% to 20.93%, suggesting plant restoration processes and a decrease in cropland from 14.3% to 13.15%, an increase in vacant land from 45.55% to 47.64% and an increase in urban area from 1.04% to 17.32%, evidencing population expansion in potentially unstable areas. Slope analysis revealed a predominance of medium and steep slopes (0.0021 - 31.45), while 78.08% of the soil was identified as silty loam, increasing vulnerability to landslides. The study provides key information for risk management and land use planning, highlighting the need to implement sustainable practices and preventive measures.

Keywords: Land Use, Landslides, Remote Sensing, GIS, Classification.

Tabla de Contenidos

1. INFORMACIÓN GENERAL	1
1.1. Tema del proyecto	1
1.2. Modalidad de Titulación.....	1
1.3. Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:	1
1.4. Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:	1
1.5. Área de Conocimiento	2
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. Situación problemática	4
2.2. Formulación del problema.....	5
2.3. Objetivo y campo de acción	5
2.3.1. Objeto de Investigación:.....	5
2.3.2. Campo de Acción:	5
2.4. Beneficiarios.....	5
2.4.1. Directo	5
2.4.2. Indirecto.....	5
2.5. Justificación	5
2.6. Objetivos.....	6
2.6.1. General.....	6
2.6.2. Específicos.....	6
2.7. Sistema de tareas	6
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	9
3.1. Uso y Cobertura del Suelo.....	9
3.1.1. Definición.....	9
3.1.2. Uso del Suelo.....	9
3.1.3. Impacto de las variaciones en el Uso del Suelo.....	9
3.1.4. Cobertura Vegetal del Suelo	9
3.2. Cambio de Uso del Suelo	10
3.2.1. Definición	10
3.2.2. Causas del Cambio del Suelo	10
3.3. Los Deslizamientos.....	11
3.3.1. Definición.....	11

3.3.2.	Tipos de Deslizamientos.....	12
3.3.3.	Deslizamiento Rotacional.....	12
3.3.4.	Deslizamiento de Traslación.....	13
3.4.	Amenazas Naturales en Zonas de Quebradas.....	14
3.4.1.	Definición de Quebrada.....	14
3.4.2.	Tipos de Amenazas en Quebradas.....	14
3.4.3.	Factores que aumentan la amenaza:.....	15
3.5.	Gestión del Riesgo y Ordenamiento Territorial.....	15
3.5.1.	Definición de Gestión de Riesgo.....	15
3.5.2.	Ordenamiento Territorial.....	16
3.6.	Herramientas y Metodologías Para el Análisis del Suelo.....	17
3.6.1.	Definición.....	17
3.6.2.	Calador o barreno de suelo.....	17
3.6.3.	Drones y GPS.....	18
3.6.4.	Software SIG.....	19
3.6.5.	Sensores remotos.....	19
3.7.	Software QGIS.....	20
3.7.1.	Definición.....	20
3.7.2.	Usos del QGIS.....	20
3.7.3.	Ventajas de utilizar QGIS.....	21
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS.....	22
4.1.	Esquema Metodológico.....	22
4.2.	Área de estudio: de las quebradas “Loma de los Vientos y Valle Alto”.....	23
4.3.	Imágenes satelitales de las quebradas “Loma de los Vientos y Valle Alto”.....	23
4.4.	Corrección Atmosférica.....	24
4.5.	Corrección Topográfica.....	24
4.6.	Clasificación no Supervisada.....	24
4.7.	Clasificación Supervisada.....	25
4.8.	Análisis Multitemporal de las imágenes.....	25
4.9.	Vinculación de deslizamientos.....	26
4.10.	Evaluación de multicriterio.....	26
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	27
5.1.	Información de imágenes satelitales.....	27

5.1.1.	Relleno de Datos de Imagen Cruda	28
5.2.	Análisis de resultados de la corrección atmosférica y topográfica.....	29
5.3.	Resultados de la Clasificación no Supervisada	30
5.4.	Resultados de la Clasificación Supervisada	32
5.4.1.	Reclasificación supervisada distancia mínima más el Majority Filter	33
5.4.2.	Análisis del Mapa de Derrumbes del 2005 y 2025.....	35
5.4.3.	Análisis del Mapa de Pendiente.....	37
5.4.4.	Análisis del Mapa de Texturas del Suelo.....	38
5.4.5.	Análisis de Mapa de Profundidad del Suelo.....	40
5.4.6.	Análisis del Mapa de Lluvias de 2005 y 2025.....	41
5.5.	Análisis de Mapa de Multicriterio	42
5.6.	Discusión	43
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
6.1.	Conclusiones.....	45
6.2.	Recomendaciones	45
7.	REFERENCIAS	47
8.	ANEXOS.....	

Índice de Figuras

Figura 1 Deslizamiento de tierra [32].	13
Figura 2 Inundación súbita [33].	14
Figura 3 Movimientos en Masa [34].	15
Figura 4 Calador del suelo [41].	17
Figura 5 Drones y GPS [43].	18
Figura 6 Mapeo con Drones [45].	19
Figura 7 Esquema Metodológico.	22
Figura 8 Mapa de ubicación de las quebradas “Loma de los Vientos y Valle Alto”	23
Figura 9 Imagen satelital cruda y corregida 2005.	28
Figura 10 Imagen Satelital Cruda 2025	29
Figura 11 Corrección Atmosférica y Topográfica 2005 y 2025	30
Figura 12 Mapa de Clasificación no Supervisada 2005 y 2025	31
Figura 13 Mapa de Índice de Vegetación	33
Figura 14 Mapa de Cobertura del Suelo.	34
Figura 15 Porcentaje del año 2005 y 2025	35
Figura 16 Mapa de Derrumbes	36
Figura 17 Porcentajes en el Cambio del Uso del Suelo.	36
Figura 18 Mapa de Pendientes.	38
Figura 19 Mapa de Textura del Suelo.	39
Figura 20 Porcentaje de Textura del Suelo	39
Figura 21 Mapa de Profundidad del Suelo	40
Figura 22 Porcentajes de Profundidad del Suelo.	41
Figura 23 Mapa de Lluvias del 2005 y 2025	42
Figura 24 Mapa de Multicriterio	43

Índice de Tablas

Tabla 1 Modalidad de Titulación	1
Tabla 2 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [1].	2
Tabla 3 Campo de acción [1].	5
Tabla 4 Sistema de Tareas del Plan de Titulación.....	6
Tabla 5 Información de Imágenes Satelitales	27
Tabla 6 Información de las Clases Para las Clasificaciones en el Satélite Landsat.....	32

Índice de Anexos

ANEXO A Toma de muestras a altura óptima primera visita	
ANEXO B Ubicación de la toma de muestras de la primera visita	
ANEXO C Toma de bloque para un ensayo triaxial	
ANEXO D Recolección de bloques en buen estado	
ANEXO E Toma de muestra de la segunda visita	
ANEXO F Toma de muestras de la segunda visita	
ANEXO G Tabla del análisis multitemporal	
ANEXO H Tabla de porcentaje del 2005	
ANEXO I Tabla de porcentaje del 2025	
ANEXO J Tabla de datos del INAMI Febrero 2005	
ANEXO K Matriz Binaria Para la Reclasificación del Uso y Cobertura del Suelo.	

1. INFORMACIÓN GENERAL

1.1. Tema del proyecto

Análisis de la amenaza hidrometeorológica de derrumbes en las quebradas “Loma de los Vientos y Valle Alto” en Portoviejo, Ecuador.

1.2. Modalidad de Titulación

Tabla 1 Modalidad de Titulación

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
	Artículo científico	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación	X
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
Examen de indicadores de RDA		

Elaborado por: La universidad

1.3. Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:

- AguaQuest: Potenciando la investigación en recursos hídricos aplicados a la solución de problemas reales del medio.

1.4. Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:

Chamorro Espinoza Cristofer Jonathan, Granja Vallejo Joseph Eliazar y Ing. Cusme Intriago Rudys Rafael

1.5. Área de Conocimiento

Tabla 2 Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [1].

07 Ingeniería, Industria y Construcción	073 Arquitectura y construcción	0731 Arquitectura y urbanismo
		0732 Construcción e ingeniería civil

Línea de Investigación:

Meteorología, hidrología, mecánica de fluidos, sistemas y obras hidráulicas.

Sublíneas de investigación de la Carrera:

Diseño y optimización de proyectos hidráulicos.

2. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de tierra son uno de los desastres más comunes a nivel mundial, a su vez los deslizamientos como el descenso visible de una masa de tierra o roca relativamente seca, que ocurre sin que el agua actúe como un medio de transporte[1]. Aunque este término se usa para describir movimientos en las laderas que se dan a lo largo de una superficie de ruptura bien definida, tales deslizamientos a menudo causan daños significativos a las personas que viven en las áreas afectadas por estos desastres[2].

Los deslizamientos de tierra son comunes en las capas superficiales del suelo y suelen ser provocados por lluvias intensas o temblores[3]. Un terremoto fuerte puede generar múltiples deslizamientos, los cuales varían dependiendo de factores como el tipo de suelo, la pendiente y las precipitaciones; las condiciones climáticas también tienen un efecto indirecto en estos deslizamientos[4]. Por ello, es importante que la población aumente su conocimiento, actitudes y prácticas sobre los riesgos para anticiparse a posibles situaciones[5].

En Ecuador, las condiciones montañosas contribuyen a la frecuencia de estos eventos, con un aumento notable de deslizamientos durante las temporadas de lluvias[6]. El Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias señala que los deslizamientos son provocados por factores como la deforestación, excavaciones sin el debido estudio del terreno, y construcciones inadecuadas, lo que debilita la tierra, haciéndola más propensa a colapsar con la lluvia[7].

La provincia de Manabí también se ve afectada por estos fenómenos naturales, los cuales son en gran parte consecuencia de la acción humana, que a menudo prioriza necesidades inmediatas sin considerar las repercusiones a largo plazo[8]. Así, la población enfrenta continuamente riesgos elevados que afectan a muchas personas o comunidades.

A su vez el crecimiento urbano y las actividades humanas han generado transformaciones significativas en el uso de la tierra, afectando la estabilidad de los ecosistemas y aumentando la vulnerabilidad a desastres naturales[9]. En este contexto, las quebradas "Loma de los Vientos y Valle Alto", ubicada en Portoviejo, Ecuador, ha experimentado cambios en su cobertura vegetal y en los patrones de ocupación del suelo, lo que podría influir en la susceptibilidad a procesos de remoción en masa, como los derrumbes.

Los deslizamientos de tierra representan una amenaza latente en zonas con pendientes pronunciadas y suelos susceptibles a la erosión, especialmente cuando los cambios en el uso del suelo reducen la cobertura vegetal y alteran las condiciones hidrológicas[10]. En el caso de

las quebradas "Loma de los Vientos y Valle Alto", la expansión urbana, la deforestación y las prácticas agrícolas podrían estar modificando la estabilidad del terreno, aumentando la amenaza de deslizamientos que podrían afectar la infraestructura y la seguridad de la población.

Este estudio tiene como objetivo evaluar los cambios en el uso de la tierra en las quebradas "Loma de los Vientos y Valle Alto" y analizar sus posibles implicaciones en la amenaza de derrumbes. Para ello, se utilizarán herramientas de teledetección, análisis geoespacial y evaluación de factores geológicos y climáticos, con el fin de generar información que contribuya a la gestión del riesgo y a la planificación territorial sostenible[7].

2.1. Situación problemática

En las últimas décadas, las quebradas "Loma de los Vientos y Valle Alto", ubicadas en Portoviejo, Ecuador, ha experimentado una transformación significativa en el uso de la tierra debido al crecimiento urbano, la expansión de la frontera agrícola y la deforestación. Estos cambios han modificado las condiciones naturales del suelo y la vegetación, afectando su estabilidad y aumentando la vulnerabilidad a fenómenos de remoción en masa, como los derrumbes[11].

La reducción de la cobertura vegetal y la intervención antrópica en áreas de pendiente han alterado los procesos hidrológicos, favoreciendo la erosión y debilitando la cohesión del suelo. Esto, sumado a las condiciones climáticas de la región, donde las precipitaciones intensas pueden actuar como detonantes de deslizamientos, representa un riesgo para la población, la infraestructura y el ecosistema local[12].

A pesar de estas amenazas, no se cuenta con suficientes estudios que analicen cómo la modificación del uso del suelo incide en la susceptibilidad a los derrumbes en las quebradas "Loma de los Vientos y Valle Alto". La falta de información detallada sobre estos procesos dificulta la toma de decisiones en materia de planificación territorial y gestión del riesgo. Por ello, es fundamental evaluar los cambios en la cobertura del suelo y sus implicaciones en la estabilidad del terreno, con el fin de desarrollar estrategias de prevención y reducción que minimicen el efecto de posibles deslizamientos en el sector[11].

2.2. Formulación del problema

Como han influido los cambios en el uso de la tierra para las amenazas de derrumbes en las quebradas "Loma de los Vientos y Valle Alto", Portoviejo, Ecuador.

2.3. Objetivo y campo de acción

2.3.1. Objeto de Investigación:

Análisis de la amenaza hidrometeorológica de derrumbes en las quebradas "Loma de los Vientos y Valle Alto" en Portoviejo, Ecuador.

2.3.2. Campo de Acción:

Tabla 3 Campo de acción [1].

3305.15 Ingeniería Hidráulica	0732 Construcción e ingeniería civil
-------------------------------	--------------------------------------

2.4. Beneficiarios

2.4.1. Directo

Habitantes de la urbanización Valle Alto y de sus alrededores.

2.4.2. Indirecto

Comunidad científica en general.

2.5. Justificación

El estudio de los cambios en el uso de la tierra y sus implicaciones en las amenazas de derrumbes en las quebradas "Loma de los Vientos y Valle Alto" es fundamental para comprender la interacción entre la actividad humana y los procesos geodinámicos. La expansión urbana y la modificación del paisaje en Portoviejo han generado preocupaciones sobre la estabilidad del terreno, lo que hace necesario un análisis detallado para prevenir desastres y desarrollar estrategias de gestión del territorio[13].

Los deslizamientos de tierra suelen ocurrir comúnmente en las partes más externas del suelo, debido a intensas lluvias o temblores. En este contexto, un sismo fuerte puede facilitar la aparición de numerosos deslizamientos de tierra, los cuales dependen del tipo de terreno, la pendiente, las precipitaciones y otros factores; además, las condiciones climáticas tienen un impacto indirecto en este fenómeno. Por lo tanto, es necesario aumentar el entendimiento, las

conductas y las acciones de las personas respecto a los riesgos para evitar situaciones desafortunadas[14].

Este estudio proporcionará información clave para la planificación, ayudando a mitigar riesgos y promoviendo prácticas sostenibles de uso del suelo. Además, contribuirá a la toma de decisiones informadas por parte de autoridades y comunidades locales, con el objetivo de minimizar los impactos de los deslizamientos y garantizar la seguridad de la población y la infraestructura en la zona[15].

2.6. Objetivos

2.6.1. General

- Establecer zonas de amenaza hidrometeorológica de derrumbes y su relación con los LULC

2.6.2. Específicos

- Evaluar los cambios en el uso de la tierra (LULC) en la quebrada “Loma de los vientos y Valle Alto”.
- Realizar el mapeo de variables que influye en la amenaza de derrumbes.
- Vincular los cambios en el uso y cobertura del suelo con la amenaza hidrometeorológica de derrumbes (deslizamientos de tierra).

2.7. Sistema de tareas

Tabla 4 Sistema de Tareas del Plan de Titulación.

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Evaluar los cambios en el uso de la tierra (LULC) en la quebrada “Loma de los vientos y Valle Alto”.	Descargar imágenes satelitales de diferentes años (2005 y 2025).	Obtener imágenes satelitales multitemporales de buena calidad con mínima cobertura nubosa para los años seleccionados.	Sistemas de información geográfica (SIG).
	Aplicar correcciones atmosférica, topográfica y realizar	Obtener imágenes satelitales corregidas	Software especializado:

	la clasificación supervisada para identificar los tipos de cobertura (bosque, agrícola, urbano).	atmosférica y topográficamente. A partir de estas, se generarán mapas temáticos mediante clasificación supervisada que permitan identificar de forma clara y diferenciada las coberturas del suelo	QGIS y SAGA (para corrección, visualización y análisis).
Realizar el mapeo de variables que influye en la amenaza de derrumbes.	Recolección y procesamiento de variables físicas y ambientales.	Elaboración de los diferentes tipos de mapas como son: Mapa de Lluvia, de Pendiente, de Profundidad del Suelo, de Textura y Cobertura del suelo.	Software SIG Raster > Analysis > Slope (en QGIS)
	Obtención y elaboración del mapa multicriterio de amenaza.	Obtener un mapa multicriterio de amenaza por derrumbes, integrando las variables de pendiente, uso y cobertura del suelo, tipo de suelo, profundidad del suelo y precipitación mediante el método de análisis jerárquico.	Software SIG QGIS Reclassify o Raster Calculator para generar zonas de amenaza.

<p>Vincular los cambios en el uso y cobertura del suelo con la amenaza hidrometeorológica de derrumbes (deslizamientos de tierra).</p>	<p>Integrar los mapas de uso y cobertura del suelo (LULC) de diferentes años con los mapas de amenaza por deslizamientos generados a partir del análisis topográfico.</p>	<p>Se espera obtener un análisis multitemporal, en el que se superpongan los mapas de uso y cobertura del suelo (LULC) correspondiendo a los años 2005, 2015 y 2025 con los mapas de amenaza por deslizamientos.</p>	<p>Software SIG QGIS con las herramienta</p>
	<p>Analizar espacialmente las áreas donde la pérdida de cobertura vegetal o expansión agrícola coincide con zonas de deslizamientos de tierra.</p>	<p>Obtención de un análisis espacial detallado que permita identificar las áreas donde la pérdida de cobertura vegetal o la expansión de actividades agrícolas que coincidan con zonas de amenaza por deslizamientos de tierra.</p>	<p>Software SIG QGIS con las herramientas de análisis de cambio (Raster Calculator, Change Detection)</p>

Elaborado por: Autores

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. Uso y Cobertura del Suelo

3.1.1. Definición

La cobertura del suelo alude a las capas biológicas y físicas que existen en la superficie terrestre, como los bosques, ríos, lagos y áreas urbanas. Por otro lado, el uso del suelo se relaciona con las acciones que lleva a cabo la sociedad en la tierra con el fin de lograr algún tipo de beneficio o producto. Por lo tanto, investigar las diversas interacciones entre los seres humanos y el entorno es crucial para una adecuada planificación, administración de recursos, seguimiento y toma de decisiones[16].

3.1.2. Uso del Suelo

El uso del suelo, describe el uso que las personas hacen del suelo en la cual esta representa las actividades económicas y culturales (agrícolas, residenciales, industriales, mineras, y recreativas) que se practican en un lugar determinado[17]. A su vez esta se refiere a la posición y utilización de las tierras del país que en estos cambian, en los terrenos públicos o privados en los cuales estos representan usos muy diferentes[18].

3.1.3. Impacto de las variaciones en el Uso del Suelo

Las transformaciones en la utilización del suelo suceden de manera continua y a diferentes niveles, y pueden influir de forma puntual y acumulativa en la calidad del aire y el agua, el funcionamiento de las cuencas, la producción de desechos, la expansión y el estado del hábitat natural, así como en el clima y la salud de las personas [17].

3.1.4. Cobertura Vegetal del Suelo

Asegura que el suelo esté cubierto, lo cual es un concepto clave en la agricultura de conservación. Se conservan los restos de las cosechas en la parte superior del suelo; sin embargo, puede ser necesario utilizar cultivos de cobertura si el tiempo entre la recolección de un cultivo y la siembra del posterior es excesivamente prolongado[18].

3.2. Cambio de Uso del Suelo

3.2.1. Definición

El cambio de uso del suelo se relaciona a la transformación de la tierra de un uso a otro, generalmente causado por actividades humanas como la agricultura, la urbanización o la extracción de recursos. Implica la alteración de la cubierta vegetal o la función de la tierra[8].

El uso del suelo es un asunto de gran relevancia en las áreas ambientales. Es uno de los elementos clave en el calentamiento global, ya que modifica períodos biogeoquímicos como los del agua y el carbono. Además, esto sucede debido a las acciones humanas, como la agricultura, la expansión urbana o la explotación de recursos, que implican cambios en la vegetación y generan alteraciones en el medio ambiente[19].

3.2.2. Causas del Cambio del Suelo

La degradación del suelo hace referencia a la pérdida de las propiedades físicas, químicas, biológicas y ecológicas de la tierra, ya sea por causas naturales o por la intervención humana. Entre los casos que ilustran este fenómeno de degradación se incluyen la reducción de nutrientes y materia orgánica, la erosión del suelo, la acidificación, la desertificación y la contaminación[20]. Existen diversos factores que afectan el nivel de deterioro del terreno, tales como:

- La condición inicial del suelo
- La naturaleza y la intensidad de las presiones que enfrenta
- Las respuestas del suelo a esas presiones
- El impacto de esas respuestas sobre los recursos naturales.

3.2.2.1. Tipos de degradación

La degradación de la tierra es un proceso que empeora y disminuye la habilidad presente o futura de los terrenos para continuar cumpliendo sus funciones naturales. Esto puede deberse a motivos tanto naturales como provocados por el ser humano. Además, existen diversos factores que pueden ser desencadenados por la degradación del suelo ocasionada por actividades humanas[20].

3.2.2.2. Biológico

La degradación biológica del suelo se refiere a la disminución de la diversidad biológica (seres vivos) y de la materia orgánica (organismos, tanto de origen animal como vegetal, que están

parcial y/o completamente descompuestos o transformados). Estos son los impactos más evidentes que resultan de los procesos de degradación biológica. Debido a reacciones bioquímicas dañinas, particularmente en terrenos sin vegetación y/o no protegidos, se disminuye la productividad y se vuelve más complicado cultivar en esas tierras[21].

3.2.2.3. Química

La degradación química comparte una relación con la degradación biológica, y frecuentemente sucede en situaciones extremas. Además, la contaminación del suelo involucra un proceso diferente que generalmente se relaciona con la contaminación de las aguas, tanto superficiales como subterráneas. Esto también se debe al uso y manejo inadecuado de insumos y residuos agrícolas, que incluyen metales pesados, lodos residuales, desechos de la industria metalúrgica y escombros mineros. También se incluye el uso de fertilizantes químicos y pesticidas, los cuales reducen la nutrición de las plantas y afectan negativamente la cantidad de microorganismos beneficiosos en el suelo[22].

3.2.2.4.Física

La deterioración del suelo impacta las propiedades físicas, lo que ocasiona la disminución y el desgaste de la capa productiva del suelo a causa de fenómenos como inundaciones, escorrentías, deslizamientos de tierra, vientos, tormentas, cultivos intensivos o la utilización de equipos pesados[23].

3.3.Los Deslizamientos

3.3.1. Definición

Sharpe en 1936 describió los deslizamientos como el descenso visible o el movimiento hacia abajo de una masa de tierra seca, roca o una combinación de ambas, sin la intervención de agua como medio de transporte. Sin embargo, el término también se aplica a los movimientos en ladera que suceden a lo largo de una superficie de ruptura claramente delineada, donde ocurren estos deslizamientos, que en ocasiones provocan daños importantes a las personas que viven en las áreas afectadas por estos desastres[24].

Los deslizamientos de tierra ocurren a menudo en las capas superficiales del suelo, debido a intensas lluvias o temblores. Un sismo potente también tiende a causar múltiples deslizamientos, los cuales dependen del tipo de terreno, la pendiente, las precipitaciones y otros factores. Las condiciones meteorológicas también influyen de manera indirecta en estos

deslizamientos. En este contexto, es importante que el conocimiento, la actitud y las acciones que la comunidad tiene sobre estos riesgos aumenten para evitar situaciones adversas[25].

Las condiciones que se presentan en Ecuador debido a su paisaje montañoso, especialmente durante el periodo de lluvias, momento en el que se observa un incremento en los deslizamientos de tierra. La institución encargada de la gestión de riesgos y emergencias señala que entre las causas que originan estos deslizamientos se encuentran la tala de árboles, trabajos de excavación sin estudios previos del terreno, edificaciones inapropiadas, entre otras; lo cual ocasiona que el suelo pierda su fortaleza y, en consecuencia, sea más vulnerable a colapsar con la llegada de la lluvia[24].

La región de Manabí también enfrenta este tipo de fenómenos naturales, que son una consecuencia directa de las acciones humanas. En su afán de asegurar su supervivencia inmediata, muchas veces no consideran las repercusiones a largo plazo. De este modo, con cada ciclo temporal se ven afectados por situaciones de gran riesgo que afectan la vida de numerosas personas o comunidades[26].

Entre los cantones de la provincia que presentan elevados niveles de deslizamientos de tierra, se destaca Portoviejo. Con base en el informe de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, se han señalado siete áreas de riesgo por deslizamientos en esta localidad. Las causas identificadas incluyen una inadecuada planificación del crecimiento de la población, edificaciones que carecen de los refuerzos y materiales apropiados, la deforestación y problemas geológicos. Además, la población que habita en estas zonas enfrenta una situación económica precaria y en su mayoría proviene del área rural[27].

3.3.2. Tipos de Deslizamientos

Los deslizamientos se clasifican en dos categorías: deslizamientos rotacionales y deslizamientos translacionales o planares. Esta clasificación es relevante ya que puede determinar el método de análisis y estabilización que se utilizará [28].

3.3.3. Deslizamiento Rotacional

En un deslizamiento rotacional, la región de ruptura se forma a partir de una curva que tiene su eje de rotación por encima del centro de masa del objeto en desplazamiento. En muchos deslizamientos rotacionales, se genera una superficie cóncava que recuerda a una “cuchara”, donde el escarpe inferior y la parte superior suelen ser casi verticales, lo que facilita la ocurrencia de movimientos hacia atrás[28].

El desplazamiento, aunque sea en curva, no necesita ser necesariamente circular, lo que es común en los materiales de desecho, donde la resistencia al corte de estos aumenta con la profundidad. En la parte superior del desplazamiento, el movimiento parece ser casi vertical y muestra una rotación reducida, aunque se puede observar que, generalmente, la superficie del terreno original se inclina hacia la cima del talud, a pesar de que otros bloques giran en dirección opuesta[29].

3.3.4. Deslizamiento de Traslación

En el movimiento de traslación, la masa se mueve hacia el exterior o hacia la parte inferior, recorriendo una superficie que es bastante plana o apenas tiene ondulaciones, y presenta mínimas o nulas rotaciones o giros[30].

Los movimientos de traslación suelen tener una relación D_r/L_r inferior a 0.1. La principal discrepancia entre los movimientos rotacionales y los de traslación radica, en gran medida, en la posibilidad de aplicar diferentes sistemas de estabilización. No obstante, un movimiento rotacional busca auto estabilizarse, mientras que un movimiento de traslación puede continuar indefinidamente descendiendo por la pendiente[24]. Los deslizamientos de tierra se producen debido a cambios en la estabilidad natural de una ladera. Pueden suceder durante fuertes lluvias o después de periodos de sequía, temblores de tierra o actividad volcánica. Normalmente, estos eventos inician en inclinaciones pronunciadas y pueden ser provocados por fenómenos naturales[27].



Figura 1 Deslizamiento de tierra [32].

3.4. Amenazas Naturales en Zonas de Quebradas

3.4.1. Definición de Quebrada

Las quebradas son cuerpos de agua irregulares que se distinguen por tener una pendiente pronunciada[24]. En el ámbito geográfico, una quebrada se define como un paso estrecho y abrupto entre montañas, siendo muy comunes en las áreas andinas de América del Sur. Su formación puede deberse al flujo del agua a lo largo del tiempo o a movimientos tectónicos. En estas quebradas, a menudo se puede encontrar un pequeño río o arroyo, al menos, después de las lluvias o durante ciertas épocas del año[30].

3.4.2. Tipos de Amenazas en Quebradas

Inundaciones Súbitas: Se trata de aumentos de agua en áreas con inclinaciones pronunciadas, especialmente en lugares donde se ha talado la vegetación y donde hay poco suelo vegetal. Estas inundaciones suceden de forma rápida cuando las precipitaciones son muy fuertes y prolongadas. Además, estas aguas alcanzan una gran velocidad y volumen, generando corrientes que arrastran todo lo que encuentran a su alrededor, ocasionando daños materiales y pérdidas de vidas.[4].



Figura 2 Inundación súbita [33].

Movimientos en masa: Los deslizamientos de tierra se producen debido a cambios en la estabilidad natural de una ladera. Pueden suceder durante fuertes lluvias o después de periodos de sequía, temblores de tierra o actividad volcánica. Normalmente, estos eventos inician en inclinaciones pronunciadas y pueden ser provocados por fenómenos naturales[29].



Figura 3 Movimientos en Masa [34].

3.4.3. Factores que aumentan la amenaza:

- Regiones donde los fuegos en bosques o las transformaciones del suelo provocadas por el ser humano han arrasado con la flora.
- Lugares donde se han registrado deslizamientos de tierra previamente.
- Terrenos con inclinaciones pronunciadas y ubicaciones situadas en la base de colinas o cañones.
- Montañas que han sido modificadas por la edificación de casas y carreteras.
- Aguas que fluyen a lo largo de pequeños arroyos o ríos.
- Zonas hacia las cuales fluyen las aguas de lluvia.

3.5. Gestión del Riesgo y Ordenamiento Territorial

3.5.1. Definición de Gestión de Riesgo

La administración del riesgo relacionado con los suelos implica el conjunto de acciones para detectar, analizar y establecer métodos de minimización de desastres en los terrenos, abarcando la prevención de fenómenos naturales adversos, la protección de la salud humana, el entorno y el avance sostenible del área. En este contexto, se llevan a cabo actividades de planificación sobre el uso del suelo frente a los posibles deslizamientos que podrían ocurrir[31], además se pueden considerar situaciones con riesgo de pérdida, en la cual esta da una probabilidad para un peligro en el que ocasione un incidente con consecuencias no factibles, también tenemos unas actividades en las cuales se pueden desarrollar que son:

- La gestión prospectiva se ocupa de prevenir o disminuir la aparición de ciertos problemas, enfocándose en la implementación de políticas que reduzcan riesgos inminentes[32].
- La gestión correctiva se encarga de erradicar o minimizar los peligros de desastres que ya están presentes, buscando controlarlos y mitigarlos en la mayor medida posible[31].
- La gestión compensatoria refuerza la adaptabilidad social y económica de los individuos frente a los riesgos remanentes que no pueden ser eliminados con eficacia, abarcando acciones de preparación, respuesta y recuperación, además de ofrecer diferentes tipos de asistencia financiera que permiten a la comunidad reiniciar[29].
- La administración comunitaria fomenta la implicación de las comunidades que podrían verse afectadas a nivel local, donde analizan los riesgos, las debilidades y las habilidades para participar, proceso en el que la planificación contribuye a disminuir desastres[31].

3.5.2. Ordenamiento Territorial

El Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) de Manabí 2023-2027 se presenta como un acuerdo social para edificar un futuro sostenible, justo y próspero, en el que la naturaleza y los seres humanos vivan en equilibrio. Este PDOT se basa en un diagnóstico minucioso que pone de manifiesto la complejidad del territorio en Manabí. La deforestación, provocada por el crecimiento de la agricultura, los incendios forestales y la explotación excesiva de los recursos, pone en peligro la valiosa biodiversidad de Manabí, degrada sus suelos, contamina sus aguas y favorece el cambio climático[33].

3.5.2.1. Gestión de la política local

Las pautas emitidas por el GADPM se alinean con estándares tanto locales como globales, apoyadas en un esquema de planificación al nivel provincial que integra decisiones de carácter político, social, ambiental, económico y cultural. Estas pautas están relacionadas con el Plan de Desarrollo y Uso del Suelo (PDOT), y su visión a largo plazo está respaldada por acciones y necesidades específicas del área, que contribuyen a la elaboración del PDOT. La Planificación Estratégica Institucional (PEI) a medio plazo, junto con los Planes Operativos Anuales (POA) a corto plazo, deben estar alineados con los objetivos de las políticas públicas para asegurar su eficacia y un monitoreo adecuado[33].

La participación de los ciudadanos es crucial en la creación de políticas públicas, lo que promueve la democratización de las relaciones entre la sociedad y el gobierno, además de

asegurar igualdad en las posibilidades de involucrarse en el proceso de decisiones. Este método asegura que las políticas públicas no solo consideren las necesidades de la comunidad, sino que también impulsen la claridad y la responsabilidad en la gestión pública[33].

3.6. Herramientas y Metodologías Para el Análisis del Suelo

3.6.1. Definición

Las herramientas y metodologías para el análisis del suelo son un conjunto de técnicas y procedimientos empleados para estudiar las propiedades físicas, químicas, biológicas y mecánicas del suelo con el objetivo de evaluar su calidad, capacidad de uso, fertilidad, estabilidad y riesgo ambiental o geotécnico[34].

De manera similar, llevar a cabo análisis de suelo de forma regular puede ofrecer datos importantes sobre el terreno a todos los actores del sector agrícola, incluyendo cooperativas agropecuarias, empresas de seguros, entidades bancarias, proveedores de productos y comerciantes de materias primas[34].

3.6.2. Calador o barreno de suelo

Los calibres manuales han sido fabricados para satisfacer los más rigurosos estándares de calidad, asegurando exactitud y resistencia[35]. Un aparato para obtener muestras de terreno, como una sonda o una barrena, resulta más efectivo para la recolección de suelo, ya que estas herramientas recogen el material de manera uniforme desde la capa superficial hasta la profundidad completa de la muestra. Las barrenas son aconsejables en terrenos con roca[36].



Figura 4 Calador del suelo [41].

3.6.3. Drones y GPS

Los vehículos aéreos no tripulados han cambiado la manera en que se obtienen, analizan y aplican los datos de los Sistemas de Información Geográfica. Debido a su capacidad para recopilar imágenes aéreas de alta resolución y datos geospaciales en tiempo real, ofrecen una alternativa más económica, precisa y eficiente a los métodos de topografía tradicional, a su vez estos datos que se van recopilando nos dan la ubicación del sitio en el que se está realizando[37].



Figura 5 Drones y GPS [43].

3.6.3.1.¿Qué es el mapeo con drones?

El uso de drones para mapeo implica llevar a cabo misiones automáticas que permiten obtener imágenes con una gran superposición, creando así mapas y modelos detallados, lo que ha cambiado drásticamente la manera en que realizamos la inspección y la cartografía[38]. Además, la velocidad, eficiencia y precisión que ofrecen los drones en el mapeo permite proporcionar un resumen rápido sobre esta tecnología. Esto también se refiere a la utilización de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para la recolección de datos, lo que se puede describir como la habilidad de ejecutar misiones automáticas con el dron para generar mapas en formatos 2D y 3D[38].



Figura 6 Mapeo con Drones [45].

3.6.4. Software SIG

Es una herramienta conocida como Sistema de Información Geográfica (SIG), que se utiliza para manejar datos que tienen una referencia geográfica. Estos datos están ligados a una ubicación específica[39].

Para aclarar lo mencionado anteriormente, un SIG es un sistema que facilita la ejecución de diversas acciones: Lectura, edición, almacenamiento y gestión, de manera general, de datos espaciales:

- Lectura, modificación, guardado y administración, en términos generales, de información geoespacial.
- Evaluaciones básicas o avanzadas de información geoespacial. Este tipo de evaluación puede realizarse tanto en la parte espacial (la ubicación de cada dato o elemento) como en la parte temática (el dato o elemento en sí).
- Creación de salidas como mapas, reportes, gráficas, entre otros.

En consecuencia , un Sistema de Información Geográfica se define como una plataforma informática concebida para gestionar datos vinculados a ubicaciones espaciales o geográficas , integrando , a su vez , un mapa digital avanzado[39].

3.6.5. Sensores remotos

Los dispositivos de teledetección son herramientas o equipos que se emplean para obtener de manera rápida y efectiva datos sobre un objeto, región o fenómeno desde una distancia. Esta información puede ser analizada y entendida a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para lograr una mejor visión del asunto. En los últimos tiempos , los sensores de percepción remota instalados sobre plataformas han ganado popularidad . Estos aparatos

capturan la energía electromagnética que un objeto irradia o refleja , haciéndolo en diferentes partes del espectro electromagnético. Estas capturas abarcan desde las ondas más pequeñas (rayos gamma y radiografías) hasta las de mayor longitud (microondas y ondas de radio). Dentro del rango de las ondas más cortas, encontramos las ultravioleta , que resultan de gran utilidad para los sensores[40].

3.7. Sofward QGIS

3.7.1. Definición

QGIS es una alternativa SIG sin costo y de fuente abierta , que permite a los usuarios generar , editar , visualizar , analizar y compartir datos geospaciales [41]. QGIS se rige por la Licencia Pública General (GPL) y , dado que es un programa de código abierto, su código base se encuentra disponible para todos en el repositorio GitHub de QGIS . Se pueden descargar y utilizar libremente archivos binarios y compilados para Windows, macOS y Linux [42].

El proyecto es liderado por la entidad no lucrativa OGIS, que incluye al equipo de gestión del proyecto, votantes, creadores de software y una activa comunidad de voluntarios y usuarios. Muchas compañías ofrecen respaldo comercial y servicios de desarrollo relacionados con QGIS y el ecosistema de sistemas de información geográfica de código abierto.[41].

3.7.2. Usos del QGIS

El QGIS tiene la capacidad de manejar numerosos formatos gracias a GDAL y proporciona un amplio apoyo para proyecciones usando PROJ. Los proyectos en QGIS suelen incluir un mapa de fondo, que comúnmente se muestra en forma de mosaicos raster o vectoriales, ya sea de forma offline o a través de un servicio en línea. Además, a menudo se añaden otros tipos de datos, como vectores guardados en formatos locales como GeoPackage o en sistemas de bases de datos como PostgreSQL/PostGIS. Recientemente, QGIS ha desarrollado características en 3D, que incluyen nubes de puntos, y se utiliza para visualizar y manipular información proveniente de lidar y diversas fuentes de datos tridimensionales. Los usuarios tienen la posibilidad de utilizar las herramientas de procesamiento de QGIS para realizar análisis espaciales avanzados y obtener información valiosa de sus conjuntos de datos geospaciales. QGIS facilita la creación de mapas muy elaborados, ofreciendo a los usuarios la oportunidad de diseñar representaciones visuales atractivas para presentaciones, publicaciones o decisiones estratégicas[43].

Al ser software de código abierto, promueve un entorno colaborativo donde los usuarios pueden enriquecer sus capacidades mediante complementos, ajustar sus procedimientos para satisfacer las necesidades específicas de cada proyecto e incluir la herramienta dentro de su arquitectura de software más amplia. QGIS se aplica en una variedad de campos, tales como ciencias ambientales, planificación urbana, agricultura y construcción, lo que lo convierte en un recurso valioso para profesionales, investigadores y entusiastas de análisis de datos espaciales[42].

3.7.3. Ventajas de utilizar QGIS

3.7.3.1. Es gratuito y de código abierto

QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) licenciado bajo la Licencia Pública General (GNU), que le permite usar QGIS libremente para cualquier propósito (incluso comercial), modificar el software (acceder al código fuente) y distribuir copias (instalar QGIS en tantas computadoras como desee)[43].

3.7.3.2. Es multiplataforma: Linux, Windows, Mac y Android

QGIS funciona en varios sistemas operativos: Linux, Windows, Mac y Android. También se puede instalar en una memoria USB, lo que permite transferir QGIS de un ordenador a otro sin necesidad de instalarlo[43].

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo y cualitativo, centrado en el análisis de datos medibles y verificables que permitieron evaluar los cambios en el uso y cobertura del suelo y su relación con la amenaza hidrometeorológica. Se recopilaron y procesaron variables como porcentajes de cambio en las coberturas, valores de precipitación, pendientes y características del suelo. Para el tratamiento y análisis de la información, se emplearon herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que facilitaron la integración de múltiples capas de información y la generación de mapas temáticos. Esta metodología permitió una interpretación objetiva y fundamentada, orientada a comprender las dinámicas territoriales y su influencia en la susceptibilidad a eventos hidrometeorológicos.

4.1. Esquema Metodológico

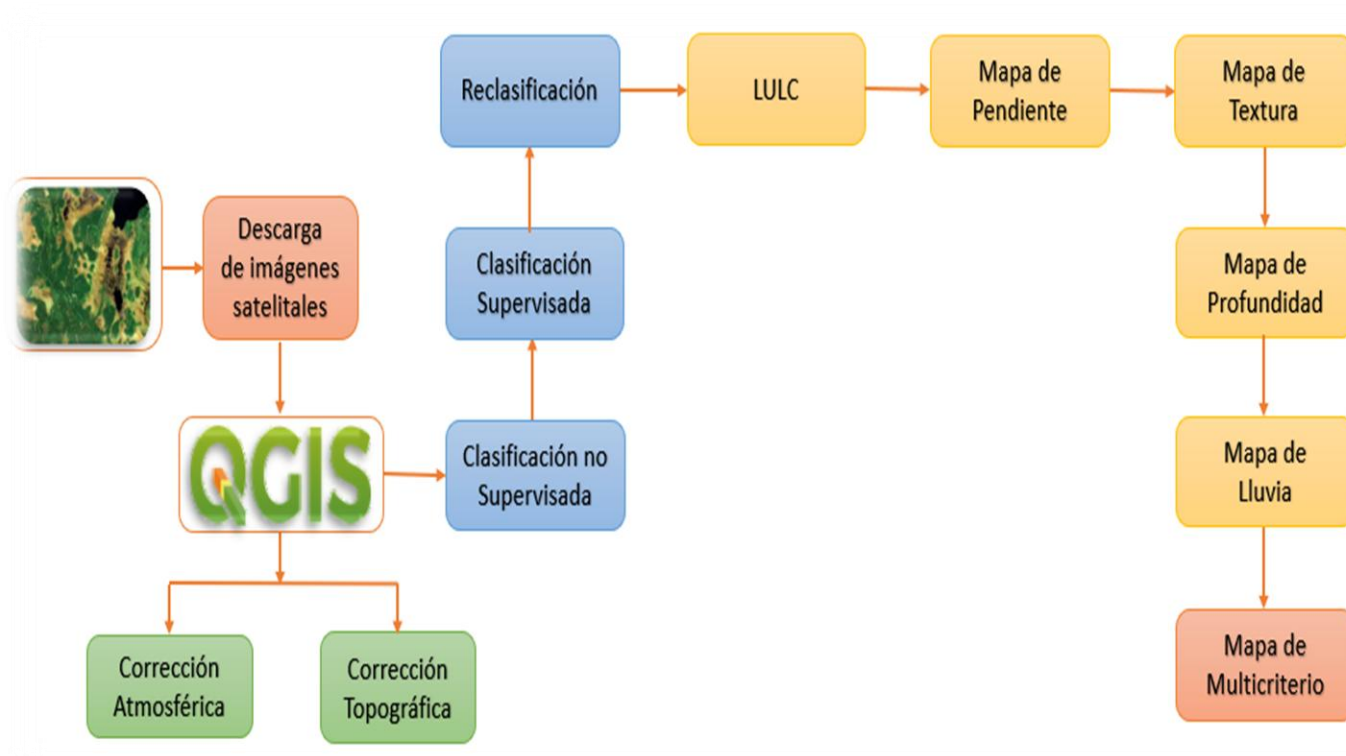


Figura 7 Esquema Metodológico

Elaborado por: Autores

4.2. Área de estudio: de las quebradas “Loma de los Vientos y Valle Alto”

Las quebradas “Loma de los Vientos y Valle Alto” presenta un área de 101.85 Ha ubicada al suroeste del Catón Portoviejo, en donde se encuentra ubicada la “Urbanización Valle alto” en la cual presentan daños por los deslizamientos ocurridos en el mismo por tal motivos se esta evaluando que zonas podrian presentar mismos deslizamientos.

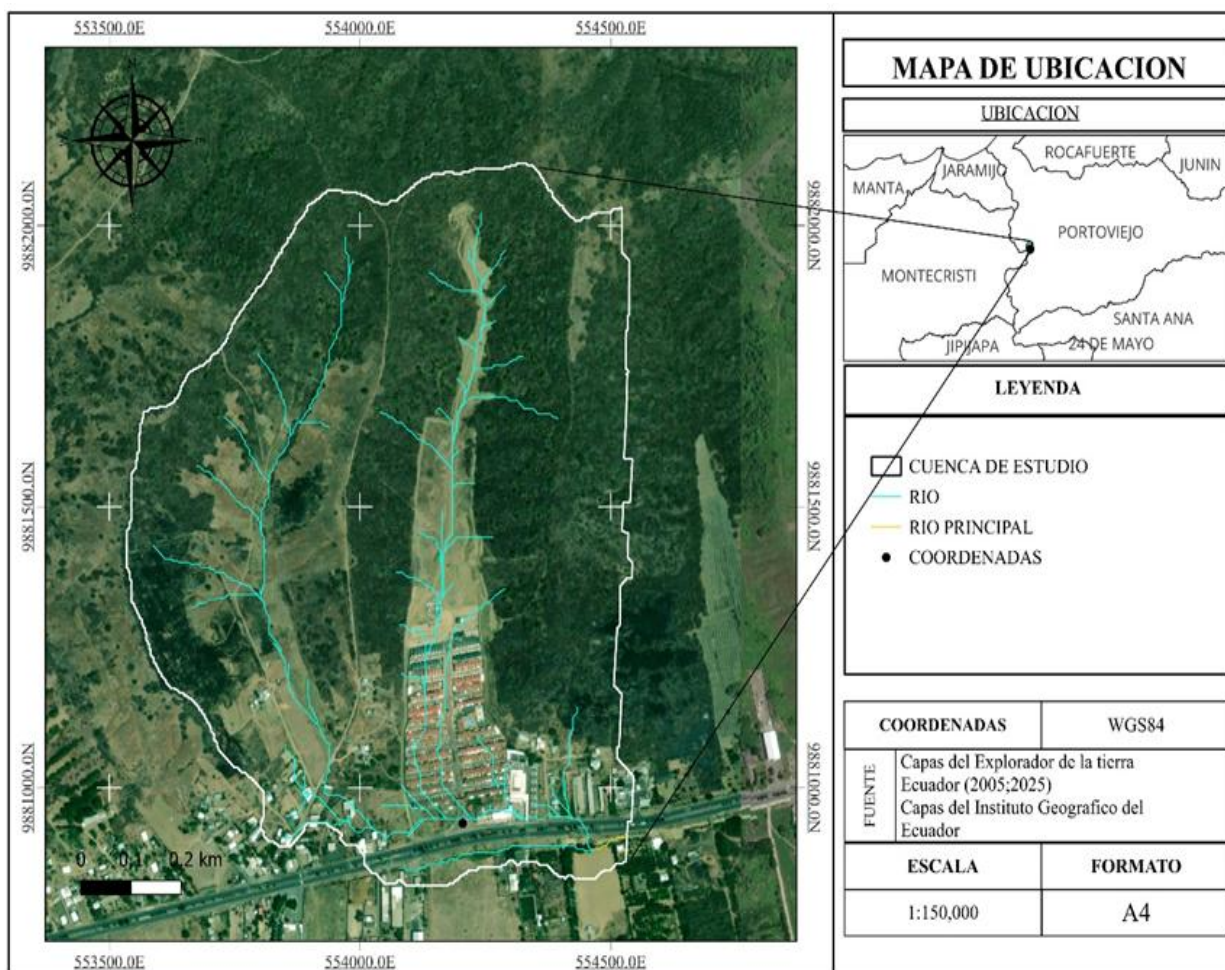


Figura 8 Mapa de ubicación de las quebradas “Loma de los Vientos y Valle Alto”

Elaborado por: Autores

4.3. Imágenes satelitales de las quebradas “Loma de los Vientos y Valle Alto”

La data satelital es proporcionada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Esta plataforma en línea alberga colecciones de datos geográficos provenientes de varios satélites. Landsat, con sus productos (1 - 4 mss, 4 - 5 tm, 7 etm y 8 ol/tirs), se presenta sin correcciones atmosféricas o topográficas[44]. Los datos del satélite Landsat requieren un preprocesamiento antes de generar sus productos digitales, y estos materiales digitales son fundamentales para

llevar a cabo la investigación sobre el uso del suelo en la quebrada "Loma de los Vientos" en Portoviejo, Ecuador.

4.4. Corrección Atmosférica

La corrección atmosférica es el primer paso al trabajar con las imágenes de Landsat -Satellite para su preprocesamiento. Este ajuste tiene como objetivo rectificar la difusión atmosférica, la reflexión y la luz solar, y se lleva a cabo a través del método Chávez (DOS1)[45]. Los procedimientos se encuentran en el SCP, que permite acceder directamente a los datos de las imágenes en un archivo de texto, y basado en esta información, se aplica el método DOS1[46]. Esta corrección resulta crucial para el tratamiento de las imágenes de Landsat, ya que ayuda a ajustar la reflectancia que se ve afectada por las nubes.

4.5. Corrección Topográfica

La corrección de la topografía es la etapa final del pre procesamiento de imágenes satelitales. Este proceso se basa en un modelo que se utiliza antes de llevar a cabo el análisis de delimitación de cuencas en el Modelo de Elevación de Terreno (DEM) y en el formato Shapefile (SHP), utilizando herramientas de SAGA como Fill, Flow 7 Direction, Flow Accumulation y Watershed. El DEM es la información que se empleará para llevar a cabo la corrección topográfica de las imágenes, aplicando el método No Lambertiano de Minnaert. Este enfoque implica el uso de datos base con valores de Minnaert que oscilan entre 0.25 y 0.50 para realizar la corrección topográfica de las imágenes[47]. La corrección topográfica es un paso fundamental para mejorar la calidad de las imágenes en el área de estudio que estamos analizando.

4.6. Clasificación no Supervisada

La clasificación no supervisada es una técnica de procesamiento digital de imágenes satelitales que agrupa automáticamente los píxeles de una imagen en clases de cobertura terrestre a píxeles y los categorizar en (agua, áreas metropolitanas, bosques, horticultura, edificios, agricultura, pastizales, montañas y tierras alta)[48]. El objetivo de la agrupación de imágenes es organizar de forma natural todos los píxeles de una imagen en clases o temas de cobertura terrestre, los distintos tipos de componentes muestran una combinación distintiva en función de su reflectancia a su vez el algoritmo calcula grupos (clusters) en función de la distancia espectral entre los píxeles, asignando cada uno a la clase más cercana define el número inicial de clases

(por ejemplo, 5, 10, 15), y el algoritmo las ajusta iterativamente hasta que las diferencias internas sean mínimas[49].

4.7. Clasificación Supervisada

La clasificación supervisada se lleva a cabo utilizando un algoritmo que categoriza y también requiere valoración humana o parámetros definidos para lograr una clasificación con áreas de entrenamiento (ROI). En la clasificación supervisada, el SCP incluye tres métodos que se pueden aplicar: la Distancia Mínima, donde se asigna una clase a cada píxel de una región desconocida en base a una clase promedio adyacente; la Máxima Probabilidad, que adapta cada región a una elipse que refleja la varianza y covarianza para asignar una clase en la clasificación[50].

Y al final, el Mapeo de Ángulo Espectral nos indica que los valores de 0 corresponden a una misma clase, mientras que si los valores son 30 o superiores, las clases son distintas. Este enfoque ayuda en la diferenciación de clases o en la identificación de similitudes[51]. La clasificación supervisada es un procedimiento clave en la categorización del uso de la tierra, ya que optimiza el proceso, aumentando así la exactitud de los resultados obtenidos con los métodos aplicados.

4.8. Análisis Multitemporal de las imágenes

El análisis multitemporal correspondiente al período en la cuenca no se limita únicamente a identificar las variaciones en las distintas categorías de uso y cobertura del suelo, sino que también busca comprobar que estos usos de los suelos clasificados se han llevado a cabo con un alto nivel de efectividad en la zona de investigación. Por esta razón, se eligió la metodología de precisión de accuracy a través del SCP, que nos proporcionará resultados del Índice de Kappa [52].

El valor de este índice oscila entre 0 y 1, lo que indica que los resultados que se acercan a 1 indican una buena clasificación, mientras que aquellos más cercanos a 0 sugieren una validación deficiente de las clasificaciones [50]. El estudio de múltiples períodos es fundamental para examinar las variaciones en la utilización del terreno y comprobar la eficacia de las categorizaciones llevadas a cabo en las quebradas "Loma de los Vientos y Valle Alto".

4.9. Vinculación de deslizamientos.

La relación entre las alteraciones en el uso y la cobertura del terreno en un periodo específico ayuda a localizar áreas con un mayor riesgo de deslizamientos. Esta relación se establece mediante la reclasificación de las clases de uso y cobertura del suelo en función de su grado de estabilidad o inestabilidad frente a procesos de remoción en masa. Para ello, se emplea una matriz binaria donde se asigna un valor de 0 a las coberturas que representan (baja probabilidad a deslizamientos) y un valor de 1 a aquellas que tienen una (alta probabilidad a deslizamientos)[53]. Al combinar esta información con variables topográficas derivadas del Modelo Digital de Elevación (DEM), como la pendiente, se puede generar un mapa temático que refleja zonas de amenaza por deslizamientos. Esta estrategia posibilita crear conexiones claras entre las alteraciones en el paisaje y la posible aparición de deslizamientos, lo que a su vez apoya la toma de decisiones en la gestión del riesgo y la planificación del uso del suelo[32]. Este enfoque es fundamental para una planificación territorial sostenible, ya que permite anticipar zonas de riesgo mediante análisis de cobertura del suelo y topografía mejora la precisión en la identificación de amenazas.

4.10. Evaluación de multicriterio

Un análisis que considera múltiples criterios, en el marco de los Sistemas de Información Geográfica, es un procedimiento que permite identificar varias soluciones a un problema, utilizando principalmente información cartográfica como punto de partida[54].

Puedes realizar tus análisis multicriterio tanto en el ámbito de los datos vectoriales (que son valores discretos) como en el de las imágenes (que representan valores continuos), pero serán las imágenes ráster las que ofrecerán más posibilidades para obtener resultados cuantitativos más enriquecidos. En otros entornos, es posible que encuentres este tipo de análisis de manera indirecta, a través de herramientas que utilizan criterios como fundamento para desarrollar una solución[55].

Mientras que el enfoque de variables vectoriales acabará por revelar la mezcla de áreas con y sin la presencia de la variable, el enfoque de variables ráster también te ayudará a detectar esa combinación espacial y, además, te ofrecerá un valor numérico que te permitirá jerarquizar las áreas[49]. Así, al realizar un análisis multicriterio basado en datos ráster, se tendrá la posibilidad de obtener una variedad de valores territoriales, lo que te permitirá contar con diversas opciones y establecer prioridades basadas en tus criterios iniciales.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El estudio de los cambios en el uso y cobertura del suelo a lo largo de este tiempo en las quebradas “Loma de los Vientos y Valle Alto” reveló transformaciones importantes entre los años 2005 y 2025. Los hallazgos indican que la superficie forestal ha sufrido una reducción continua, mientras que las áreas dedicadas a la agricultura y las zonas urbanas han experimentado un aumento, el cual se da por la actividad humana que esta vinculada al desarrollo del sector.

5.1. Información de imágenes satelitales

Esta clasificación de usos de la tierra comenzó con la recopilación de información del satelital Landsat, para lo cual se adquirieron dos imágenes raster correspondientes a los años 2005 y 2025 desde el sitio web de USGS (Earth Explorer). Estas imágenes se eligieron tomando en cuenta una baja cantidad de nubes y una representación adecuada del área de estudio. A continuación, la tabla que representa información relevante de las imágenes seleccionadas.

Tabla 5 Información de Imágenes Satelitales

Imagen Satelital	Nº	Resolución	Nº Bandas	Fecha	Colección
Años 2005 LE07_L1TP_01106 1_20050817_20200 914_02_T1	1	30 m	8	17/02/2005	60-T1
Años 2025 LC09_L2SP_01106 1_20250621_20250 622_02_T1	2	30 m	10	21/03/2025	60-T1

Elaborado por: Autores

5.1.1. Relleno de Datos de Imagen Cruda

La imagen original de Landsat de 2005 muestra áreas con valores faltantes, debido a problemas en el escaneo del sensor y restricciones en la obtención de las escenas. Estos espacios vacíos crean interrupciones que complican la interpretación visual y disminuyen la calidad del análisis multiespectral.

A través de la técnica de relleno de datos (gap filling), se añadió información extra proveniente de escenas cercanas en el tiempo las cuales se va a visualizar a continuación.

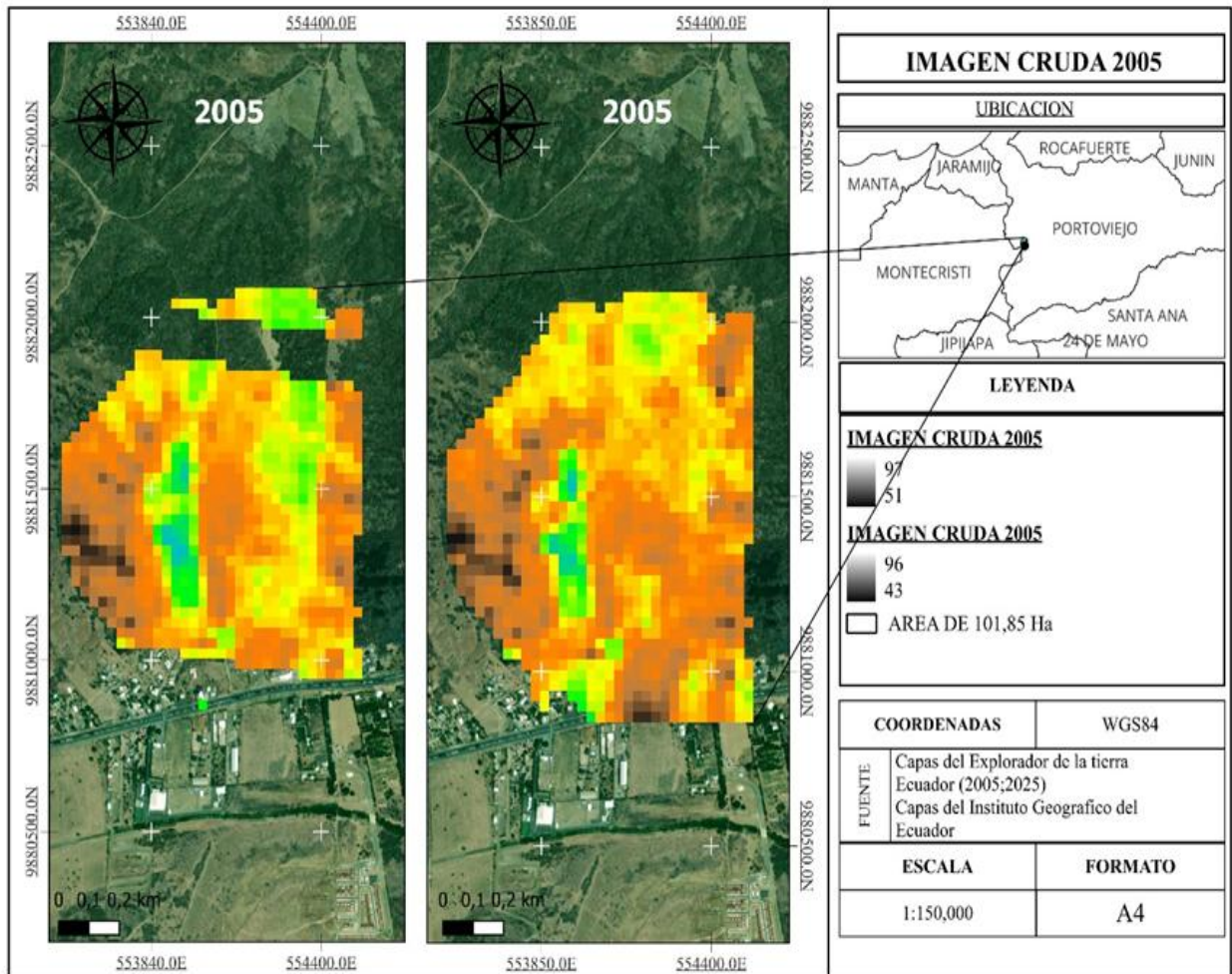


Figura 9 Imagen satelital cruda y corregida 2005.

Elaborado por: Autores

A su vez en las imágenes satelitales correspondientes al año 2025 ya contaban con los datos completos y libres de vacíos, por lo que no fue necesario aplicar el mismo procedimiento de relleno de datos que se realizó para las escenas del 2005.

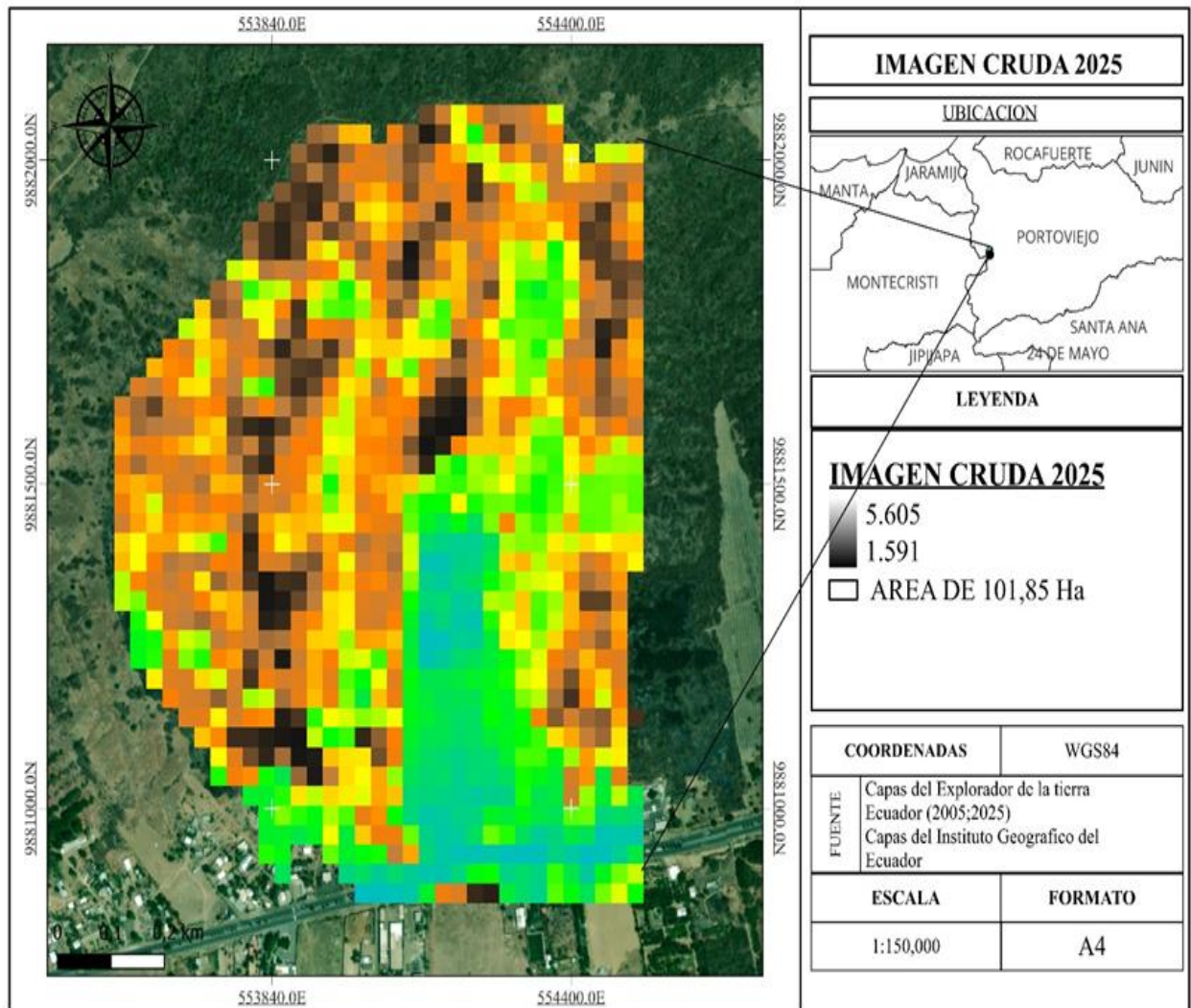


Figura 10 Imagen Satelital Cruda 2025

Elaborado por: Autores

5.2. Análisis de resultados de la corrección atmosférica y topográfica

Después de haber pasado las imágenes de 2005 y 2025 por el relleno de datos procedemos a realizar la corrección atmosférica y topográfica con el fin de mejorar su calidad radiométrica y garantizar que las distintas imágenes sean comparables.

- La corrección atmosférica se fue realizando mediante el método DOS 1 (Dark Object Subtraction) en el cual nos ayuda a disminuir las partículas, dándonos así un contraste más nítido y eliminando el brillo residual en las bandas visibles. Este proceso se refleja en la zona de cultivo, urbano y arbóreo también optimiza el cálculo de índices espectrales como el NDVI[45].

- A su vez la corrección topográfica ajusta la variación de luminosidad que surge de la diferencia de pendiente y orientación, con esto nos permite disminuir los efectos de sombra de áreas irregulares, lo que permite obtener valores radiométricos más consistentes[46].

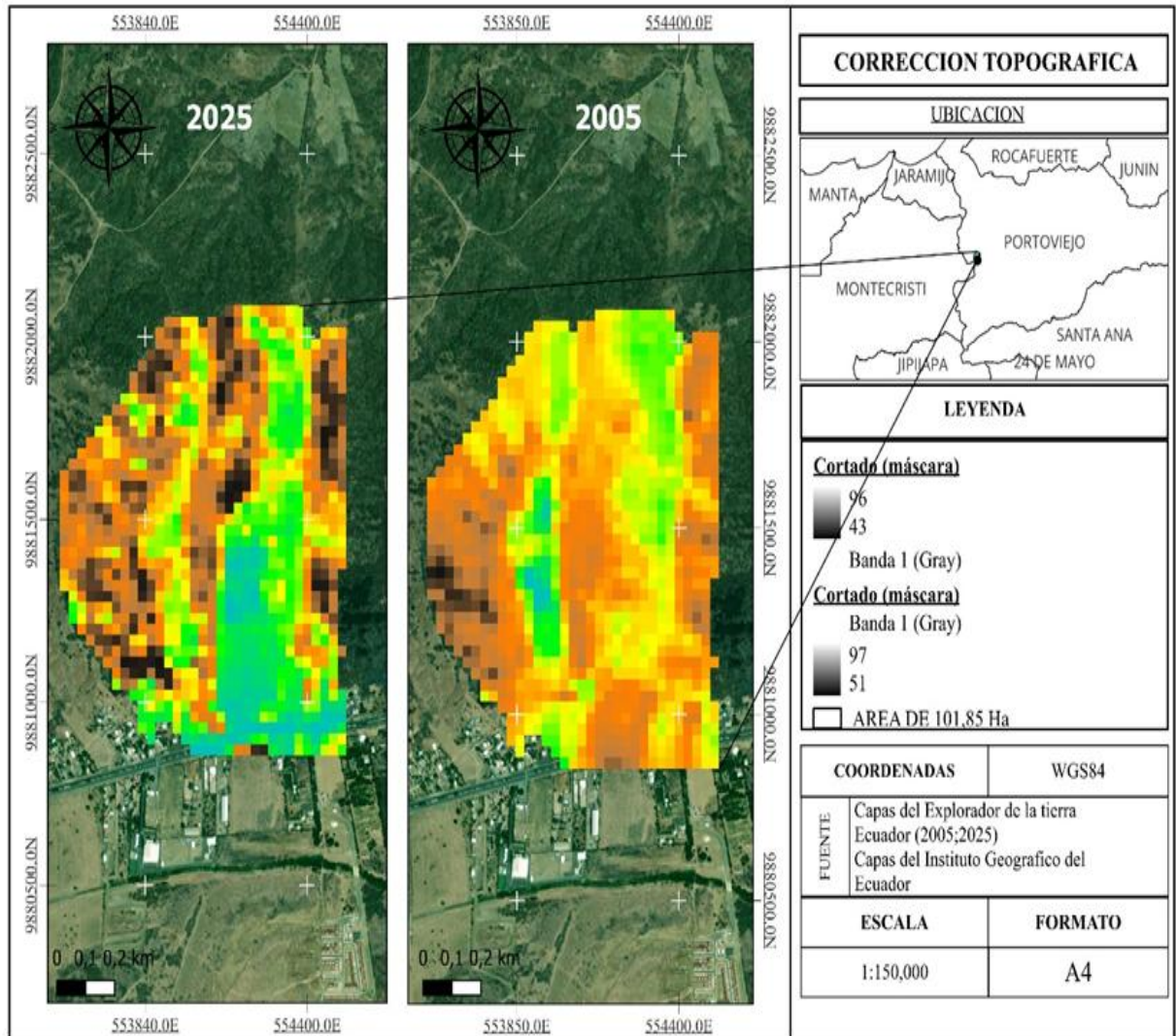


Figura 11 Corrección Atmosférica y Topográfica 2005 y 2025

Elaborado por: Autores

5.3. Resultados de la Clasificación no Supervisada

La clasificación no supervisada sobre las imágenes de 2005 y 2025 en las cuales nos permitió agrupar automáticamente los píxeles en diferentes clases espectrales que representan las principales coberturas presentes en la zona de estudio.

Este proceso se inició con la definición de tres tipos clases las cuales son: (uno tierra de cultivo, dos cubierta arbórea y tres área urbana), en las que fueron refinadas iterativamente hasta

alcanzar una homogeneidad interna mínima dentro de cada grupo (cluster). Esto facilitó la identificación preliminar de patrones espaciales de uso del suelo sin necesidad de información previa de campo[48].

El resultado logrado establece un punto de partida para el análisis en diferentes momentos del tiempo, ya que facilita de manera preliminar la observación de la distribución de las coberturas de la tierra en los años analizados, siendo útil para la clasificación supervisada.

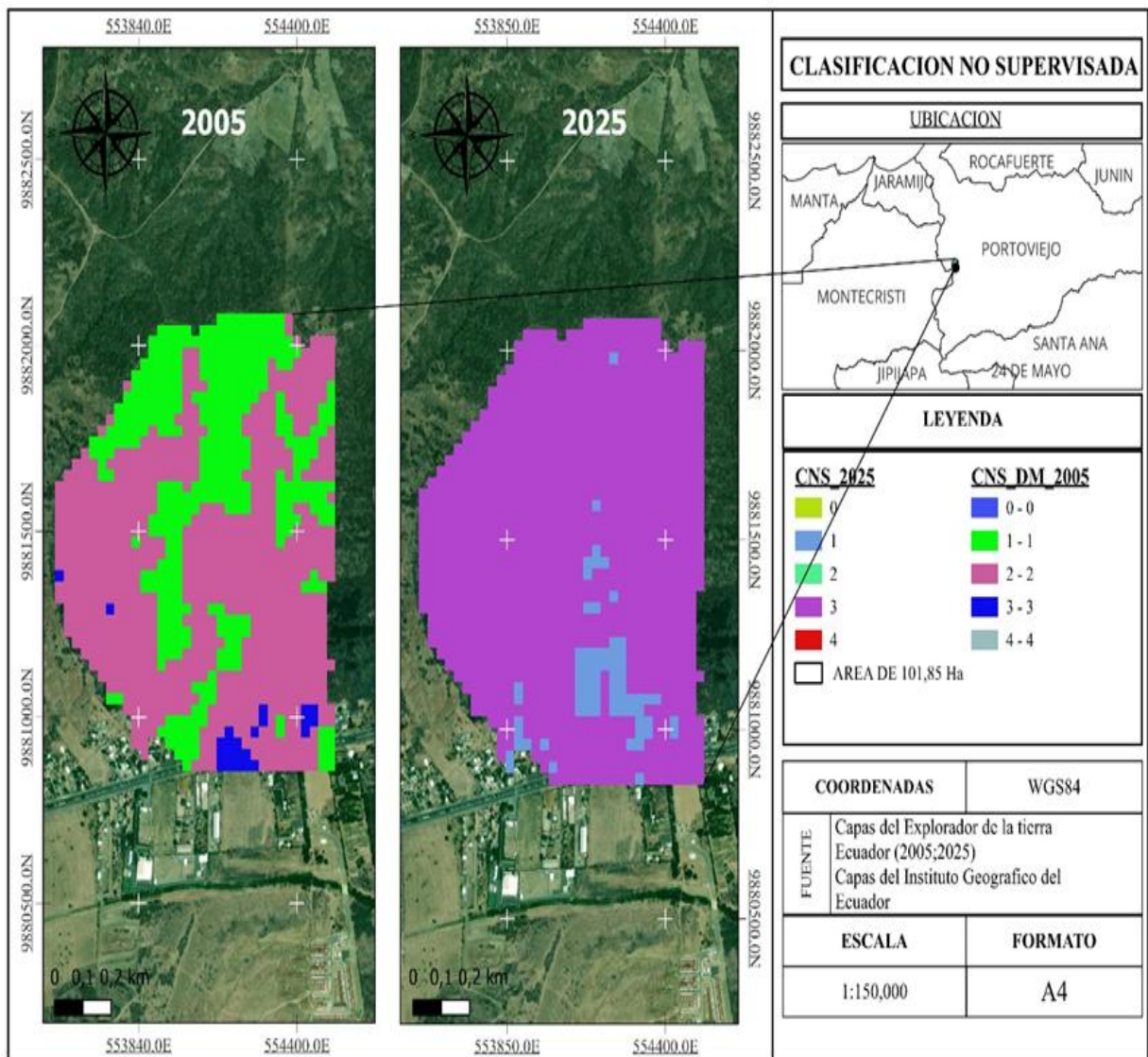


Figura 12 Mapa de Clasificación no Supervisada 2005 y 2025

Elaborado por: Autores

5.4.Resultados de la Clasificación Supervisada

La utilización de la clasificación supervisada en las imágenes de Landsat de 2005 y 2025 facilitó una identificación más exacta de los tipos de uso del suelo en las quebradas “Loma de los vientos y Valle Alto”. Gracias a la incorporación de áreas de entrenamiento (ROI) y a la aplicación de métodos como (Distancia Mínima, Máxima Probabilidad y Mapeo de Ángulo Espectral), se logró disminuir la confusión entre las distintas clases espectrales, lo que permitió una mejor distinción de categorías tales como cubierta arbórea, tierra de cultivo| área urbana y tierra vacía[50].

En donde nosotros podemos notar que en la primera clase es de Tierra de Cultivo y su NDVI en el año 2005 es una de variación de 0.15 a 0.20 y en el NDVI del año 2025 su variación es de 0.36 a 0.66, así también tenemos la segunda clase que es de Cubierta Arbórea en el cual su NDVI para el 2005 es de 0.20 a 0.24 y el NDVI para el 2025 es de 0.66 a 0.87, a su vez tenemos la tercera clase que es de área urbana donde su NDVI del 2005 va a ser de 0 a 0.08 y el NDVI del 2025 va a ser de 0.045 a 0.15 y finalmente la cuarta clase que es Tierra Vacía donde su NDVI del 2005 va a ser 0.08 a 0.15 y el NDVI del 2025 0.15 a 0.36 con esto identificando los diferentes tipos de clases que se hallaron en la zona, a su vez en el recorte más grande que se realizó se evidencio presencia de cuerpos de aguas minúsculos que luego fueron descubiertos por las ondas pero terminaron siendo abarcados por los procesos de suavizador de ruido en el cual se perdieron con este proceso.

Tabla 6 Información de las Clases Para las Clasificaciones en el Satélite Landsat.

ID	CLASES	NDVI 2005	NDVI 2025	COLOR
10	Tierra de Cultivo	0.15 - 0.20	0.36 – 0.66	#E4DC54
50	Cubierta Arbórea	0.20 - 0.24	0.66 - 0.87	#005400
190	Área Urbana	0 - 0.08	0.045 - 0.15	#FF0000
200	Tierra Vacía	0.08 - 0.15	0.15 - 0.36	#808080

Elaborado por: Autores

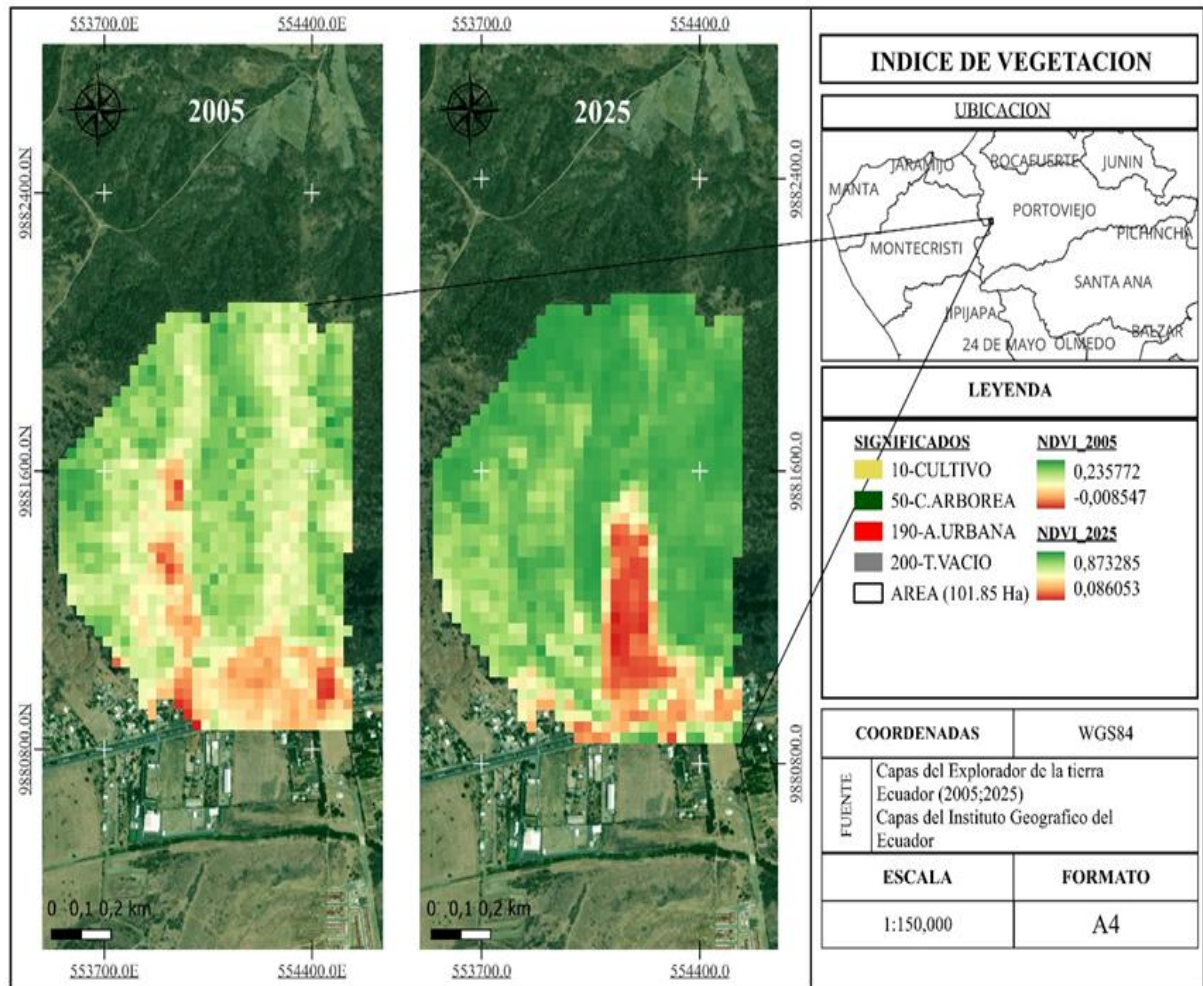


Figura 13 Mapa de Índice de Vegetación

Elaborado por: Autores

5.4.1. Reclasificación supervisada distancia mínima más el Majority Filter

La reclasificación realizada a través del procedimiento de Distancia Mínima, junto con el uso del filtro Majority, resultó en un mapa temático más claro y uniforme. El uso de la Distancia Mínima ayudó a asignar cada píxel a un grupo para la clase espectral esta para las zonas de entrenamiento, mientras que el filtro Majority disminuyó el ruido espacial, suprimiendo pequeños conjuntos de píxeles aislados y aumentando la uniformidad de las coberturas[56]

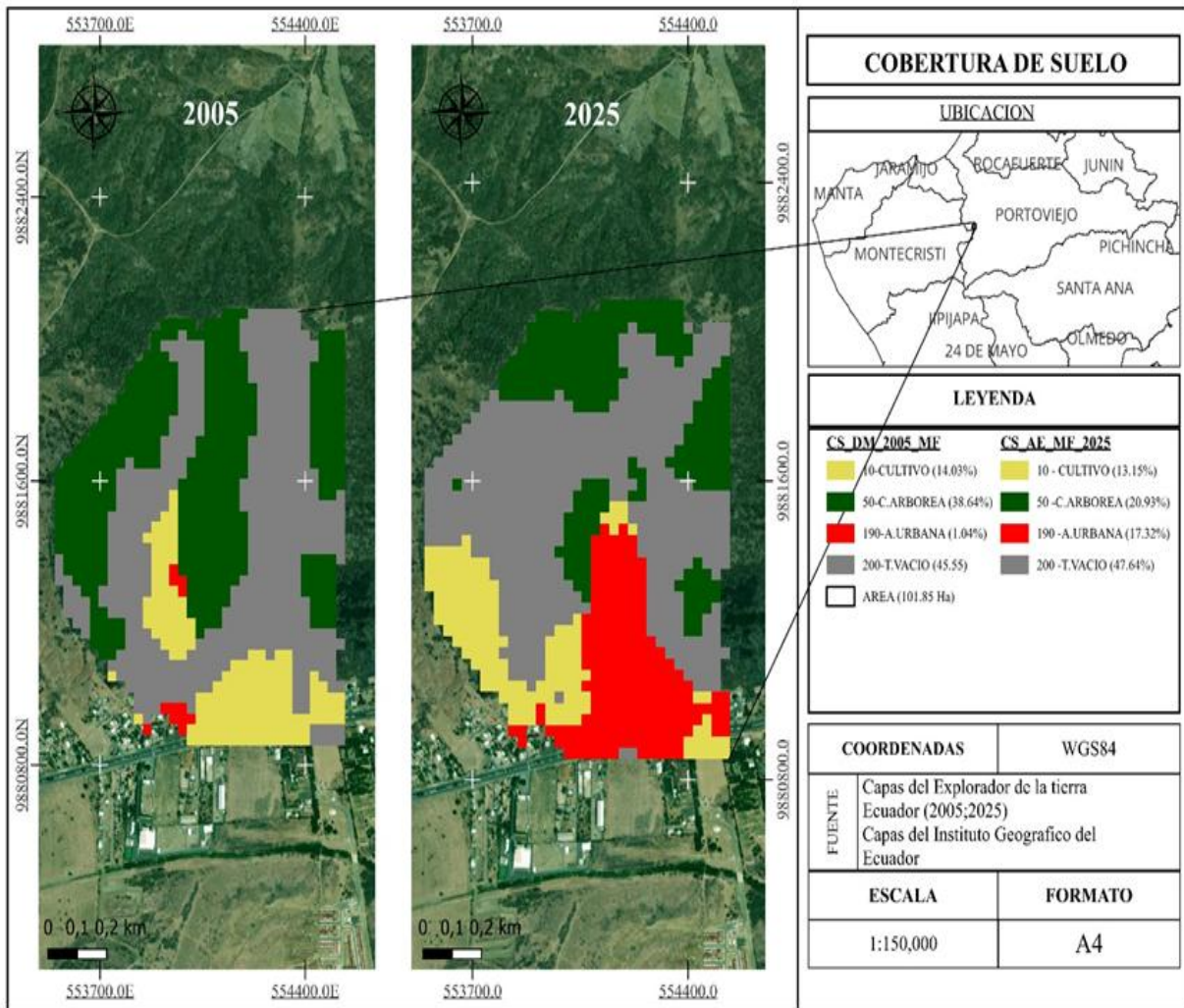


Figura 14 Mapa de Cobertura del Suelo

Elaborado por: Autores

El estudio multitemporal de las quebradas “Loma de los Vientos y Valle Alto” en los años 2005 y 2025 muestra alteraciones notables en cómo se distribuye el uso del suelo. En el cual para el 2005 la tierra de cultivo es de 14,03 %, para la cobertura arbórea con un 38,64 %, para el área urbana es de 1,04 % y para la tierra vacia con un 45,55% del total de la zona de estudio en donde se nota la clase con mayor porcentaje.

Para el año 2025 la tierra de cultivo es de 13,15%, para la cubierta arbórea 20,93%, para el área urbana es de 17,32% y para la tierra vacía un 47,64%. En el cual se evidencia cambios en el uso y cobertura del suelo donde la clase mas evidente es el área urbana con un incremento significativo el cual fue de 1,04% a 17,32% (con un aumento del 16,28%), la disminución en la cubierta arbórea la cual fue de 38,64% a 20,93% (con una reducción del 17,71%) lo que sugiere procesos de restauración en la cobertura del suelo. En cuanto a la tierra de cultivo tuvo un cambio mínimo el cual fue de 14,03% a 13,15% (con una reducción de 0,88%) y finalmente

la tierra vacía con un aumento el cual fue de 45,55% a 47,64% (con un aumento de 2,09%), lo que indica la expansión de áreas pobladas y la expansión humana sobre el entorno.

En el cual muestran un avance significativo en el área urbana, un aumento en la tierra vacía, una disminución mínima en la tierra de cultivo y una disminución importante en la cubierta arbórea. Estas modificaciones afectan de manera directa a la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial, especialmente ante el peligro de derrumbes y el crecimiento urbano sobre terrenos que podrían ser inestables.

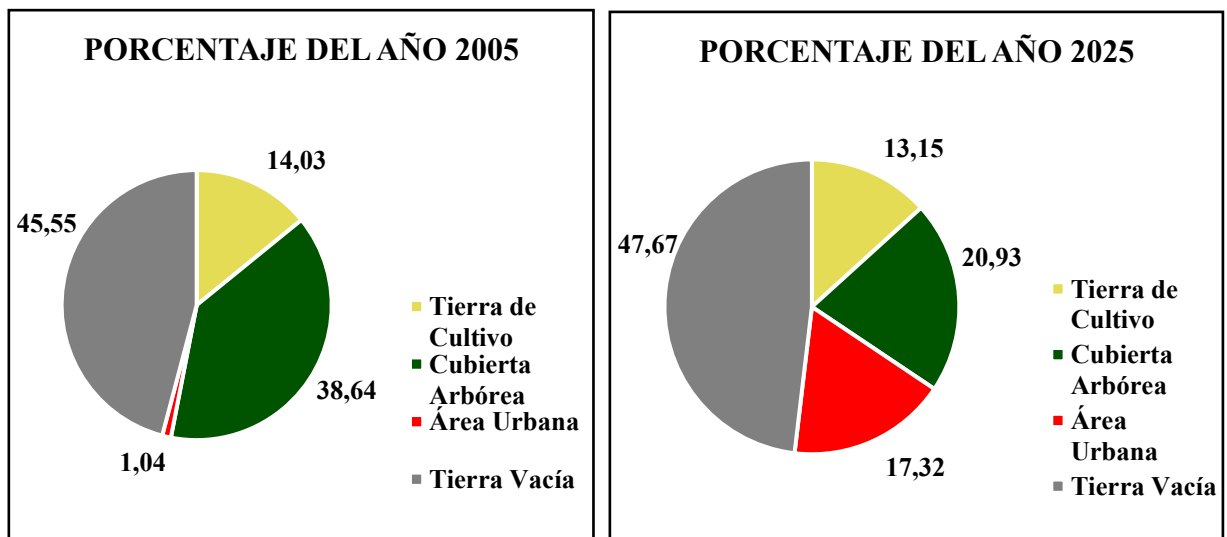


Figura 15 Porcentaje del año 2005 y 2025

Elaborado por: Autores

5.4.2. Análisis del Mapa de Derrumbes del 2005 y 2025

El mapa de derrumbes hace referencia a las zonas que son de mayor y menor amenaza, así mismo, donde el color rojo con un 20,81% representa áreas con alta probabilidad de ocurrencia de derrumbes. Estas zonas se distribuyen principalmente en áreas con pendientes pronunciadas y en zonas posiblemente afectadas por factores de inestabilidad como cambios en el uso y cobertura del suelo, también se tiene las zonas de color naranja con un 48,51% en la cual se encuentra en una zona intermedia, es decir, en estas se pueden ocasionar posibles deslizamientos como no se puedan ocasionar los mismos, finalmente las zonas de color verde con un 30,68% donde no se ocasionarán derrumbes siendo estos los más estables en la zona de estudio.

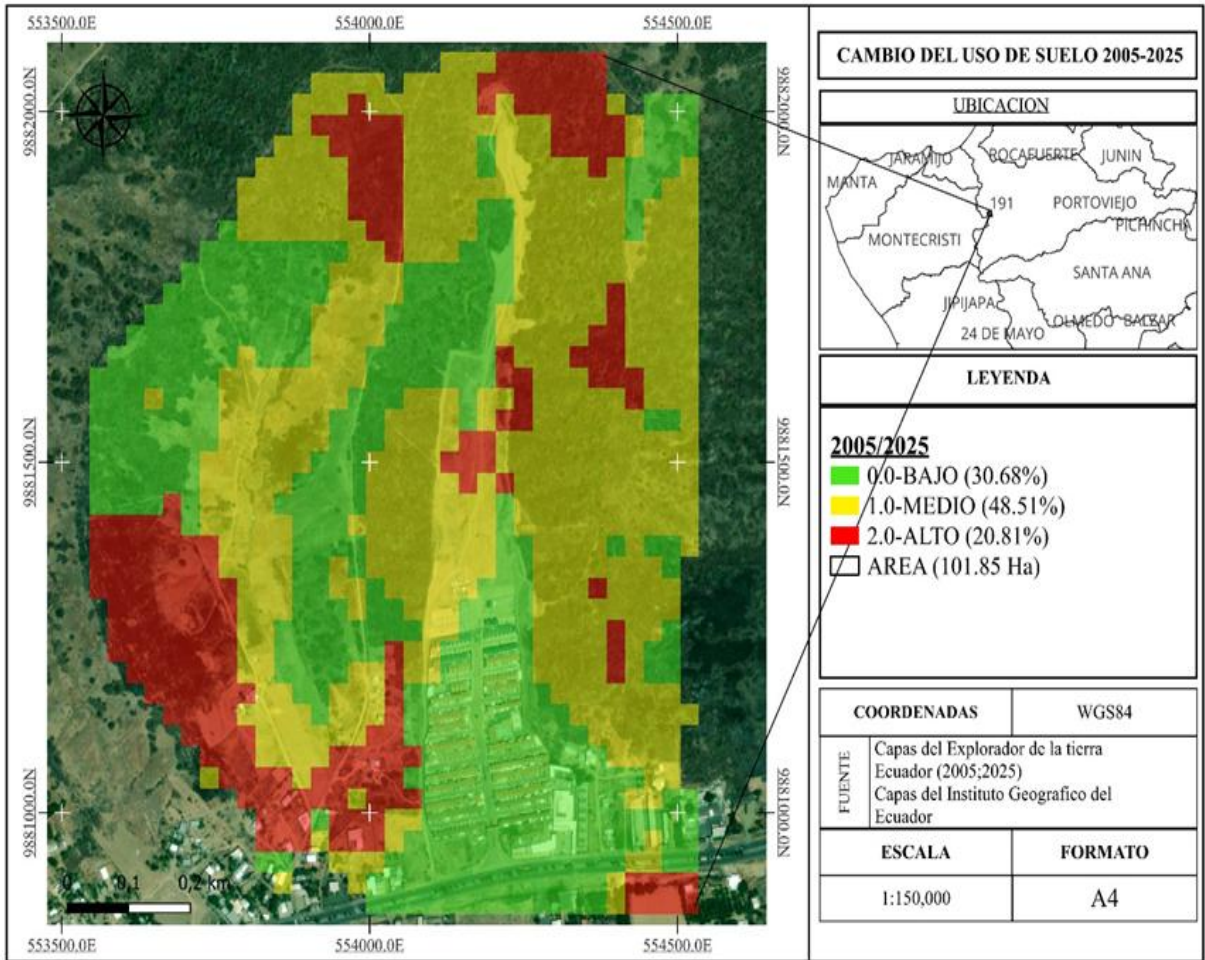


Figura 16 Mapa de Derrumbes

Elaborado por: Autores

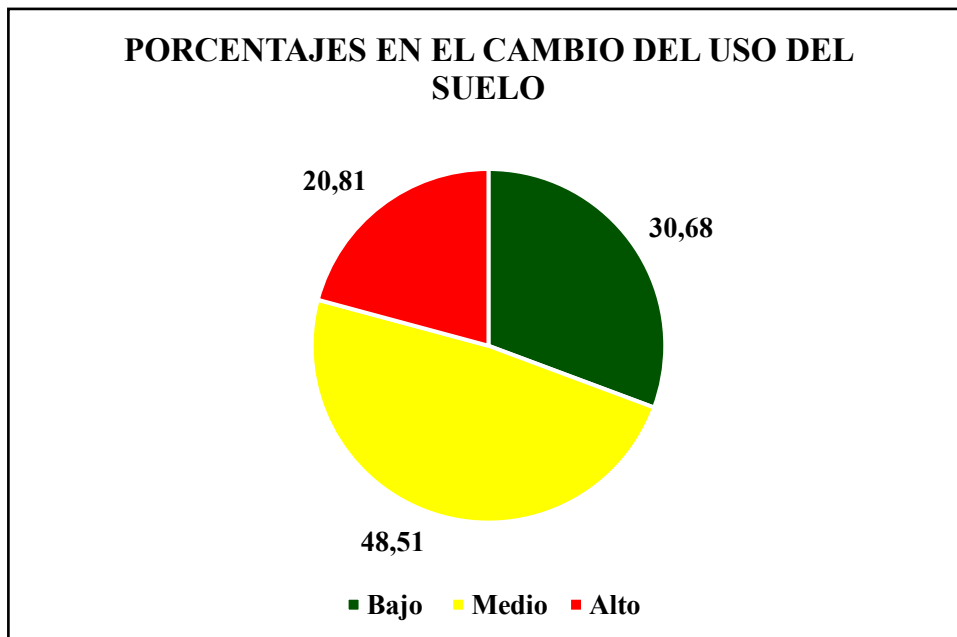


Figura 17 Porcentajes en el Cambio del Uso del Suelo

Elaborado por: Autores

5.4.3. Análisis del Mapa de Pendiente

El mapa de pendiente nos da a conocer la inestabilidad del área de estudio que esta es de 101.85Ha, en donde este nos permite identificar las zonas mas propensas a deslizamientos, a su vez con el procesamiento realizado en el cual se utilizó la herramienta ráster para realizar el mapa de pendiente dandolos a conocer el rango que varia de 0.0021 a 31.45, lo que facilita a la localización de áreas con pendientes muy pronunciadas como son:

1) Zonas de pendiente plana (0 - 5)

Se relacionan con las secciones más oscuras del mapa. Estas zonas son adecuadas para la agricultura, la vivienda y la construcción de infraestructuras, ya que tienen menor vulnerabilidad a la erosión y deslizamientos de tierra.

2) Zonas de pendiente intermedia (15 - 30)

Están situados en tonalidades grisáceas. Caracterizan áreas con inclinación media, donde la gestión del terreno demanda prácticas de conservación para prevenir la erosión, especialmente si se destinan a cultivo o construcción.

3) Zonas de alta pendiente (mayor a 30)

La zona de alta pendiente en el mapa es la parte ploma que muestra un nivel más alto de inestabilidad, con un posible amenaza de erosión grave y vulnerabilidad a eventos de deslizamiento por lo que su uso debería ser limitado. A su vez, la forma del terreno influye de manera significativa en cómo se utiliza la tierra, las pendientes más pronunciadas pueden funcionar como áreas donde se acumula agua en la superficie, afectando la infiltración y favoreciendo la erosión que se producirá en la zona.

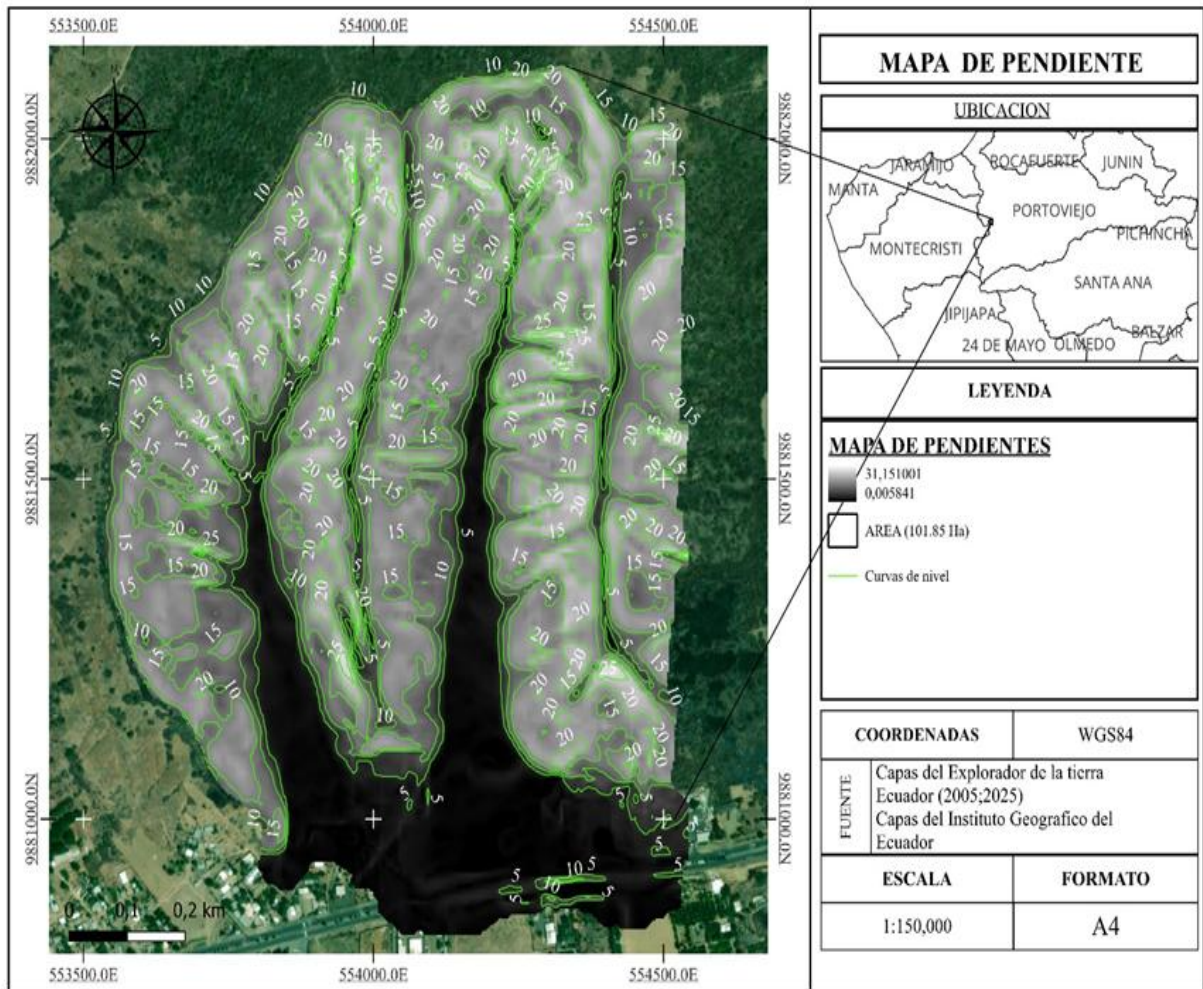


Figura 18 Mapa de Pendientes

Elaborado por: Autores

5.4.4. Análisis del Mapa de Texturas del Suelo

En el mapa de texturas del suelo nos da a conocer los diferentes tipos que se encuentran en las quebradas “Loma de los Vientos y Valle Alto”, en donde cada uno de ellos tendrá su respectivo porcentaje evidenciando la supremacia de uno de ellos, estos tipos de suelos saldrán de la zona de estudio que esta cuenta con un area de 101.85 Ha, en donde encontramos que van a existir dos tipos de suelo los cuales son: el franco arcilloso con un 21.92% el cual tendría un área de 22.33 Ha y el franco limoso con un 78.08% teniendo un de área 79.52 Ha en donde se ve que es notorio la diferencia del uno con el otro por lo que se puede decir que se evidenciará una mayor cantidad de franco limoso con el 78.08%, en el cual este retiene bien el agua, es fértil, fácil de trabajar y muy usado para cultivos variados y en menor porcentaje el franco arcilloso con un 21.92% en el cual este tiene una alta retención de agua y nutrientes es estable en

construcciones poco profundas y reduce las infiltraciones rápidas manteniendo un suelo húmedo.

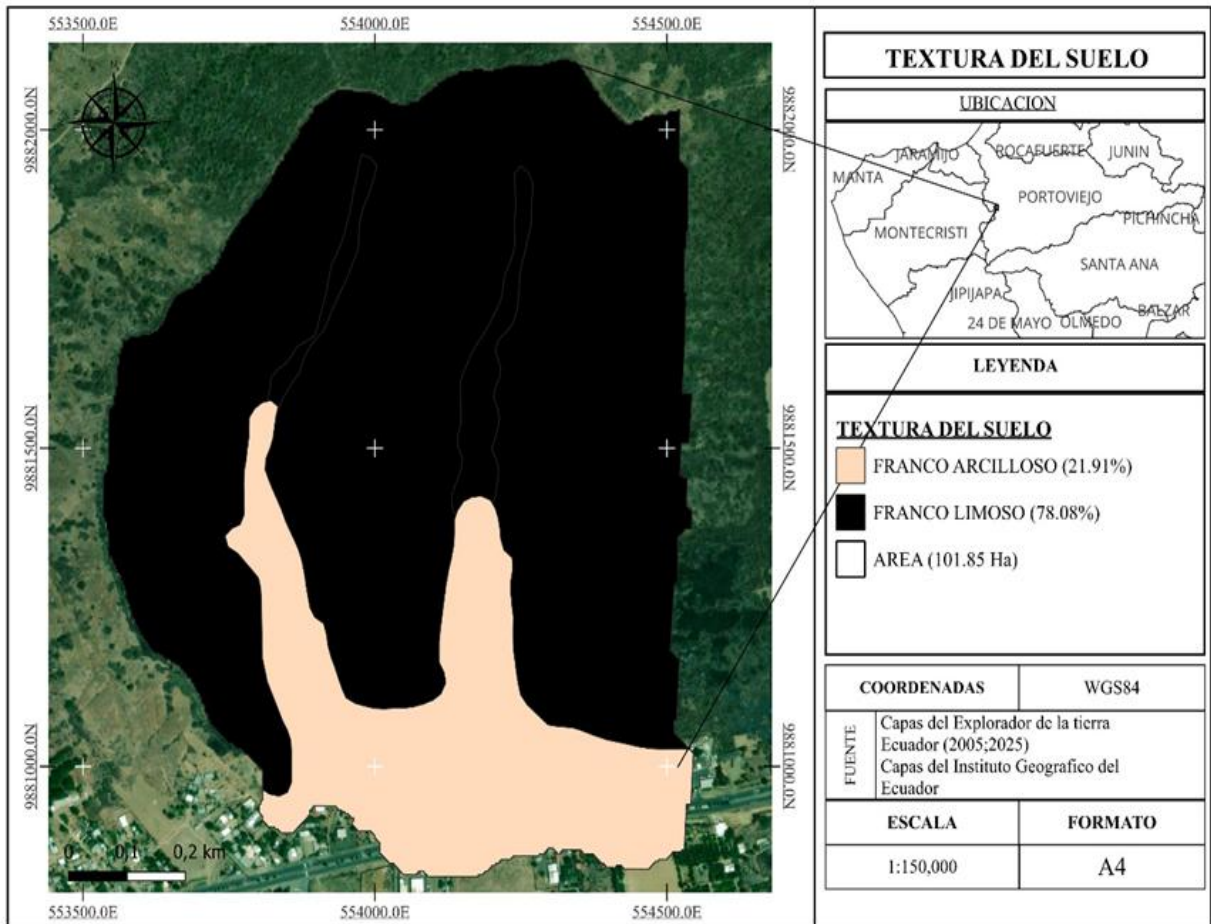


Figura 19 Mapa de Textura del Suelo

Elaborado por: Autores

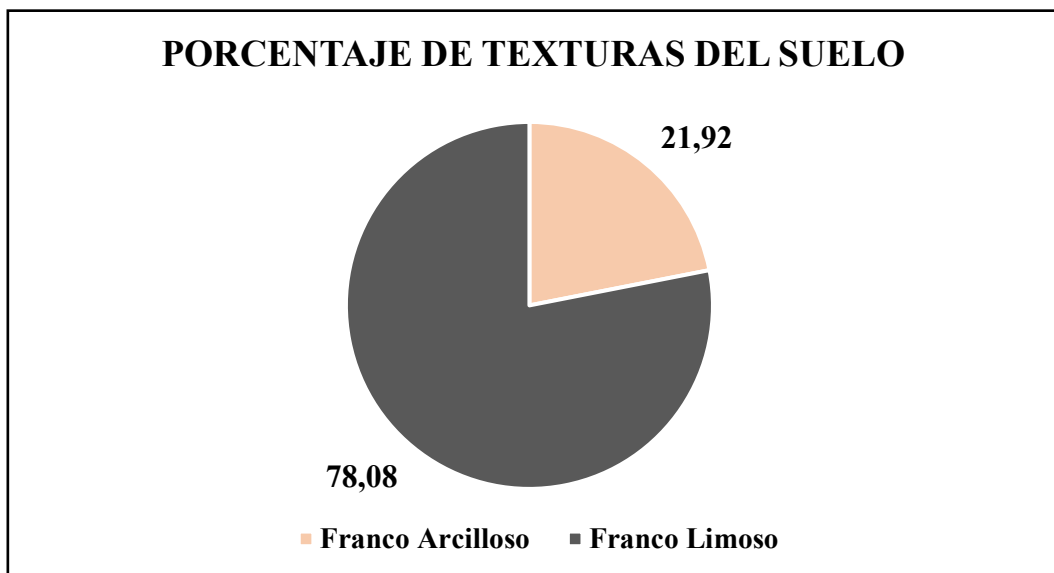


Figura 20 Porcentaje de Textura del Suelo

Elaborado por: Autores

5.4.5. Análisis de Mapa de Profundidad del Suelo

El presente mapa de profundidad del suelo de la quebrada “Loma de los Vientos y Valle Alto” con un área de 101.85 Ha, en donde se diferencia dos tipos de suelos que a su vez en ciertas partes se tendrá la capacidad de infiltración y retención de agua. El primer tipo de suelo que va a ser franco limoso con una profundidad que va de los 21 cm a los 50 cm en donde nosotros encontramos un 74.85% así mismo se tendrá el mismo tipo de suelo con una profundidad de 51 cm a 100 cm con un 3.93% el cual este es adecuado para la mayoría de cultivos agrícolas y con buen comportamiento en conservación de suelos y manejo del agua, también, tenemos el segundo tipo de suelo franco arcilloso que este tiene una profundidad de 21 cm a 50 cm con un 21.92% en el cual ofrece una mayor retención de agua y nutrientes, es ideal para cultivos que necesitan mucha humedad por su lenta infiltración y es estable para construcciones poco profundas.

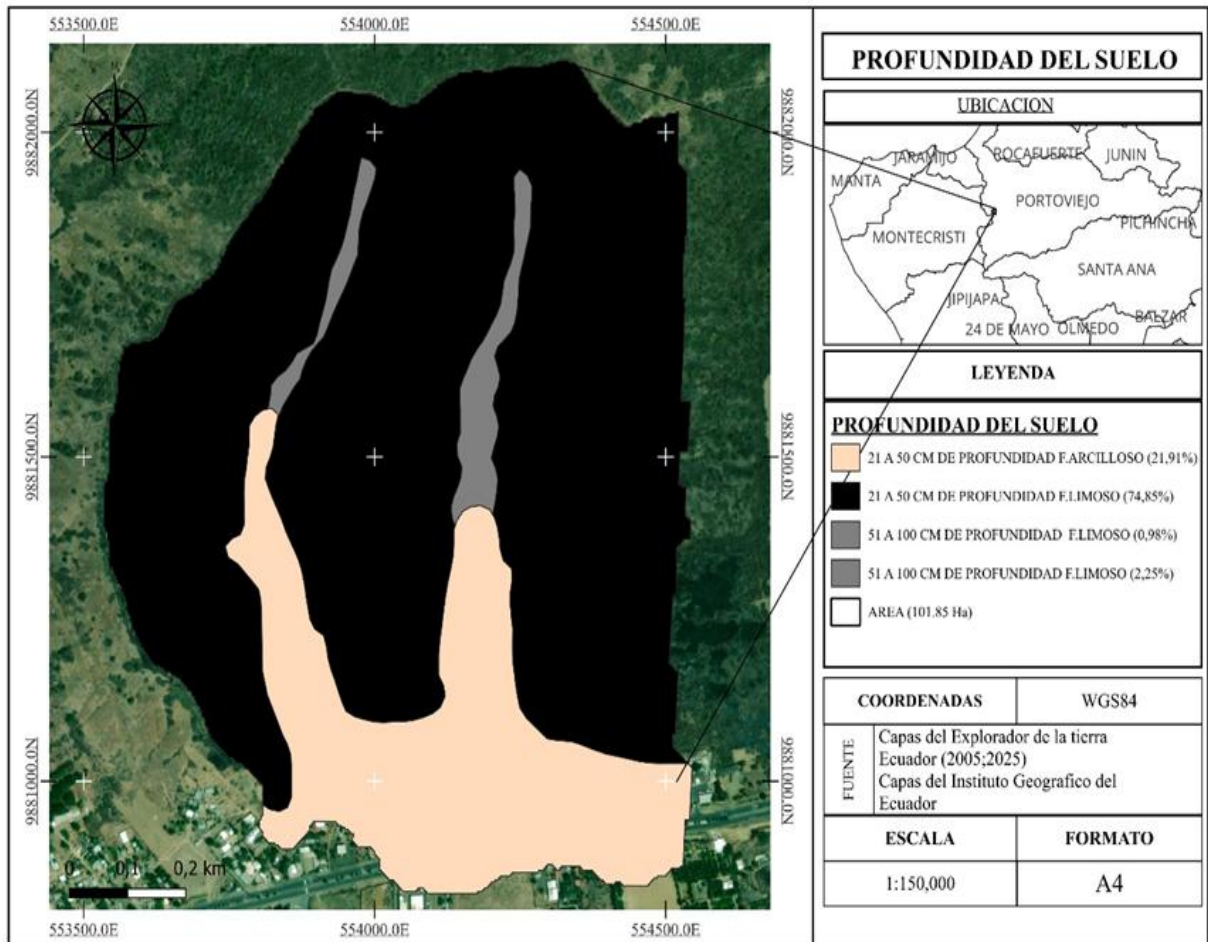


Figura 21 Mapa de Profundidad del Suelo

Elaborado por: Autores

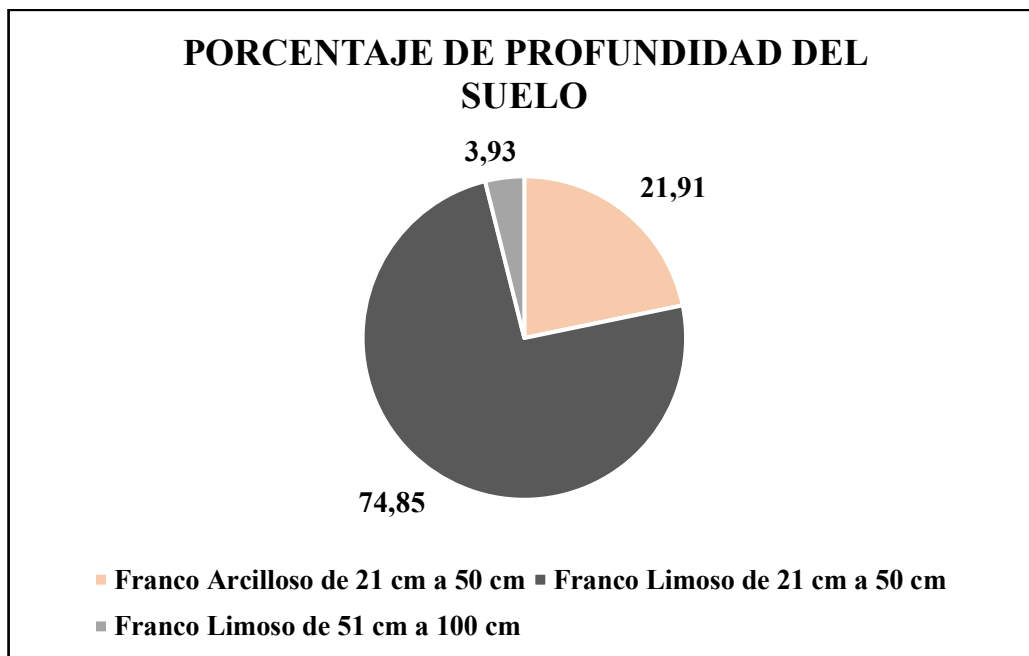


Figura 22 Porcentajes de Profundidad del Suelo

Elaborado por: Autores

5.4.6. Análisis del Mapa de Lluvias de 2005 y 2025

Este análisis se realizó con la toma de datos del año 2005 del mes de febrero de la Estación: M005 de Portoviejo, en donde se tomó la información de datos de la precipitación del anuario hidrológico, donde este proceso se realiza para poder desarrollar el mapa de lluvias del año 2005 en donde se ingresa los datos de mayor precipitación que son de 28,4 mm. Por otra parte para el año 2025 se recopiló una precipitación la cual será 239 mm en donde con esto notando que tuvo una mayor precipitación para el año 2025.

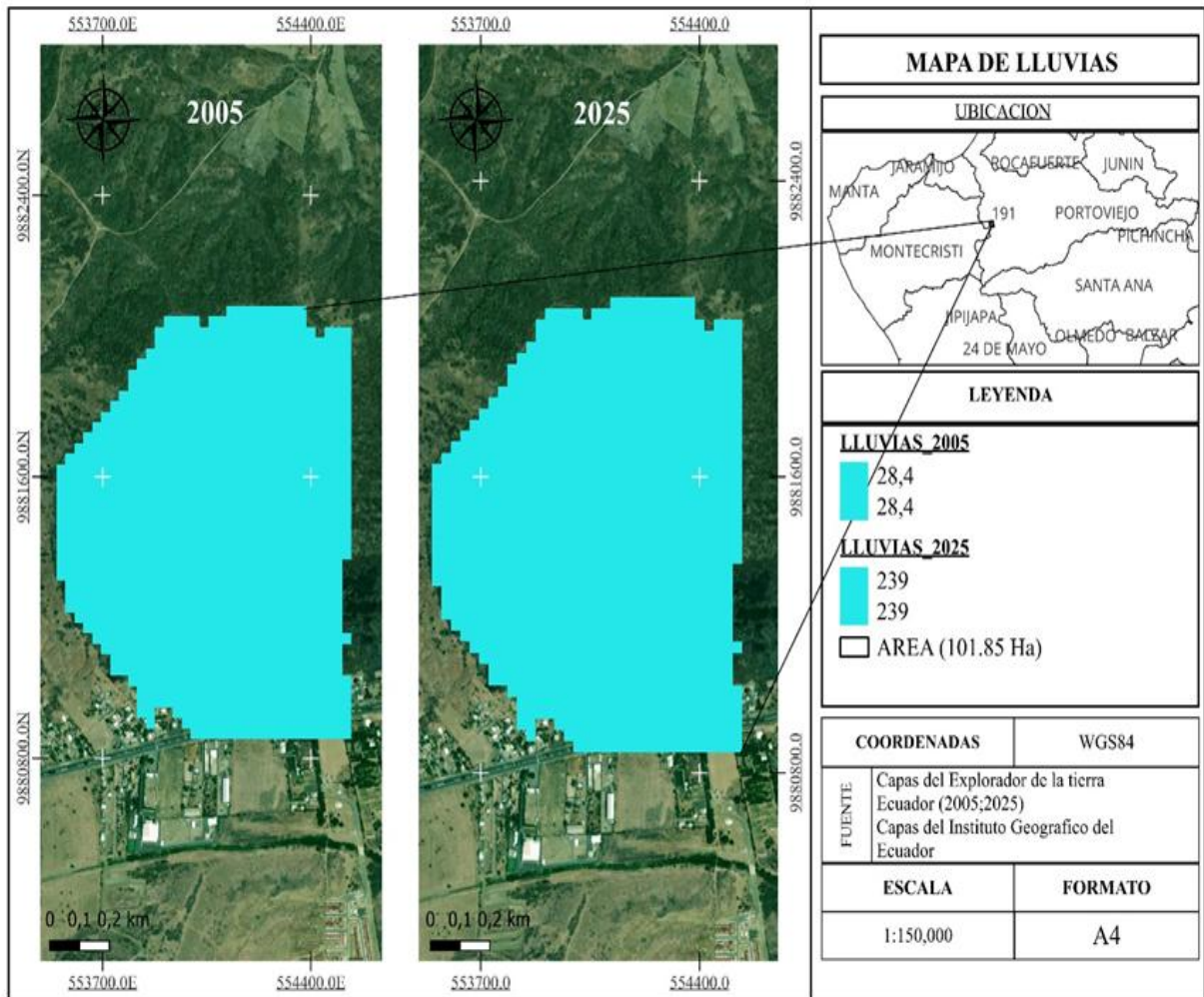


Figura 23 Mapa de Lluvias del 2005 y 2025

Elaborado por: Autores

5.5. Análisis de Mapa de Multicriterio

Este análisis de multicriteo se realizó con información obtenida y su fórmula nos dice que, Índice Ponderado = Pendiente * LULC * Textura del Suelo * Lluvia * Profundidad

En donde estos pesos designados para cada uno de ellos son: para la Pendiente es de (0.2), para LULC será de (0.2), para Textura del Suelo será (0.2), para Lluvia será de (0.3) y para Profundidad será (0.1) en el cual sumado los pesos de todo esto nos debe dar 100 o en este caso 1 sumado todos los valores que están en decimales. Con esto nosotros identificar las zonas de derrumbes en las cuales tenemos para el año 2005 en donde tendremos la zona baja con un color verde para la zona media va a ser de color naranja y una zona alta con un color rojo y para el año 2025 en donde tendremos una zona baja con color verde con un menor porcentaje, para la zona media tendremos un incremento con el color naranja y por último la zona alta que tendrá un aumento significativo en los años estudiados.

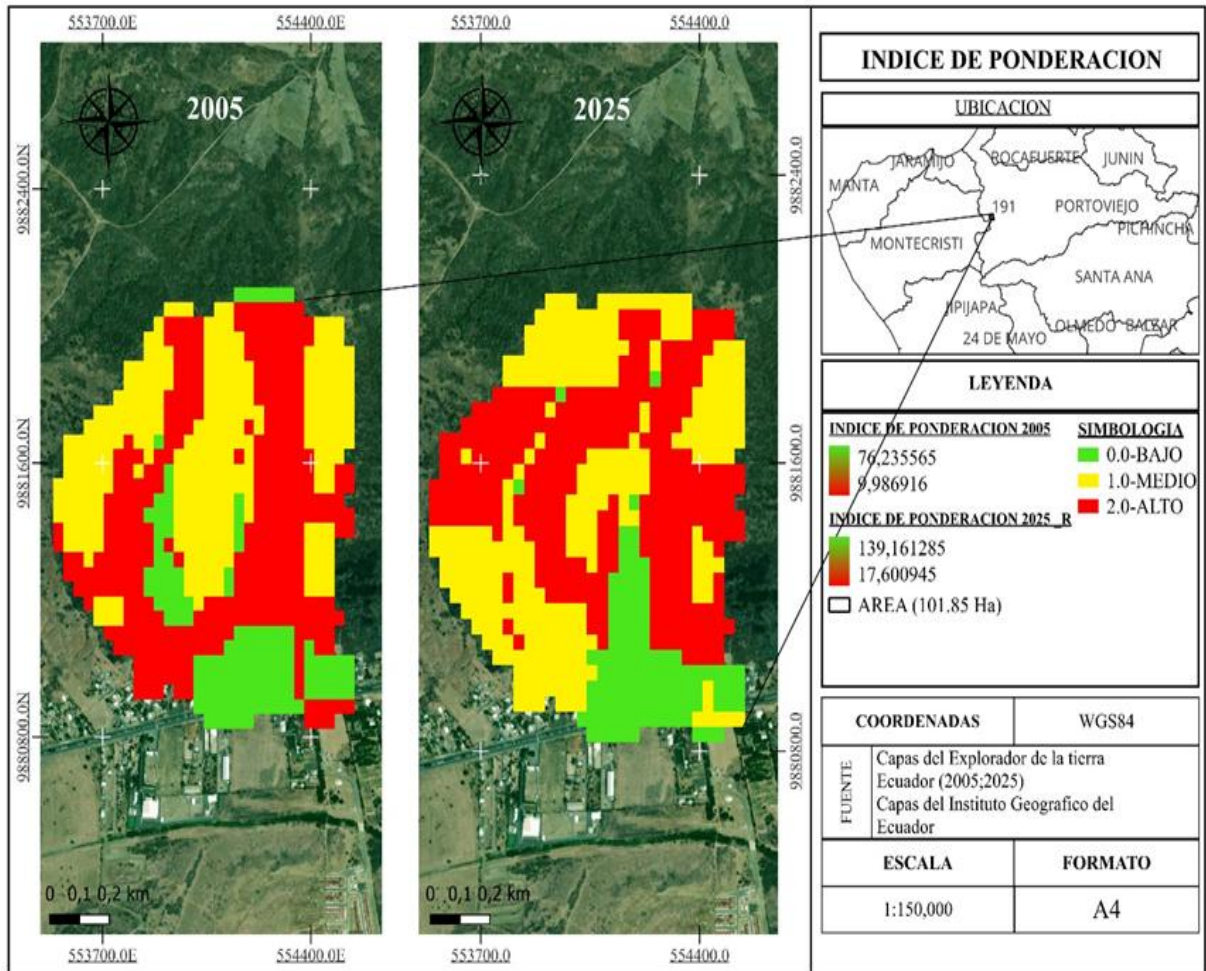


Figura 24 Mapa de Multicriterio

Elaborado por: Autores

5.6. Discusión

El estudio pone en evidencia que la integración de sensores con diferentes resoluciones y frecuencias de captura, como MODIS y Landsat, resulta esencial para superar las limitaciones individuales de cada fuente en contextos de alta nubosidad. MODIS aportó mayor disponibilidad temporal, facilitando un monitoreo continuo, mientras que Landsat, con su mayor resolución espacial, permitió un análisis más preciso de coberturas y cuerpos de agua. Sin embargo, la nubosidad afectó la disponibilidad de imágenes Landsat, y la resolución de MODIS impidió una adecuada detección de elementos pequeños. El uso de metodologías que se podrían integrar para ambas fuentes, junto con la aplicación de algoritmos avanzados de machine learning y técnicas de enmascaramiento de nubes, para mejorar la calidad de las clasificaciones, con la confiabilidad de los resultados obtenidos[44].

En el caso de las quebradas “Loma de los Vientos” y “Valle Alto”, la identificación de amenazas hidrometeorológicas, en particular deslizamientos y flujos de lodo, parte de patrones similares a los del litoral ecuatoriano, donde lluvias intensas y procesamiento topográfico generan eventos frecuentes. La base de datos muestra que los deslizamientos constituyen alrededor del 60% de los eventos HM en zonas urbanas ecuatorianas. La vulnerabilidad del territorio, incluyendo asentamientos informales en laderas y baja infraestructura de drenaje, agrava el riesgo. En Portoviejo se ha documentado una baja cobertura de servicios como drenaje y alcantarillado, lo que aumenta la exposición social. El riesgo como producto de la interacción amenaza, vulnerabilidad y capacidad es elevado. Según COOPI/Oxfam, dicho enfoque tripartito es crucial para estimar correctamente el riesgo en Ecuador, reforzando que sin un análisis integrado no se evalúa todo el espectro de vulnerabilidad[57].

En Nuevo Alausí, la tragedia ocurrida en marzo de 2023 se produjo en un sector previamente declarado en alerta amarilla desde el 19 de febrero, donde se había identificado una zona de alta susceptibilidad de aproximadamente 247 ha a movimientos en masa. La inestabilidad del terreno estuvo asociada a la presencia de fisuras de gran tamaño, la saturación por agua y el deterioro de la infraestructura de drenaje, sin que se implementaran acciones preventivas efectivas. De manera similar, en las quebradas “Loma de los Vientos” y “Valle Alto” en Portoviejo, la amenaza hidrometeorológica está fuertemente influenciada por lluvias intensas, suelos saturados, pendientes pronunciadas y alteraciones antrópicas de la cobertura del suelo, lo que incrementa la susceptibilidad a derrumbes. En este contexto, el uso de análisis multicriterio resulta fundamental para identificar zonas vulnerables y orientar la gestión del riesgo, evitando que se repitan escenarios como el ocurrido en Alausí[58].

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Se evaluó los cambios en el uso y cobertura de la tierra (LULC) en las quebradas “Loma de los Vientos” y “Valle Alto” evidenciando transformaciones en el período de 2005 al 2025, con una disminución del 17,71 % en la cubierta arbórea y en la tierra de cultivo con un 0,88%, a su vez el incremento del 16,28% en el área urbana y en la tierra vacía con un 2,09. Estas variaciones reflejan el avance de expansión de la zona urbana y el cambio en las dinámicas productivas locales, lo que ha modificado de manera significativa la estructura del paisaje.
- Se realizó el mapeo de variables que influyen en la amenaza de derrumbes los cuales constituyen una herramienta fundamental para comprender la dinámica del territorio y priorizar áreas de intervención. La integración de variables como: pendiente, uso y cobertura del suelo, textura, profundidad del suelo y precipitaciones, permitieron identificar zonas con mayor susceptibilidad a deslizamientos, como es un 30,68% para bajo, un 48,51% para medio y un 20,81% para alto, facilitando la toma de decisiones en materia de gestión del riesgo y planificación territorial.
- Se vinculó los cambios en el uso y cobertura del suelo con relación a la amenaza hidrometeorológica, evidenciando como influye directamente en la zona de estudio los diferentes tipos de rangos los cuales son: zona baja, zona media y zona alta. A su vez factores como: disminución de áreas de cultivo y el incremento de zonas urbanizadas modifican las condiciones de infiltración y retención hídrica, aumentando la susceptibilidad a deslizamientos en eventos de lluvias intensas.

6.2.Recomendaciones

- Se recomienda implementar estrategias de ordenamiento territorial y gestión del riesgo que consideren los procesos de urbanización y el cambio en el uso del suelo observados en las quebradas “Loma de los Vientos” y “Valle Alto”. Es fundamental regular el crecimiento urbano, promoviendo un desarrollo planificado que incluya la conservación de zonas de cobertura arbórea y la implementación de infraestructuras verdes que mejoren la infiltración y reduzcan la escorrentía.
- Se sugiere fortalecer los programas de reforestación y prácticas agrícolas sostenibles, para mitigar los efectos del cambio en las dinámicas productivas y disminuir la

susceptibilidad a fenómenos como los deslizamientos asociados a eventos hidrometeorológicos extremos.

- Es necesario fortalecer el ordenamiento territorial, incorporando dentro de sus líneas estratégicas los resultados del mapeo de variables como insumo para el diseño de planes de prevención y mitigación, medidas como la restricción de construcciones en áreas de alto riesgo priorizando las zonas con mayor susceptibilidad a deslizamientos.
- Implementación por parte de los organismos locales que mantienen la competencia en los sitios de intervención a fin de cuenten con los laboratorios para que se realicen los análisis de manera continua, que permiten mantener alertas tempranas en las zonas de amenaza hidrometeorológicas que se identifican en los mapas del presente estudio.

7. REFERENCIAS

- [1] Silvana N. Moragues, “Estimación y evaluación de los procesos de inestabilidad de laderas mediante el uso de técnicas en sensoramiento remoto en el Brazo Norte del lago Argentino (Patagonia Austral, Argentina),” *Universidad Nacional Río Negro*, pp. 1–230, 2020.
- [2] D. M. Cruden and D. Varnes, “Chapter 3 LANDSLIDE TYPES AND PROCESSES IN THE UNITED STATES,” 2005.
- [3] World Health Organization, “Deslizamientos de tierra.” Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.who.int/health-topics/landslides>
- [4] CDC, “Deslizamientos de tierra y aludes de barro|CDC,” Blog de Deslizamientos. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/es/disasters/landslides.html>
- [5] Science For a Changing World, “What are landslides & how can they affect me? | U.S. Geological Survey.” Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/programs/landslide-hazards/what-are-landslides-how-can-they-affect-me>
- [6] María del Pilar Cornejo de Grunauer, “ECUADOR: REFERENCIAS BÁSICAS PARA LA GESTIÓN DE RIESGOS 2013-2014 Ayuda Humanitaria y Protección Civil,” 2014.
- [7] Darío Macas Salvatierra, “PLAN DE DESARROLLO PARA EL NUEVO ECUADOR,” *Eje de Gestión de Riesgos*, pp. 1–53, 2024.
- [8] A. Herrera, M. Verónica, C. Moncayo, and M. Ángel, “SUSCEPTIBILIDAD AL DESLIZAMIENTO DE LOS SUELOS Y ROCAS, PROVINCIA DE MANABÍ, ECUADOR Ingeniero Civil 2005 2,” 2005.
- [9] C. A. Masés-García, B. Herrera-Fernández, and M. Briones-Salas, “Trends in collapse risk assessments of terrestrial and wetland ecosystems,” *Madera y Bosques*, vol. 27, no. 3, Sep. 2021, doi: 10.21829/myb.2021.2732133.
- [10] MARITZA ADRIANA RIVAS ZAMBRANO, “RIESGO POR DESLIZAMIENTOS EN LA CIUDADELA CEVALLOS DE LA PARROQUIA FRANCISCO PACHECO,

CIUDAD DE PORTOVIEJO,” *PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR*, pp. 1–55, 2021.

- [11] H. A. Pacheco, W. Méndez, and A. Moro, “Soil erosion risk zoning in the ecuadorian coastal region using geo-technological tools,” *Earth Sciences Research Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 293–302, 2019, doi: 10.15446/esrj.v23n4.71706.
- [12] K. L. Moreira Carreño and M. J. Mera Párraga, “La apicultura, estrategia sostenible para la reducción de riesgo de deslizamientos en el sector Briones de la parroquia San Pablo de la ciudad de Portoviejo.,” *Reincisol.*, vol. 3, no. 6, pp. 6392–6408, Dec. 2024, doi: 10.59282/reincisol.v3(6)6392-6408.
- [13] J. Á. García Mera and M. B. Vera Mendoza, “Análisis de la vulnerabilidad de la zona alta del sector LEA, de la parroquia Andrés de Vera, del cantón Portoviejo,” *Reincisol.*, vol. 3, no. 6, pp. 3943–3971, Oct. 2024, doi: 10.59282/reincisol.v3(6)3943-3971.
- [14] A. F. Chun Delgado, E. M. Pólit Cedeño, D. Pichucho Morales, and A. Reyna García, “Incidencia del cambio de Uso de Suelo en el Paisaje Urbano fluvial de Portoviejo.,” *REVISTARQUIS*, vol. 12, no. 1, pp. 45–75, Dec. 2022, doi: 10.15517/ra.v12i1.51707.
- [15] M. González-Rojas, R. Murillo-Cruz, and C. Ávila Arias, “El ciclo hidro-social de los ríos urbanos: Transformaciones al paisaje hídrico en San Luis Potosí, México,” *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 53, no. 1, p. 129, Dec. 2018, doi: 10.15359/rca.53-1.3.
- [16] Instituto de Geografía, “Instituto de Geografía | Instituto de Geografía de la USFQ,” Universidad San Francisco de Quito. Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.institutodegeografia.org/uso-y-cobertura-del-suelo/>
- [17] EPA, “Uso del suelo | EPA de EE. UU.,” Revista de uso de la tierra. Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/report-environment/land-use>
- [18] “Cobertura vegetal del suelo | Agricultura de conservación | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.” Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.fao.org/conservation-agriculture/in-practice/soil-organic-cover/es/>
- [19] Dirección General de Estadística, “Semarnat - Cambios en el uso del suelo,” Semarnat. Accessed: Jul. 16, 2025. [Online]. Available: <https://paot.org.mx/centro/ine->

semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/02_Vegetacion/2.2_Cambios/index.htm

- [20] F. C. Nunes, L. de Jesus Alves, C. C. N. de Carvalho, E. Gross, T. de Marchi Soares, and M. N. V. Prasad, "Soil as a complex ecological system for meeting food and nutritional security," *Climate Change and Soil Interactions*, pp. 229–269, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-818032-7.00009-6.
- [21] I. R. Delgado, H. Israel, P. Iglesias, R. Miguel, and G. Batista, "DEGRADACIÓN DEL SUELO," 2021. [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0003-2403-0135>
- [22] Marcela PISCITELLI, "Degradación de suelos | UNICEN," Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Accessed: Jul. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.unicen.edu.ar/content/degradaci%C3%B3n-de-suelos>
- [23] J. E. Gilley, "Erosion - Water-Induced," *Encyclopedia of Soils in the Environment*, vol. 4, pp. 463–469, Jan. 2004, doi: 10.1016/B0-12-348530-4/00262-9.
- [24] M. E. Andia Mirano, "Condiciones morfológicas de las quebradas para el potencial diseño de espacios públicos de integración urbana con servicios ecosistémicos. Quebrada Santa Lucía en Chachapoyas.," Jan. 09, 2023, *Pontificia Universidad Católica del Perú*. Accessed: Jul. 17, 2025. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/23937>
- [25] D. G. A. Vélez, D. G. A. Vélez, C. C. Mero, and C. P. Quiroz, "La percepción social del riesgo por deslizamiento en el Cantón Portoviejo del Ecuador," *Polo del Conocimiento*, vol. 7, no. 8, pp. 794–807, Aug. 2022, doi: 10.23857/pc.v7i8.4425.
- [26] "La percepción social del riesgo por deslizamiento en el Cantón Portoviejo del Ecuador | Alvia Vélez | Polo del Conocimiento." Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/4425/html>
- [27] Agustín García, "'Entre 200 y 300 hectáreas de Portoviejo han registrado incidencias de deslizamientos' - El Diario," *Diario de deslizamientos*. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.eldiario.ec/entre-200-y-300-hectareas-de-portoviejo-han-registrado-incidencias-de-deslizamientos-20250428>
- [28] Diego Villamar+in, "Caracterización de los movimientos - TALUDES," *Blog de movimientos de taludes*. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available:

https://www.academia.edu/5048061/1_Caracterizacion_de_los_movimientos_TALUDES

- [29] B. Polo-González and J. L. Cuevas-Ojeda, “Peligbas: Sistema de Base de Datos de Peligros, Vulnerabilidad a Riesgos Geológicos y Tecnológicos inducidos. Herramienta para la gestión y el manejo de los peligros geológicos en el macizo montañoso de Guamuhaya,” *I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra – I Simposio de Sismicidad y Riesgos Geológicos*, pp. GEO2-P16: 10 pp., Apr. 2005.
- [30] Anónimo, “Concepto de quebrada - Definición en DeConceptos.com,” Blog de concepto de Quebada. Accessed: Jul. 17, 2025. [Online]. Available: <https://deconceptos.com/ciencias-naturales/quebrada>
- [31] UNDRR, “Gestión del riesgo de desastres | UNDRR,” Gestión de Riesgos. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk-management>
- [32] A. C. Florez García and J. N. Pérez Castillo, “Técnicas para la predicción espacial de zonas susceptibles a deslizamientos,” *Avances Investigación en Ingeniería*, vol. 16, no. 1 (Enero-Junio), pp. 20–48, Aug. 2019, doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.5188.
- [33] Prefectura de Manabí, “PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL,” *Desarrollo y Equidad*, pp. 1–847, 2023.
- [34] M. Hardie and R. Doyle, “Measuring soil salinity,” *Methods in Molecular Biology*, vol. 913, pp. 415–425, 2012, doi: 10.1007/978-1-61779-986-0_28.
- [35] Eugenia, “INNOVACIÓN MUESTREO DE SUELO,” Blog de Muestreo. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://tornomar.com/>
- [36] Missouri, “Análisis de suelos | Extensión MU,” Universidad de Missouri. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://extension.missouri.edu/programs/soil-and-plant-testing-laboratory/spl-soil-analysis>
- [37] Forge Technology, “Drones for GIS Mapping: Accurate Aerial Surveying,” Blog de Drones. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://ideaforgetech.com/blogs/drones-for-gis-mapping>

- [38] Drone U, “Guía de mapeo con drones: ¿Cómo funciona? - Drone U,” DRONE U. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.thedroneu.com/blog/drone-mapping-guide/>
- [39] “¿Qué es un SIG, GIS o Sistema de Información Geográfica?” Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-un-sig-gis-o-sistema-de-informacion-geografica/>
- [40] National Aeronautics and Space Administration, “Fundamentos de la Teledetección (Percepción Remota) NASA ARSET,” 2010.
- [41] Merginmpas, “Mergin Maps en directo,” merginmaps. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://es.merginmaps.com/glossary/qgis>
- [42] CEUPE, “QGIS: ¿Qué es y qué ventajas ofrece?,” European Business School. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.ceupe.com/blog/qgis.html>
- [43] GIS México, “QGIS — Sistema de Información Geográfica,” Spatial Without Compromise. Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://gismexico.com/qgis.html>
- [44] RUDYS RAFAEL CUSME INTRIAGO, “CLASIFICACIÓN DE USOS DE LA TIERRA EN LA CUENCA DEL RÍO QUEVEDO,” Jul. 2022.
- [45] H. Adhikari, J. Heiskanen, E. E. Maeda, and P. K. E. Pellikka, “Does topographic normalization of landsat images improve fractional tree cover mapping in tropical mountains?,” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Apr. 2015, pp. 261–267. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-261-2015.
- [46] J. A. Prieto-Amparan, F. Villarreal-Guerrero, M. Martinez-Salvador, C. Manjarrez-Domínguez, E. Santellano-Estrada, and A. Pinedo-Alvarez, “Atmospheric and radiometric correction algorithms for the multitemporal assessment of grasslands productivity,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 10, no. 2, Feb. 2018, doi: 10.3390/rs10020219.
- [47] J. D. Colby and P. L. Keating, “Land cover classification using Landsat TM imagery in the tropical highlands: The influence of anisotropic reflectance,” *Int J Remote Sens*,

- vol. 19, no. 8, pp. 1479–1500, Jan. 1998, doi:
10.1080/014311698215306;JOURNAL:JOURNAL:TRES20.
- [48] E. A. Alshari and B. W. Gawali, “Development of classification system for LULC using remote sensing and GIS,” *Global Transitions Proceedings*, vol. 2, no. 1, pp. 8–17, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.GLTP.2021.01.002.
- [49] B. L. G. P. , J. E. M. M. , A. L. Paul Sebastián Amaya Márquez, “Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo en la cuenca del río Zarumilla: Proyecciones al 2040,” *NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA*, vol. 7, no. 2, pp. 73–86, Jul. 2024, doi: 10.37135/ns.01.14.05.
- [50] D. C. de O. Duarte, J. Zanetti, J. Gripp Junior, and N. das G. Medeiros, “Comparison of supervised classification methods of Maximum Likelihood, Minimum Distance, Parallelepiped and Neural Network in images of Unmanned Air Vehicle (UAV) in Viçosa - MG,” *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 70, no. 2, pp. 437–452, Jun. 2018, doi: 10.14393/rbcv70n2-45377.
- [51] N. Yolanda and H. Dután, “FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESCUELA DE INGENIERÍA EN ALIMENTOS,” 2016.
- [52] Fernanda Ochoa, “¿Qué es un análisis multitemporal? | El blog de franz.” Accessed: Jul. 20, 2025. [Online]. Available: <https://acolita.com/que-es-un-analisis-multitemporal/>
- [53] Y. W. Rabby, Y. Li, J. Abedin, and S. Sabrina, “Impact of Land Use/Land Cover Change on Landslide Susceptibility in Rangamati Municipality of Rangamati District, Bangladesh,” *ISPRS Int J Geoinf*, vol. 11, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.3390/ijgi11020089.
- [54] Jeanett Valladares, “Métodos para realizar un Análisis Multicriterio en un SIG | Mastergis,” Mastergis. Accessed: Jul. 23, 2025. [Online]. Available: <https://mastergis.com/blog/metodos-analisis-multicriterio-sig>
- [55] T. López-Marrero, A. González-Toro, T. Heartsill-Scalley, L. Annie Hermansen-Báez, and E. L. Yunque, “Evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica para la planificación y la toma de decisiones acerca del uso de terrenos,” 2016.
- [56] R. Dong, J. Dong, G. Wu, and H. Deng, “Optimization of post-classification processing of high-resolution satellite image: A case study,” *Science in China, Series E*:

Technological Sciences, vol. 49, no. SUPPL. 1, pp. 98–107, Jun. 2006, doi:
10.1007/S11431-006-8111-3/METRICS.

- [57] H. I. Emilio Espinoza-Menéndez and L. I. González-González, “Análisis de riesgo por inundación del sector Naranjal de la parroquia Abdón Calderón de Portoviejo,” vol. 85, no. 9, pp. 195–217, 2023, doi: 10.23857/pc.v8i9.6009.
- [58] L. Pilatasig *et al.*, “Casual-Nuevo Alausí Landslide (Ecuador, March 2023): A Case Study on the Influence of the Anthropogenic Factors,” *GeoHazards 2025, Vol. 6, Page 28*, vol. 6, no. 2, p. 28, Jun. 2025, doi: 10.3390/GEOHAZARDS6020028.