



# **UNIVERSIDAD ESTATAL DE BOLÍVAR**

## **DIRECCIÓN DE POSGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA**

### **MAESTRÍA EN PREVENCIÓN Y GESTIÓN DE RIESGOS**

### **TRABAJO DE TITULACIÓN**

MODALIDAD: PROYECTO DE TITULACIÓN CON COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN APLICADA Y/O DE DESARROLLO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN PREVENCIÓN Y GESTIÓN DE RIESGOS

#### **TEMA:**

DETERMINACIÓN DE ZONAS INESTABLES EN EL TRAMO DE LA VÍA ALOAG – SANTO DOMINGO KM 43 AL 56.

#### **AUTOR:**

ING. JORGE ORLANDO CAMACHO RODAS

#### **TUTOR:**

DR. MARCELO CANDO JÁCOME

**GUARANDA**

**2022**

## CERTIFICACIÓN DE TUTOR

EL DOCTOR MARCELO CANDO, EN CALIDAD DE TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN DE LA MAESTRÍA EN PREVENCIÓN Y GESTIÓN DE RIESGOS, UNIVERSIDAD ESTATAL DE BOLÍVAR.

### CERTIFICA

El trabajo de titulación denominado **“Determinación de zonas inestables en el tramo de la vía Aloag – Santo Domingo desde el km 43 al 56”**, con la modalidad de proyecto de titulación de investigación aplicada y/o desarrollo, elaborado por la Ing. Jorge Orlando Camacho Rodas, previo a la obtención del título de Magister en Prevención y Gestión de Riesgos, considero que dicho informe cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación en las instancias respectivas de la Universidad Estatal de Bolívar.

Es todo cuanto puedo certificar.

Guaranda, 11 de enero de 2023

Atentamente,



**Dr. Marcelo Cando**  
**Tutor Trabajo de Titulación**  
**Maestría en Prevención y Gestión de Riesgos - UEB**

## DECLARACIÓN JURAMENTADA DE AUTENTICIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Jorge Orlando Camacho Rodas** con cedula de ciudadanía N° 1720329638, declaro que el trabajo de investigación denominado **“DETERMINACIÓN DE ZONAS INESTABLES EN EL TRAMO DE LA VÍA ALOAG – SANTO DOMINGO KM 43 AL 56”**, es de mi autoría, que no ha sido presentada previamente para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Por lo tanto, la Universidad Estatal de Bolívar, puede hacer uso de los derechos de publicación correspondiente a este trabajo según lo establecido en la **LEY DE PROPIEDAD INTELECTUAL**, por su **REGLAMENTO** y por la **NORMATIVA INSTITUCIONAL VIGENTE**.

Atentamente;



Jorge Orlando Camacho Rodas

C.I. 1720329638

Se otorgó ante mi y en fe de ello  
confiero ésta **SEGUNDA**.... copia  
certificada, firmada y sellada en 2 Fcos.  
Guaranda, 12 de Enero del 2023



  
Dr. Hernán Criollo Arcos  
NOTARIO SEGUNDO DEL CANTÓN GUARANDA



20230201002P00046

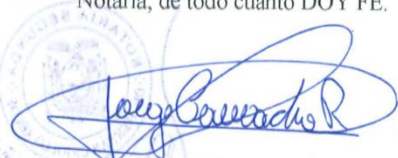
DECLARACION JURAMENTADA

OTORGA: JORGE ORLANDO CAMACHO RODAS

CUANTIA: INDETERMINADA

DI 2 COPIAS

En la ciudad de Guaranda, provincia Bolívar, República del Ecuador, hoy día jueves doce de enero de dos mil veintitrés, ante mí DOCTOR HERNÁN RAMIRO CRIOLLO ARCOS, NOTARIO SEGUNDO DE ESTE CANTÓN, comparece el Ingeniero Jorge Orlando Camacho Rodas, por sus propios derechos. El compareciente es de nacionalidad ecuatoriano, mayor de edad, de estado civil divorciado, domiciliado en la Urbanización Tierra Amiga, parroquia Bomboli, cantón Santo Domingo, provincia Santo Domingo de los Tsachilas, y de tránsito por este lugar, con celular número: cero nueve ocho ocho cero uno ocho uno ocho, correo electrónico: jorland\_cr85@hotmail.com; a quien de conocerlo doy fe en virtud de haberme exhibido su cédula de ciudadanía en base a la que procedo a obtener su certificado electrónicos de datos de identidad ciudadana, del Registro Civil, mismos que agregó a esta escritura como documento habilitante; bien instruido por mí el Notario en el objeto y resultados de esta escritura de Declaración Juramentada que a celebrarla procede, libre y voluntariamente.- En efecto juramentado que fue en legal forma previa las advertencias de la gravedad del juramento, de las penas de perjurio y de la obligación que tiene de decir la verdad con claridad y exactitud, declara lo siguiente: "Que previo a la obtención del Título de Magister en Prevención y Gestión de Riesgos, otorgado por la Universidad Estatal de Bolívar, manifiesto que los criterios e ideas emitidas en el presente Proyecto de Investigación, con el tema: **"DETERMINACIÓN DE ZONAS INESTABLES EN EL TRAMO DE LA VÍA ALOAG - SANTO DOMINGO KM 43 AL 56"**, es de mi exclusiva responsabilidad en calidad de autor, además autorizo a la Universidad Estatal de Bolívar hacer uso de todos los contenidos que me pertenece o parte de los que contiene esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación. Es todo cuanto tengo que decir en honor a la verdad". Hasta aquí la declaración juramentada que junto con los documentos anexos y habilitantes que se incorpora queda elevada a escritura pública con todo el valor legal, y que el compareciente acepta en todas y cada una de sus partes, para la celebración de la presente escritura se observaron los preceptos y requisitos previstos en la Ley Notarial; y, leída que le fue al compareciente por mí el Notario, se ratifica y firma conmigo en unidad de acto quedando incorporada en el Protocolo de esta Notaría, de todo cuanto DOY FE.



Jorge Orlando Camacho Rodas  
C.C. 1720329638



DR. HERNÁN RAMIRO CRIOLLO ARCOS  
NOTARIO SEGUNDO DE CANTÓN GUARANDA





## CERTIFICADO DIGITAL DE DATOS DE IDENTIDAD

Número único de identificación: 1720329638

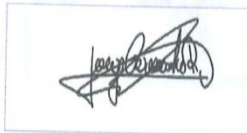
Nombres del ciudadano: CAMACHO RODAS JORGE ORLANDO



Condición del cedulado: CIUDADANO

Lugar de nacimiento: ECUADOR/AZUAY/CAMILO PONCE  
ENRIQUEZ/CAMILO PONCE ENRIQUEZ

Fecha de nacimiento: 23 DE JULIO DE 1985



Nacionalidad: ECUATORIANA

Sexo: HOMBRE

Instrucción: SUPERIOR

Profesión: INGENIERO

Estado Civil: DIVORCIADO

Cónyuge: No Registra

Datos del Padre: CAMACHO VARGAS LEONEL EDISON

Nacionalidad: ECUATORIANA

Datos de la Madre: RODAS VERA NANCI MARGARITA

Nacionalidad: ECUATORIANA

Fecha de expedición: 13 DE MARZO DE 2017

Condición de donante: NO DONANTE

Información certificada a la fecha: 12 DE ENERO DE 2023

Emisor: HERNAN RAMIRO CRIOLLO ARCOS - BOLIVAR-GUARANDA-NT 2 - BOLIVAR - GUARANDA



N° de certificado: 234-815-67821



234-815-67821

Ing. Fernando Alvear C.

Director General del Registro Civil, Identificación y Cedulación  
Documento firmado electrónicamente



REPÚBLICA DEL ECUADOR  
DIRECCIÓN GENERAL DE REGISTRO CIVIL  
IDENTIFICACIÓN Y CENSALIZACIÓN

CÉDULA DE CIUDADANÍA  
N.º 172032963-8

APellidos y Nombres: CAMACHO RODAS JORGE ORLANDO  
Lugar de nacimiento: AZUAY  
Camilo Ponce Enrique  
Fecha de nacimiento: 1985-07-23  
Nacionalidad: ECUATORIANA  
Sexo: HOMBRE  
Estado Civil: DIVORCIADO





INSTRUCCIÓN SUPERIOR  
PROFESIÓN / OCUPACIÓN: INGENIERO  
E333313222

APellidos y Nombres del Padre: CAMACHO VARGAS LEONEL EDISON  
APellidos y Nombres de la Madre: RODAS VERA Nanci Margarita  
Lugar y Fecha de Expedición: SANTO DOMINGO 2017-03-13  
Fecha de Expiración: 2027-03-13

009812728






CERTIFICADO DE VOTACIÓN 11 ABRIL 2021

PROVINCIA: STO DGO TSACHILAS  
CIRCUNSCRIPCIÓN: N.º 11978598  
CANTÓN: SANTO DOMINGO  
PARROQUIA: SANTO DOMINGO  
ZONA: 1  
JUNTA N.º: 0026 MASCULINO  
CC N.º: 1720329638  
CAMACHO RODAS JORGE ORLANDO





Condición de Ciudadano

CIUDADANAJÓ:

ESTE DOCUMENTO ACREDITA QUE USTED SUPRAGÓ EN LAS ELECCIONES GENERALES 2021

F. PRESIDENTE DE LA JRV







*[Handwritten signature]*





Factura: 001-002-000034540



20230201002P00046

NOTARIO(A) HERNAN RAMIRO CRIOLLO ARCOS

NOTARÍA SEGUNDA DEL CANTON GUARANDA

EXTRACTO

Escritura N°:	20230201002P00046						
<b>ACTO O CONTRATO:</b>							
DECLARACIÓN JURAMENTADA PERSONA NATURAL							
FECHA DE OTORGAMIENTO:	12 DE ENERO DEL 2023, (9:52)						
<b>OTORGANTES</b>							
<b>OTORGADO POR</b>							
Persona	Nombres/Razón social	Tipo interviniente	Documento de identidad	No. Identificación	Nacionalidad	Calidad	Persona que le representa
Natural	CAMACHO RODAS JORGE ORLANDO	POR SUS PROPIOS DERECHOS	CÉDULA	1720329638	ECUATORIANA	COMPARECIENTE	
<b>A FAVOR DE</b>							
Persona	Nombres/Razón social	Tipo interviniente	Documento de identidad	No. Identificación	Nacionalidad	Calidad	Persona que representa
<b>UBICACIÓN</b>							
Provincia		Cantón		Parroquia			
BOLÍVAR		GUARANDA		ANGEL POLIVIO CHAVEZ			
DESCRIPCIÓN DOCUMENTO:							
OBJETO/OBSERVACIONES:							
CUANTÍA DEL ACTO O CONTRATO:	INDETERMINADA						

  
 NOTARIO(A) HERNAN RAMIRO CRIOLLO ARCOS  
 NOTARÍA SEGUNDA DEL CANTÓN GUARANDA



## **DEDICATORIA**

No tendré vida suficiente para agradecerte todo lo que has hecho por mí, por mis hermanos, pero te prometo que nunca dejaré de pensarte de tenerte siempre presente, nunca te olvidaré papá. Gracias papá por darme el mejor regalo que se puede dar a una persona, creer en mí y hoy este logro te lo dedico, porque tú me enseñaste a vivir y disfrutar la vida como si cada día fuese el último.

La realización de esta tesis la puedo catalogar con toda seguridad, que fue una de las mejores etapas de mi vida, aunque en muchos momentos se presentaron diversidades de complicaciones, el perderte para siempre, aunque sé que Dios te llamó a su lado, me queda la impotencia de no poder abrazarte, decirte que lo logré, decirte que tu sacrificio, tu esfuerzo por darme el estudio a mí y a mis hermanos hoy tiene los mejores resultados, gracias a Dios por poner en mi camino al mejor papá del mundo.

Gracias por estar desde arriba presente en todo el trayecto de mi Maestría, el agradecimiento a ti por nunca desampararme por siempre protegerme y cuidarme, decirte que no te extraño sería mentirme a mí mismo, por eso y por muchas cosas más este título, este logro te lo dedico a ti Leonel Camacho, mi poeta enamorado, mi eterno Leo Cam.



## **TÍTULO**

DETERMINACIÓN DE ZONAS INESTABLES EN EL TRAMO DE LA  
VÍA ALOAG – SANTO DOMINGO KM 43 AL 56.

## ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DE TUTOR.....	2
DECLARACIÓN JURAMENTADA DE AUTENTICIDAD DE AUTORÍA .....	3
DEDICATORIA .....	4
TÍTULO .....	5
ÍNDICE .....	11
ÍNDICE DE TABLAS. ....	13
ÍNDICE DE FIGURAS.....	14
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS .....	16
RESUMEN.....	17
ABSTRACT.....	19
INTRODUCCIÓN. ....	21
CAPÍTULO I.....	22
1. PROBLEMA.....	22
1.1.Planteamiento del problema.....	22
1.2.Formulación del problema .....	29
1.3.Justificación del problema.....	29
1.4.Objetivo.....	30
1.4.1.Objetivo general .....	30
1.4.2.Objetivos específicos .....	31
CAPÍTULO II .....	32
2. MARCO TEÓRICO.....	32
2.1. Antecedentes investigativos.....	32
2.2. Fundamentación Teórica.....	33
2.2.1. Geología-Geomorfología .....	33

2.2.2. Tectónica.....	35
2.3. Amenaza Sísmica.....	38
2.4. Hipótesis o ideas a defender.....	46
CAPÍTULO III.....	47
3. MARCO METODOLÓGICO.....	47
3.1. Tipo de investigación.....	47
3.2. Materiales y Métodos.....	47
3.3. Procedimiento 1.....	50
3.4. Procedimiento 2.....	65
3.5. Procedimiento 3.....	73
CAPÍTULO IV.....	79
4. ANÁLISIS E INTEPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	79
4.1. Análisis Perfiles.....	83
4.2. Análisis perfil topográfico ajustado a cada km de la zona de estudio.....	85
5. CONCLUSIONES.....	110
6. RECOMENDACIONES.....	111
BIBLIOGRAFÍA.....	112

## ÍNDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 1</b> <i>Registros de sismos.</i> .....	40
<b>Tabla 2</b> <i>Parámetros.</i> .....	44
<b>Tabla 3</b> <i>Especificaciones.</i> .....	54
<b>Tabla 4</b> <i>Resolución.</i> .....	57
<b>Tabla 5</b> <i>Estabilidad</i> .....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Mapa de localización del tramo km 43 al 56 vía Alóag-Santo Domingo.....	23
<b>Figura 2</b> Absisados de control.....	24
<b>Figura 3</b> Eliminación de cobertura vegetal.....	24
<b>Figura 4</b> Proceso de movimientos en masa tramo km 43 al 56.....	25
<b>Figura 5</b> Subsidiencias y levantamientos. ....	29
<b>Figura 6</b> Geología del área de estudio.....	34
<b>Figura 7</b> Registros de sismos.....	41
<b>Figura 8</b> Estimación. ....	45
<b>Figura 9</b> Procedimientos. ....	49
<b>Figura 10</b> Delimitación de la zona.....	53
<b>Figura 11</b> Diagrama de desplazamiento. ....	58
<b>Figura 12</b> Aplicación.....	60
<b>Figura 13</b> Plataforma de aplicación. ....	62
<b>Figura 14</b> Archivos de salida. ....	64
<b>Figura 15</b> Rangos topográficos. ....	65
<b>Figura 16</b> Modelo digital. ....	66
<b>Figura 17</b> Dirección y acumulación de flujo.....	68
<b>Figura 18</b> Bloque, diagrama de un modelo digital .....	69
<b>Figura 19</b> Índice de humedad.....	70
<b>Figura 20</b> Longitud y Magnitud de la Pendiente-LS.....	72
<b>Figura 21</b> Modelo Hidrológico .....	75
<b>Figura 22</b> Estabilidad.....	77
<b>Figura 23</b> Integración de resultados .....	80
<b>Figura 24</b> Resultado de simulación.....	80
<b>Figura 25</b> Procesos de inestabilidad.....	81
<b>Figura 26</b> Vector de flujo de masa .....	82
<b>Figura 27</b> Perfil de resultado topográfico 20160210 .....	83
<b>Figura 28</b> Perfil de resultado topográfico 20160224 .....	84
<b>Figura 29</b> Perfil de resultados km 43 .....	85

<b>Figura 30</b> Perfil de resultados km 44 .....	86
<i>Figura 31</i> Perfil de resultados km 44 .....	86
<b>Figura 32</b> Perfil de resultados km 45 .....	87
<i>Figura 33</i> Perfil de resultados km 46 .....	88
<b>Figura 34</b> Perfil de resultados km 47 .....	88
<b>Figura 35</b> Perfil de resultados km 47 .....	89
<b>Figura 36</b> Perfil de resultados km 48 .....	89
<b>Figura 37</b> Perfil de resultados km 49 .....	90
<b>Figura 38</b> Perfil de resultados km 50 .....	90
<b>Figura 39</b> Perfil de resultados km 51 .....	91
<b>Figura 40</b> Perfil de resultados km 52 .....	92
<b>Figura 41</b> Perfil de resultados km 53 .....	92
<b>Figura 42</b> Perfil de resultados km 54 .....	93
<b>Figura 43</b> Perfil de resultados km 55 .....	94
<b>Figura 44</b> Perfil de resultados km 56 .....	94
<b>Figura 45</b> Ubicación de la abscisa del Km 43 .....	95
<b>Figura 46</b> Ubicación de la abscisa del Km 44 .....	96
<b>Figura 47</b> Ubicación de la abscisa del Km 45 .....	98
<b>Figura 48</b> Ubicación de la abscisa del Km 46 + 215 .....	99
<b>Figura 49</b> Ubicación la abscisa del Km 48 y 49 + 050 .....	100
<b>Figura 50</b> Ubicación la abscisa del Km 49 + 050 al km 51 + 940.....	102
<b>Figura 51</b> Ubicación la abscisa del km 51+940 al km 54 + 010.....	103
<b>Figura 52</b> Flujos de masa en el tramo 54+010 al km 56 + 160 .....	105
<b>Figura 53</b> Coronas y bermas de control.....	107
<b>Figura 54</b> Corte y remoción .....	107
<b>Figura 55</b> Control de drenaje.....	108
<b>Figura 56</b> Figura a .....	109
<b>Figura 57</b> Figura b .....	109

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

<b>Fotografía 1</b> <i>Flujo de Masa</i> .....	36
<b>Fotografía 2</b> Deslizamiento tipo rotacional .....	37
<b>Fotografía 3</b> <i>Deslizamientos</i> .....	97
<b>Fotografía 4</b> <i>Rutas</i> .....	101
<b>Fotografía 5</b> <i>Flujo de masa</i> .....	104

## RESUMEN

En la vía correspondiente Alóag- Santo Domingo, no es muy común hacer cálculos rigurosos de la magnitud de las pérdidas económicas causadas por los deslizamientos en carreteras, pero intuitivamente se sabe que estos costos son muy importantes en especial con la pérdida de la producción agrícola que no puede ser transportada a otras regiones. En el cantón se ha observado que muchos habitantes han desarrollado sus viviendas cercanas al eje de vía, lo que ha ocasionado eliminación de la cobertura vegetal original, produciéndose erosión laminar y procesos iniciales de movimientos en masa.

En épocas de precipitaciones intensas, los sistemas viales del cantón y sus taludes por donde atraviesan, generalmente se han visto sometidos a deslizamientos frecuentes por estar geográficamente ubicados en zonas de bajas condiciones geotécnicas y morfo métricas que han condicionado su estabilidad. Los suelos que conforman los taludes no están completamente desarrollados y se encuentran formados casi en su totalidad por limos y arcillas, lo que ha disminuido su cohesión ocasionando que se produzcan deslizamientos en los límites de limo/arcilla.

Las deformaciones sismo tectónicas del relieve sobre la que se encuentran construidas la vía, están por lo general intensamente meteorizadas y en varios sitios se ha removido la cobertura vegetal original que es otro factor para que se produzcan movimientos en masa. ¿Qué le ocurrió al relieve topográfico en el tramo de la vía desde el km 43 al 56 durante y luego del sismo del 1 de abril de 2016?

En vista de lo anteriormente mencionado, esta investigación aplicó una metodología combinada para reducir este tipo de amenazas mediante tres procedimientos: el primero determinó las deformaciones del relieve utilizando Interferómetro Diferencial-INSAR.

Un segundo procedimiento se aplicó para determinar posibles tipos de movimientos en masa utilizando el Modelo Morfométrico y en un tercer procedimiento se determinaron las zonas inestables utilizando el criterio de Mohr-Coulomb.



Del resultado de la aplicación de esta metodología combinada, se obtuvieron 46 sitios en donde se producen flujos de masa relacionados con levantamientos y subsidencias del relieve que se activan en épocas de intensas precipitaciones principalmente. Una propuesta para la reducción de este tipo de amenazas es la reforestación de las vertientes y la recomposición de los taludes por donde atraviesa la vía.

**Palabras clave:** Deslizamientos, movimientos en masa, precipitaciones, flujo de masa, reforestación, taludes.

## ABSTRACT

In the corresponding Alóag-Santo Domingo Road, it is not very common to make rigorous calculations of the magnitude of the economic losses caused by landslides on highways, but intuitively it is known that these costs are very important, especially with the loss of agricultural production that it cannot be transported to other regions. In the canton, it has been observed that many inhabitants have developed their homes near the road axis, which has caused the elimination of the original vegetation cover, producing laminar erosion and initial processes of mass movements.

In times of intense rainfall, the canton's road systems and their slopes through which they cross have generally been subjected to frequent landslides because they are geographically located in areas of low geotechnical and morphometric conditions that have conditioned their stability. The soils that make up the slopes are not fully developed and are made up almost entirely of silt and clay, which has decreased their cohesion, causing landslides to occur at the silt/clay limits.

The seismic tectonic deformations of the relief on which the road is built are generally intensely weathered and, in several places, the original vegetation cover has been removed, which is another factor for mass movements to occur. What happened to the topographic relief in the section of the road from km 43 to 56 during and after the earthquake of April 1, 2016?

In view of the aforementioned, this research applied a combined methodology to reduce this type of threat through three procedures: the first determined the deformations of the relief using Differential Interferometer-INSAR.

A second procedure was applied to determine possible types of mass movements using the Morphometric Model and in a third procedure the unstable zones were determined using the Mohr-Coulomb criterion.

From the result of the application of this combined methodology, 46 sites were obtained where mass flows related to uplift and subsidence of the relief that

are activated mainly in periods of intense rainfall occur. One proposal to reduce this type of threat is the reforestation of the slopes and the recomposition of the slopes where the road crosses.

**Keywords:** Landslides, mass movements, rainfall, mass flow, reforestation, slopes.

## INTRODUCCIÓN.

En la vía Alóag – Santo Domingo, frecuentemente ocurren aluviones con flujos de rocas, tierra y otros elementos saturados de agua principalmente en épocas de intensas precipitaciones, los mismos han ocasionado pérdidas socio-económicas incluyendo tramos de la vía y de vidas humanas.

Históricamente estos aluviones han destruido la vía en los kilómetros 25, 27, 30, 32, 34, 36, 37, 38, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 50, 52, 53, 54, 56, 63, 78, 79, 83, aluviones reportados en notas de prensa, así como informes técnicos, como por ejemplo el Informe de Evaluación e Identificación de Riesgos realizado por la Empresa Sondeos Estructuras Geotecnias SEG contratados por el Consejo Provincial de Pichincha en el año 2014.

En esta investigación de tesis se analizó la susceptibilidad por movimientos en masa desde en el tramo comprendido desde el km 43 al 56, tramo en donde han ocurrido con mayor frecuencia deslizamientos y aluviones, provocados por factores climáticos en taludes deformados tectónicamente y erosionados.

Este análisis se ha centrado fundamentalmente en la determinación de la susceptibilidad de terrenos inestables en taludes y quebradas sobre el tramo de la vía mencionado para fortalecer la reducción de este tipo de amenazas y apoyar a los objetivos de los Consejos Provinciales tanto del sector de Pichincha como el de Santo Domingo de los Tsáchilas y posiblemente apoyar el desarrollo de un Sistema de Alerta Temprana – SAT.

Para determinar las zonas susceptibles por terrenos inestables se utilizó una metodología combinada de Geomática Aplicada que incluyó Análisis de Relieve Topográfico, el Análisis de Erosión y Flujos de Masa, utilizando parámetros morfométricos y finalmente se determinó la susceptibilidad ante movimientos en masa, utilizando parámetros geológicos como el ángulo de fricción de las partículas del suelo, la densidad y cohesión del suelo.

## **CAPÍTULO I**

### **1. PROBLEMA**

#### **1.1. Planteamiento del problema.**

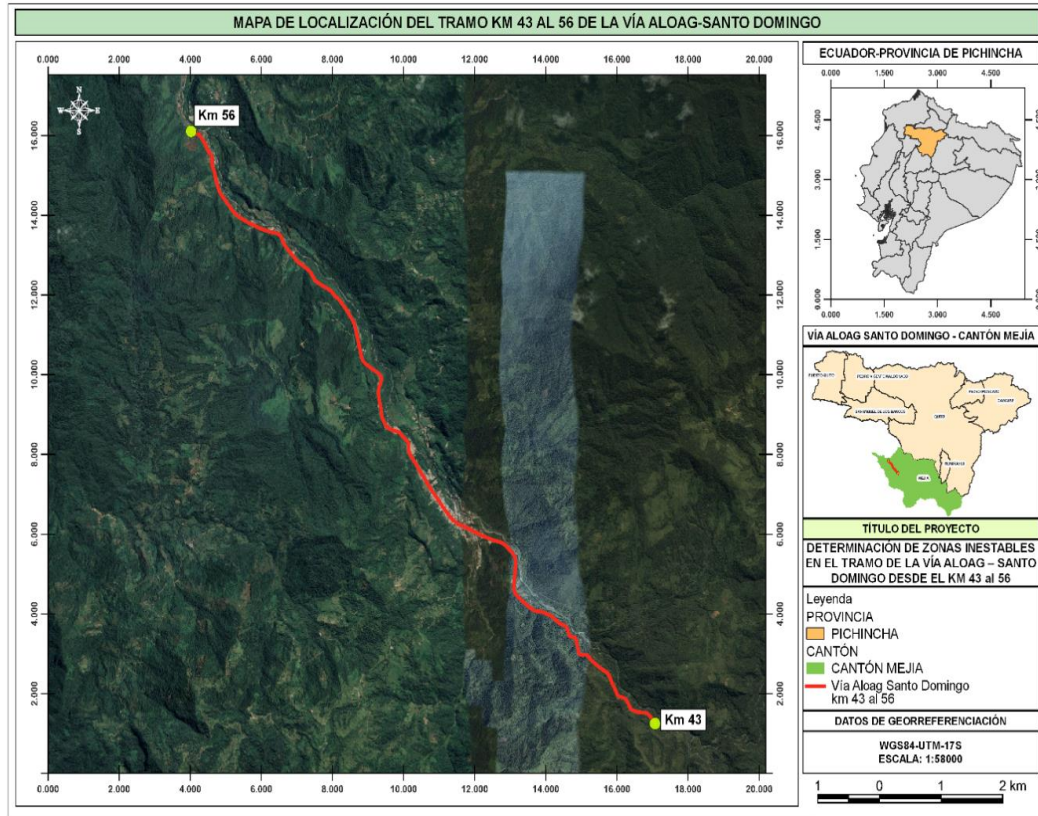
Las vías en el Ecuador, particularmente en las zonas rurales, presentan periódicamente una gran cantidad de deslizamientos y movimientos en masa en general causados principalmente por la acción de intensas precipitaciones en taludes deforestados o intervenidos, lo que causa pérdidas económicas ingentes, y en ciertos casos, hasta pérdidas de vidas humanas.

En el Ecuador el Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización, COOTAD Art. 140.- La Gestión de Riesgos que incluye las acciones de prevención, reacción, mitigación, reconstrucción y transferencia, para enfrentar todas las amenazas de origen natural o antrópico que afecten al territorio, se gestionarán de manera concurrente y de forma articulada por todos los niveles de gobierno de acuerdo con las políticas y los planes emitidos por el organismo nacional responsable, de acuerdo con la Constitución y la ley (COOTAD, 2018).

Por lo general en la Vía Alóag - Santo Domingo, no es muy común hacer cálculos rigurosos de la magnitud de las pérdidas económicas causadas por los deslizamientos en carreteras, pero intuitivamente se sabe que estos costos son muy importantes como se ha comprobado, por ejemplo, con la pérdida de la producción agrícola que no puede ser transportada a otras regiones.

**Figura 1**

*Mapa de localización del tramo km 43 al 56 vía Alóag-Santo Domingo*



*Nota.* Ubicación regional de la zona de estudio.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

En la Figura 1, se encuentra la ubicación del tramo de estudio desde el km 43 al 56, tramo en el que se ha constatado la ocurrencia permanente de movimientos en masa por lluvias intensas, los mismo que han sido datados en información de prensa, y en estudios realizados por varias instituciones (SEG. 2014).

Los sistemas viales del cantón y sus taludes por donde atraviesan, generalmente se han visto sometidos a deslizamientos frecuentes, por estar geográficamente ubicados en sistemas ambientales con condiciones físicas, químicas, geotécnicas y morfo métricas que han condicionado su estabilidad. Por estas características, los suelos que conforman estos taludes no están completamente desarrollados y se encuentran formados casi en su totalidad por

limos y arcillas, lo cual disminuye su cohesión y se producen movimientos de masas de suelo y/o roca en los límites limo/arcilla.

En la vía Alóag- Santo Domingo se ha observado que, muchos habitantes han desarrollado sus viviendas aledañas al eje de vía, lo que ha provocado la eliminación de la cobertura vegetal original, produciéndose erosión laminar y procesos iniciales de movimientos en masa, como se puede ver en las Figuras 2 (A) y (B).

No se consideró utilizar la capa de deforestación de coberturas vegetales originales como un factor que intensifica los movimientos en masa, debido que para la escala de trabajo de esta investigación que aproximadamente es 1:5000, no existe mapas de deforestación a esta escala en ningún organismo del estado o institución internacional referidas al tema.

**Figura 2A**

*Eliminación de cobertura vegetal*



*Nota.* En la figura 2 (A), podemos visualizar la eliminación de la cobertura vegetal original desde el eje de la vía. Fuente: Jorge Orlando Camacho Rodas

## Figura 2B

### Proceso de movimientos en masa tramo km 43 al 56



*Nota.* En la figura 2 (B), podemos visualizar la eliminación de la cobertura vegetal original desde el eje de la vía. **Fuente:** Jorge Orlando Camacho Rodas

Las deformaciones sismotectónicas del relieve que se encuentran intensamente meteorizadas por remoción de la cobertura vegetal, es otro factor para que se produzcan movimientos en masa en la región. En la Figura 3, se puede ver la intensidad de la deformación del relieve topográfico en el tramo de la vía, deformación obtenida por el método de Interferometría Diferencial-INSAR. Es posible que, con el sismo del 16 de abril de 2016, las deformaciones del relieve topográfico se hayan intensificado. En color rojo se ven las zonas de subsidencia y en color azul las zonas de levantamiento del relieve.

Dentro de la administración de Gestión de Riesgos, el Ecuador cuenta con un cuerpo legal que es la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias que transfiere el riesgo de una forma descentralizada y subsidiaria, es decir, las instituciones deben movilizarse al lugar donde se produce el accidente y atender la emergencia de forma directa. Una de esas instituciones el Cuerpos de Bomberos como entidades adscritas a los Gobiernos Autónomos Descentralizados.

Esta transferencia de competencias aún no se ha realizado en su totalidad, lo que ha ocasionado que los organismos de respuesta a emergencias, presenten una



falta de atención tanto operativa como administrativa, por parte del gobierno local correspondiente. Esta falta de transferencia se ve reflejada también en la poca capacidad tecnológica para adelantarse a la ocurrencia de estos eventos mediante mecanismos de Previsión que es un paso antes de la Prevención. Uno de estos mecanismos se presenta en esta tesis, mediante la combinación de tres herramientas de Geomática Aplicada, mecanismos que se describen posteriormente.

La falta de apoyo a los Cuerpos de Bomberos del país, cada vez es más evidente debido a los recortes presupuestarios, que han afectado su autonomía técnica y administrativa, lo que ha obligado a reducir la inversión en equipos especializados para protección, disminuir la capacitación del personal por autorización política e incluso a reducir su personal operativo, así como en su capacidad de desarrollo tecnológico en cuanto al conocimiento, desarrollo y aplicación de la Geomática Aplicada para la Reducción de Riesgos naturales y antrópicos.

Desde la década de los 80, se ha observado a nivel mundial el avance tecnológico para la determinación de amenazas naturales y antrópicas y mejorar con esto la Gestión de Riesgos. En el Ecuador, en esta misma época instituciones como el Centro de Levantamiento Integrado de Recursos por Sensores Remotos CLIRSEN, desarrolló varias aplicaciones, uso de software y capacitación al público general en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección Aplicada para determinar la susceptibilidad por movimientos en masa. Otras instituciones como universidades e instituciones del Estado desarrollaron en esta época varias metodologías denominadas Métodos Cartográficos Heurísticos y con variables ponderadas para determinar cartografía de riesgos en general, a escalas pequeñas (1:1'000000, 1:500000, 1:100000 y 1:50000). Posteriormente en la década de los 90, con la revolución tecnológica de los Sistema de Información Geográfica desarrollada en Europa, Norte América y en Sudamérica, las instituciones relacionadas con la Gestión de Riesgos, dieron un paso importante en el desarrollo de Cartografías de Riesgos y su reducción utilizando Geomática Aplicada que es una ciencia nueva para determinar el cambio de las variable ambientales a través

del tiempo en base de Teledetección, Sistemas de Información Geográfica y Simulación Numérica.

En el caso del Ecuador, la Secretaría de Gestión de Riesgos, desde el año 2008 desarrollo varias metodologías para elaborar Cartografía de Riesgo utilizando el Método Cartográfico Heurístico con ponderación de variables lo que permitió mejorar el detalle de la susceptibilidad ante amenazas por movientes en masa a escalas de mayor detalle como 1:25000, 1:10000 y 1:5000. En los últimos 10 años se mejoraron las metodologías para Cartografiados de Riesgos utilizando criterios más determinísticos de predicción de amenazas con el uso de software especializado, que a diferencia del método anteriormente mencionado, para determinar la susceptibilidad ante movimientos en masa más cualitativo utiliza parámetros e índices morfométricos obtenidos del modelos digitales de elevación de alta resolución espacial, análisis de deformaciones del relieve por Interferometría diferencia con tasas de movimiento vertical en mm/año, así como la aplicación de parámetros reológicos como la densidad, el ángulo de fricción y la cohesión del suelo con criterios teóricos como la del ángulo crítico y el esfuerzo de falla del modelo Mohr Coulomb. Uno de los cambios más importantes que trajo esta mejora es que actualmente hay un enfoque predictivo de este tipo de amenaza bajo los criterios de Previsión, Prevención y Reducción, entendiéndose estos criterios como el de elaborar cartografía de susceptibilidad ante este tipo de amenazas con anterioridad antes de la ocurra un deslizamiento (previsión), para poder corregirlo (Prevención) y con ello reducir este tipo de amenaza al máximo (Reducción).

Considerando que, en el año 2015, la Secretaría de Gestión de Riesgos, desde San José de Alluriquín hasta La Unión del Toachi, declaró una zona de 185 km<sup>2</sup> como zona de riesgo según resolución de emergencia No. SGR-028-2015 del 24 de marzo de 2015, debido a la ocurrencia anual de varios deslizamientos por precipitaciones intensas, se han realizado estudios de investigación sobre deslizamientos en la vía Aloag-Santo Domingo de los Tsáchilas (SEG. 2014; Levoyer, I. 2016; Zambrano, M. 2017; Palacios, I. 2020), estudios sobre de análisis, evaluación y zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa, como por

ejemplo el desarrollado por la Prefectura de Pichincha que analizó la susceptibilidad desde el Km 1+500 hasta el 77+000 ( SEG. 2014).

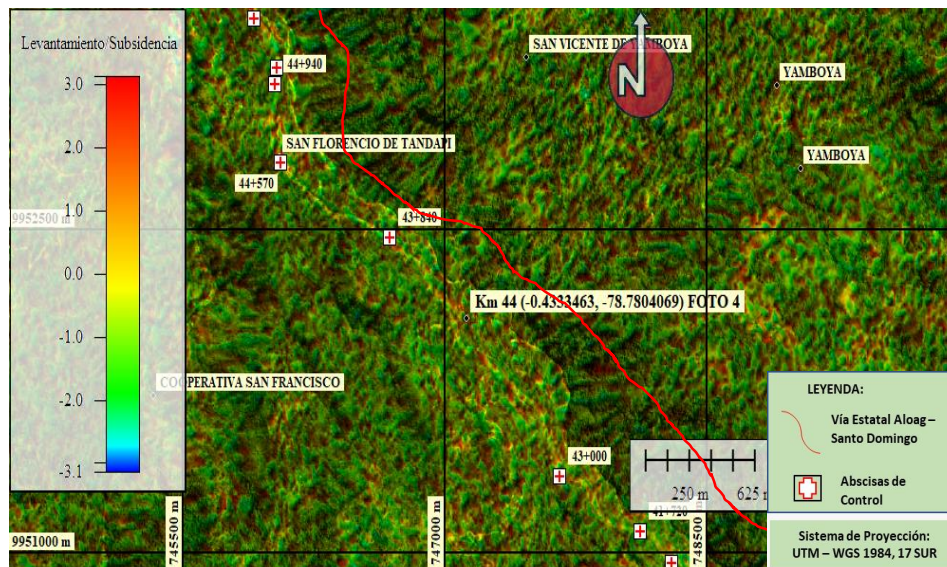
Las conclusiones de este último estudio, ratificaron que el tramo desde el kilómetro 43 hasta al 56 presenta inestabilidad de media a muy alta ante movimientos en masa por encontrarse ubicada espacialmente en una zona de intensa deformación tectónica y de alta pluviosidad, por lo que en esta tesis de investigación se ha elaborado un mapa de susceptibilidad ante estos eventos, considerando este y otros estudios apoyado por un inventario de movimientos en masa de campo, producto cartográfico necesario para ubicar correctamente obras estructurales para la reducción de este tipo de amenaza.

En referencia a métodos utilizados por instituciones para determinar este tipo de amenazas naturales, estas han utilizado criterios como el de Brabb, el Estadístico y Mora- Vahrson, que son métodos cualitativos que objetivamente no han aportado para la reducción de estos fenómenos, por lo que esta tesis de investigación aplicó una metodología combinada para reducirlas mediante tres procedimientos: el primero determinó las deformaciones del relieve utilizando Interferómetro Diferencial-INSAR, Figura 3. Un segundo procedimiento se aplicó para determinar posibles tipos de movimientos en masa utilizando el Modelo Morfométrico y en un tercer procedimiento se determinaron las zonas inestables utilizando el criterio de Mohr-Coulomb.

En esta investigación, dentro del tramo desde el km 43 al km 56 de la vía Aloag-Santo Domingo, se ubicaron espacialmente las zonas inestables en el trazado de la vía, lo que permitió definir medidas estructurales de estabilización y es un aporte para favorecer la movilización de las comunidades cercanas y reducir los costos que los gobiernos seccionales deben gastar cada vez que tienen que reparar los taludes y las vías destruidas por la ocurrencia de estos eventos.

### Figura 3

#### *Subsidiencias y levantamientos.*



**Nota.** Subsidiencias y levantamientos del relieve (tendencia al color rojo) en el tramo km 43 al 56 de la vía Alóag – Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

### 1.2. Formulación del problema

En la vía Alóag-Santo Domingo y dentro del tramo entre el km 43 hasta el 56, han ocurrido varios deslizamientos recurrentes en épocas de intensa precipitación, lo que ha causado pérdidas socioeconómicas importantes, incluyendo vidas humanas. La deforestación de zonas deformadas tectónicamente, y sismos mayores como el ocurrido del 16 de abril de 2016 (7,8 Mw) y de menor magnitud, han acelerado la meteorización y producción de este tipo de eventos, por lo que en base de las premisas indicadas en esta tesis de investigación se propone una metodología combinada de Geomántica Aplicada para la corrección de terrenos inestables por flujos de masa, principalmente causados por precipitaciones intensas y sismos mayores.

### 1.3. Justificación del problema

El mantenimiento vial que se realizan en la vía Alóag - Santo Domingo, tramo entre el km 43 al 56, por lo general no tienen en cuenta en su diseño el factor

de susceptibilidad por deslizamientos utilizando mecanismos predictivos (Previsión) con metodologías de Geomántica Aplicada para estabilizar taludes. Generalmente, los mapas de susceptibilidad por movimientos en masa elaborados por varias instituciones, utilizan solamente la Pendiente del terreno como marcador morfométrico condicionante para que ocurra un deslizamiento, lo que en sí no es un parámetro morfométrico único para que ocurran este tipo de eventos.

En este estudio, la metodología propuesta para determinación del nivel de inestabilidad en los taludes del área de estudio, combina la Interferometría Diferencial + el Modelo Morfométrico (parámetros Dirección y Acumulación de Flujo de la escorrentía superficial del agua de precipitación-FACC, el Índice de Humedad Topográfica-TWI y el Factor Longitud-Magnitud de la Pendiente-LS, como parámetros morfométricos principales para la generación de movimientos en masa) + Modelo Shalstab (en base de la teoría Mohr-Coulomb y su relación cantidad de lluvia necesaria (q)/Almacenamiento de agua en un talud (T), para desestabilizar un talud.

Los mapas de susceptibilidad ante movimientos en masa resultantes, permitirán realizar una medición del costo de construcción vial vs. el costo de reparación, rehabilitación y mantenimiento de las vías que posiblemente se reducirán al tener como base este tipo de mapas de Previsión (mapas de susceptibilidad), que es un proceso anterior a la Prevención, que también servirán para ubicar correctamente medidas estructurales de corrección de taludes y con ello garantizar su correcto funcionamiento, determinar cambios en el trazado vial en zonas geológicamente seguras en caso de amenaza irreducible y finalmente optar por la no construcción de una vía.

#### **1.4. Objetivo**

##### **1.4.1. Objetivo general**

Aplicar una metodología combinada de Geomántica Aplicada Avanzada (Sistemas de Información Geográfica, Teledetección y Modelación Numérica) para

analizar zonas inestables y recomendar medidas estructurales para su estabilización y reducir este tipo de amenaza.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Determinación de zonas inestables en el tramo de la vía Alóag – Santo Domingo desde el Km 43 al 56, utilizando un método combinado Interferometría Diferencial, el Modelo Morfométrico y la Teoría de Fallas de Taludes de Mohr Columb.
- Establecer medidas estructurales para la estabilización de taludes en el tramo de la vía Alóag-Santo Domingo desde el km 43 al 56.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO.

#### 2.1. Antecedentes investigativos.

Según el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGR, 2018), tanto en el pasado como presente, han existido grandes cambios morfológicos de acuerdo a las pendientes en el tramo Alóag – Santo Domingo, agregando a eso la actividad antrópica, la cual genera una gran aceleración de los agentes naturales climáticos, erosivos, dándole un alto grado de susceptibilidad, lo que ha aumentado los riesgos de las actividades socioeconómicas.

En general, se debe tener en cuenta que las relaciones hombre-medio ambiente, los taludes y laderas inestables, constituyen en un peligro latente, peligro que es importante definir para su reducción y control (IBER, 2010).

En referencia con lo planificado dentro de las actividades del proyecto de tesis, " Evaluación del nivel de susceptibilidad ante movimientos en masa en vía Aloag-Santo Domingo, tramo desde el km 43 al 56, Ecuador", se presenta el análisis de respuesta de una metodología combinada de herramientas de Geomática Aplicada de uso público, enfocada a determinar la tipología de movimientos en masa en la zona de estudio.

Estas actividades se han realizado de manera secuencial desde la determinación de subsidencias y levantamientos del relieve topográfico, hasta la determinación de zonas inestables con el criterio de falla del talud, pasando por un análisis de cambio morfométrico del relieve topográfico utilizando índices y parámetros morfométricos obtenidos de un modelo digital de elevaciones de alta resolución espacial. Se ha tomado como base la información del IEE, IGM, SENPLADES, ALASKA VERTEX, proyecto COPERNICUS, ESA, NASA y de otras fuentes gratuitas (Cando, M. 2019).

## **2.2. Fundamentación Teórica**

### **2.2.1. Geología-Geomorfología**

#### **2.2.1.1. Geología**

Geológicamente el área de estudio está representada por la Unidad Macuchi (Eoceno), Formación San Tadeo (Pleistoceno), Conglomerado Zarapullo (Cuaternario), así como depósitos superficiales (terrazas, depósitos coluvión-aluviales), como se puede apreciar en la Figura 4.

A continuación, se describen las formaciones geológicas desde la más antigua a la más joven (García, 2017), (BALDOCK J. W, 1982):

**La Unidad Macuchi:** comprende una secuencia litológica conformada por tobas, areniscas volcánicas, limos, turbaditas re depositadas, pillow lavas andesítico-basálticas, brechas y sedimentos de grano fino. Las tobas se presentan en estratos mayores de un metro, su coloración es verdosa, en la secuencia volcanoclástica se incluyen junto a las areniscas volcánicas y las brechas a sedimentos de grano fino solidificados, también de color verdoso. (Vallejo, 2009).

**Formación San Tadeo (PST):** La Formación San Tadeo cubre algunos sitios de la Sierra y considerables áreas de la llanura costera en la parte norte del Ecuador. Consiste de piro clastos, conglomerado volcánico, material Laharítico y corrientes de lodo, generalmente formando sabanas. El espesor podría llegar a los 1000 m, probablemente es producto de la fuerte actividad volcánica ocurrida en el pleistoceno de la pichincha y otros volcanes en el centro de la Sierra. Los abanicos laharíticos y de flujos de lodo gradan a depósitos de terraza de pie de monte de la Formación Pichilingue que los cubren parcialmente. (Gualavisí Llive, 2018).

**Conglomerado Zarapullo (Pza):** Corresponde a un depósito conformado por guijarros y cantos rodados por la acción de los ríos Pilatón y Toachi; y que presenta una pobre estratificación en matriz limo-arenosa, se los evidencia en el sector del Rancho San José en la parroquia Manuel Cornejo Astorga, (Vallejo, 2009).

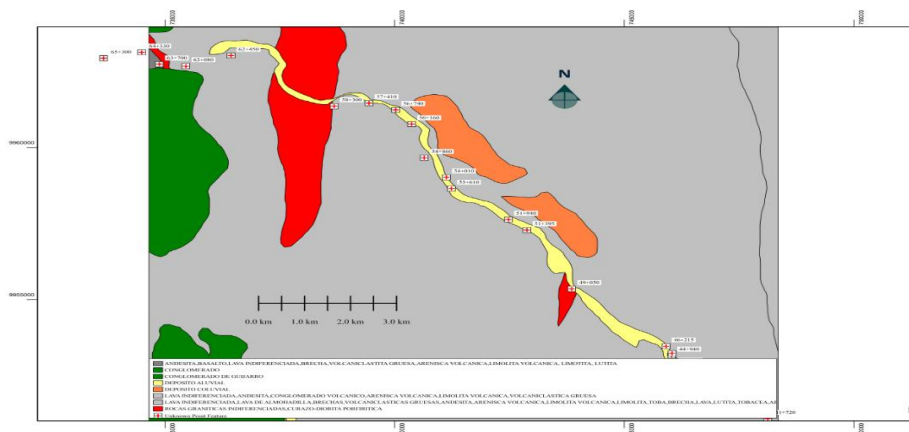


**Depósitos superficiales:** Terrazas Indiferenciadas y Materiales de Derrubios Antiguos: Materiales de terraza, no diferenciados, se han separado. Presentan cierta estratificación y su composición granulométrica y litológica, constituidos de conglomerados, gravas, arenas y arcillas, están asociados con las formaciones rocosas que las circundan y originaron. Los materiales de derrubios aquí delimitados, son pequeños conos de deyección antiguos, cuya litología derivada de las rocas subyacentes están muy alteradas y lateralizadas. (Vallejo, 2009).

**Depósitos Coluviones:** Se distingue un depósito coluvial en el sector de El Paraíso que se origina más al sur en la hoja inmediata donde yace la mayor parte del mismo. Forma una superficie cuyo material caótico de naturaleza volcánica se observa en el carretero como bloques subred ondeados, lo que indica que ha existido transporte de material rocoso. (Vallejo, 2009).

**Depósitos Aluviales y Terrazas Aluviales:** Materiales aluviales se encuentran en los valles de los ríos actuales, constituidos por arenas finas, gruesas y gravas de litología variable, sobre todo en el río Toachi donde se han identificado tres niveles de terrazas. (Vallejo, 2009).

**Figura 4**  
*Geología del área de estudio.*



*Nota.* Geología del área de estudio, tramo de la vía km 43 al 56. Fuente mapa Hidrogeológico del Ecuador MAGAP-Petroecuador 1993.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

Estas formaciones afloran principalmente en las zonas de Alluriquín, Unión del Toachi, Cooperativa Dos Ríos, Cooperativa Atahualpa entre otras.

### **2.2.1.2. Peligros geológicos**

Los procesos de Geodinámica Externa en el área de estudio, son proceso superficial de meteorización, transporte y depositario de sedimentos desde las partes altas a las partes bajas, causados por variaciones climáticas extremas, sismo tectónicos y antrópicos que han afectado la estabilidad de los taludes y han determinado una constante variación dentro de su composición geológica-morfológica. (Obregón, 2014).

### **2.2.2. Tectónica.**

#### **2.2.2.1. Geología estructural.**

Podemos decir que la geología estructural posee relación directa con disciplinas geológicas como la mecánica de suelos, mecánica de rocas y la geotecnia. Es bastante importante en geología para entender el origen y la formación de yacimientos, comprender cómo se formó el actual modelo topográfico de la superficie terrestre; en ingeniería civil es la base de proyectos de construcción (edificaciones, puentes, carreteras, represas, entre otras) y como herramienta de prevención para la mitigación y control de riesgos geológicos(Fossen, 2018).

Como concepto, la Geología Estructural tiene relación directa con disciplinas geológicas como la mecánica de suelos, mecánica de rocas y la geotecnia. Es importante dentro de este capítulo, para entender cómo se formó el actual modelo topográfico de la superficie terrestre. En ingeniería civil es la base de proyectos de construcción (edificaciones, puentes, carreteras, represas, entre otros.) y como herramienta de prevención para la mitigación y control de riesgos geológicos.

Estructuralmente, la zona de estudio se encuentra atravesada por sistemas de falla con direcciones preferenciales NO-SE y N-S, las mismas que están controlando gran parte de las superficies geológicamente inestables presentes en la

zona, por lo que se evidencian deslizamientos de tipo traslaciones, rotacional y de caída, principalmente (ver la Fotografías 1 y 2).

### **Fotografía 1**

#### *Flujo de Masa*



*Nota.* Imagen captada en la zona de estudio.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

## Fotografía 2

### Deslizamiento tipo rotacional



*Nota.* Imagen captada en la zona de estudio.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

Se entiende un deslizamiento de tierra como un movimiento masivo del complejo suelo- rocas acompañado de escombros, tierra y lodo que fluyen por una pendiente y son activados por factores dinámicos como precipitaciones intensas sismos mayores o actividad antrópica, incluyendo procesos naturales como erupciones volcánicas, presión del agua subterránea, erosión, desestabilización de laderas como resultado de la deforestación, el cultivo y la construcción, incluyendo la generación de avalanchas de nieve o el deshielo de los glaciares.

El sector de estudio se encuentra atravesado por numerosos lineamientos estructurales y fallas regionales como se describe a continuación (Castellet, 2018) (USGS - EPN, 2003), (BALDOCK J.W, 1982):

- La Falla Baba (EC34) con movimientos de tipo vertical inverso y dextral (de rumbo). Concentración de esfuerzos con fallaamiento local casi - paralelo y roturas oblicuas según composición, naturaleza y competencia de los macizos rocosos afectados.

- Falla Tandapi (EC32), otra falla importante de tipo siniestrar (de rumbo) con movimientos horizontales y efecto preparativo del terreno para la acción intensa de procesos de meteorización y falla miento local.
- La Falla Río Toachi Grande-Alluriquín-Mindo con un rumbo NE\_SW y pasa por el poblado de Alluriquín.
- Otra falla es la de Río Toachi con rumbo SE-NW, pasa junto al río Toachi en el tramo Tandapi-Alluriquín.

### **2.3. Amenaza Sísmica**

La actividad sísmica en la Tierra se debe al movimiento de las placas tectónicas que conforman la corteza terrestre o litósfera. Dichas placas, al estar en contacto, generan fuerzas de fricción que llevan a un estado de equilibrio precario, es decir, a un movimiento relativo nulo entre placas, en el cual se acumula gran cantidad de energía mecánica, que es liberada de manera súbita cuando se vencen las fuerzas de fricción que impedían el movimiento.(Oterino, 2017)

La manera en que se propaga la energía liberada es a través de ondas sísmicas que viajan por la corteza y el manto (así es, una onda también puede propagarse a través de un medio líquido o viscoso) a miles de kilómetros a su alrededor.

Hasta el día de hoy no es posible predecir cuándo y en dónde ocurrirá un sismo (ubicación, tiempo, magnitud, intensidad, entre otros.) para predecirlo son muy elevadas, como lo son también las demandas sísmicas que inducen a una estructura o edificación (Galofré, 2017).

Sin embargo, podemos hacer uso del Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico (de ahora en adelante APPS) para tomar en cuenta dichas incertidumbres a través de modelos probabilísticos sobre la actividad sísmica de la fuente (regiones en donde se generan los sismos) y de modelos de atenuación que permiten estimar la intensidad de un sismo en un determinado sitio, a partir de su magnitud en la fuente que lo generó y la distancia entre la fuente y el sitio de interés.

De acuerdo con la normativa ecuatoriana de la construcción (Pérez, 2018), es muy importante para el Ecuador, mejorar la calidad de las edificaciones estructurales y sobre todo para proteger la vida de las personas. (NEC-SE-DS, 2018). En relación con el sismo del 16 de abril de 2016, a continuación, presenta una síntesis sobre la relación falla geológica vs. generación de sismos y su relación con la deformación del relieve topográfico.

Para analizar la amenaza sísmica, se utilizaron parámetros como localización de los sismos, magnitud e intensidad sísmica, aceleración sísmica y distancias de cada una de los lineamientos estructurales con respecto al área de estudio.

El objetivo de este análisis es el obtener los valores de aceleración y magnitud que permitan estimar las condiciones susceptibilidad sísmica que la población presenta y cuáles serían los daños que estas ocasionaría esta amenaza.

Tectónicamente, el área de estudio está dentro de una zona intraplaca, quiere decir que se encuentra en la zona de deformación de la corteza continental y de sistemas de fallas activas, si ocurren terremotos intraplaca de grandes magnitudes pueden generar graves daños, sobre todo porque la zona no está preparada para los terremotos y las estructuras no suelen estar adaptadas sísmicamente.

El catálogo de sismos perceptibles (1660-2008) documentados de los registros de IGPN (Instituto Geofísico), presenta poca información para evaluar la peligrosidad sísmica de los sectores industriales y de áreas densamente pobladas. Pero los datos recopilados de la Red Nacional de Sismógrafos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica, se establece 27 sismos generados muy cerca del área de estudio, con magnitudes comprendidas en el rango de  $4 \leq M \leq 5.5$  con profundidades focales de  $1.3 \leq H \leq 90$  Km. Ver Tabla 1.

**Tabla 1**  
*Registros de sismos.*

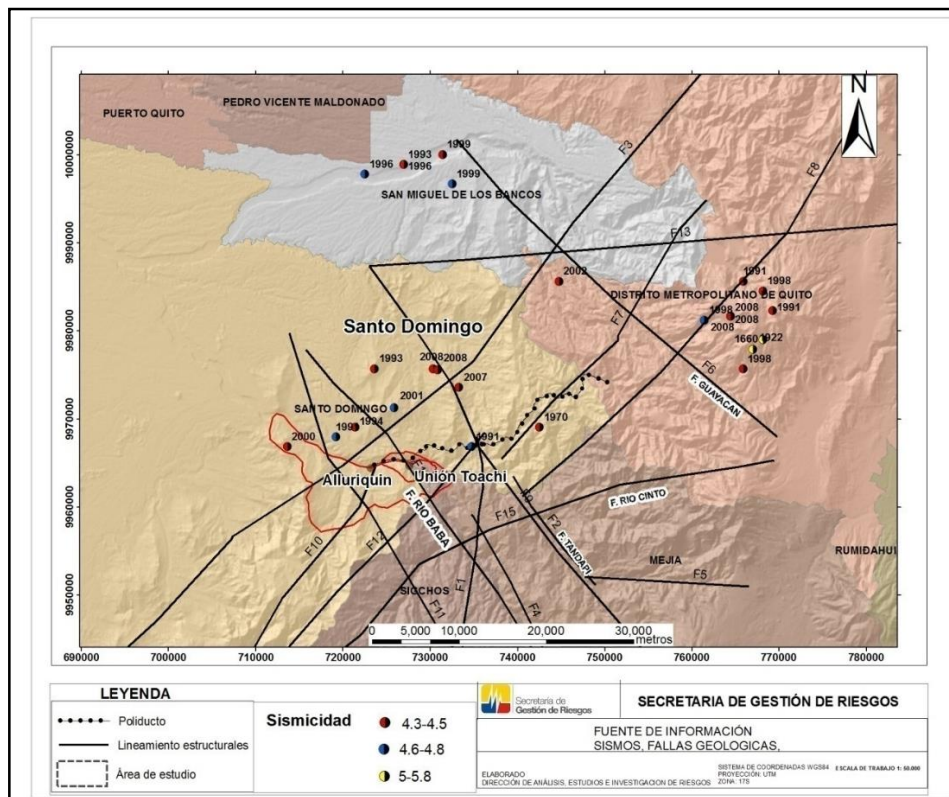
<b>Años</b>	<b>Meses</b>	<b>Días</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Mw</b>	<b>Profundidad km</b>
1660	10	27	-0,19	-78,59	5,5	33
1922	4	6	-0,2	-78,6	5	33
1970	8	16	-0,28	-78,82	4,3	48
1987	3	9	-0,56	-78,8	4,7	10
1991	4	22	-0,3	-78,89	4,7	28
1993	9	21	-0,22	-78,99	4,4	33
1996	1	17	-0,01	-78,96	4,8	24
2000	6	14	-0,3	-79,08	4,3	33
2008	3	20	-0,22	-78,93	4,4	12
2008	10	4	-0,166	-78,6233	4,3	6,95
1991	2	17	-0,16	-78,58	4,3	10,3
1991	2	17	-0,13	-78,61	4,5	10,7
1991	4	22	-0,29	-79,03	4,6	12,8
1993	9	21	-0,01	-78,96	4,5	25,4
1994	9	2	-0,28	-79,01	4,4	23
1996	1	17	-0,02	-79	4,6	19,6
1998	6	10	-0,22	-78,61	4,3	9,7
1998	6	28	-0,14	-78,59	4,5	90
1998	11	17	-0,17	-78,65	4,7	2,5
1999	5	16	0	-78,92	4,3	17
1999	5	17	-0,03	-78,91	4,8	20
2001	11	9	-0,26	-78,97	4,6	29,2
2002	7	8	-0,13	-78,8	4,3	21,6
2007	7	11	-0,239	-78,903	4,3	11,6
2008	3	20	-0,221	-78,9253	4,4	12,93
2008	10	4	-0,166	-78,6233	4,3	6,95
2008	10	4	-0,166	-78,6233	4,3	6,95

*Nota.* Registros de sismos generados cerca y en el área de estudio, datos obtenidos del Catálogo de IGPN. Fuente: J Camacho 2022.

Los problemas suscitados por movimientos en masa ocurridos en la zona de estudio y otras zonas como por ejemplo en la parroquia San José de Alluriquín, posiblemente tienen su origen también en sismos mayores a 5 Mw que deformaron los paisajes se realizó un análisis de sismicidad histórica acompañadas de efectos geológicos que han deformado el medio físico y natural. Se identificaron lineamientos estructurales interpretados como 11 segmentos de fallas corticales (fallas superficiales) en relación directa con las 4 fallas regionales como Falla Tandapi, Falla Cinto, Falla Guayacán, Falla Sigchos y Falla Río Baba que presentan desplazamientos  $\geq 1$  mm/año, las mismas que producen esfuerzos en el terreno provocando deformación e inestabilidad en los taludes (Eguez, A. Yepes, H., 1994). Para relacionar estas fallas y deformaciones superficiales con la tectónica activa del sector, se analizaron los sismos cercanos al área de estudio que se representa en la Figura 5, posteriormente, en la tabla 2 se detalla cada una de las fallas geológicas.

**Figura 5**

*Registros de sismos.*



**Nota.** Registro de sismicidad por fallas geológicas y segmentos de falla. Fuente: (SNGRE, 2015).



### 2.3.1. Características sismo genéticas

Las zonas sismo genéticas son un artificio del método de cálculo de la peligrosidad sísmica más usado en la práctica, conocido como el método zonificado de Cornell MacGuire, este método consideraba las zonas como una alternativa para modelar el espacio probabilista de las relaciones distancia a la fuente con el emplazamiento objeto de estudio, particularmente para cuando las asociaciones entre la sismicidad y las fallas geológicas no fueran patentes con el paso del tiempo, el empleo de las zonas (fuentes arenales) ha sido mucho más profuso que el de las fuentes lineales y, de hecho, en muchos casos es el único modelo considerado.

En zonas sismo genéticas de características sismo tectónicas comunes se denomina zonificación. La delimitación de zonas sísmicas requiere englobar en una misma zona aquellas fallas o estructuras geológicas que puedan generar patrones similares de sismicidad.

Dicho de otra forma, los límites deben separar zonas capaces de generar terremotos cuya magnitud máxima y recurrencia sean bien diferentes.

La diferencia entre los criterios utilizados para la definición de las zonas sismo genéticas causa una notable variación en la combinación de factores dentro del procedimiento para la definición de las zonas sismo genético de un territorio, lo que ha generado la existencia de distintas zonificaciones

Para identificar los escenarios de terremotos y su influencia en la zona de estudio, se tomó como referencia la investigación realizada por la SGR (2015) (MOKARRAM, 2017), investigación en la que se realizó un análisis detallado de todas las fallas geológicas (estructuras sismo genéticas) cercanas al área de estudio, para evaluar su capacidad y potencialidad de generar sismos con magnitudes  $M_w \geq 6.1$ , fallas geológicas que se presentan en 15 segmentos. Figura 5. La distancia de los sismos depende de la geometría, la longitud y la forma de la ruptura sobre el plano de falla, y la probabilidad de la activación de terremotos y los efectos que estos pueden causar.

Las fallas corticales (o superficiales) segmentadas tienen dimensiones en el orden de 15km a 140km de longitud. Para comprender las máximas magnitudes sísmicas que pueden generar estas fallas se ha utilizado la fórmula propuesta de Leonard (2010) (MOKARRAM, 2017), la que establece relaciones de regresión lineal desde su cinemática y geometría para las estructuras sismo génicas.

Desde el área de estudio, la falla (F3) de mayor dimensión se encuentra a 3 km de distancia de la zona de estudio y puede generar un sismo de Mw 7.7. Las fallas F-8, F-11, F-13, 14 y F-15 pueden generar sismos de magnitudes máximas de 7, mientras que las fallas de menor dimensión de entre 15 a 58 km son capaces de generar sismos con magnitudes entre 6.2 a 6.8. Ver tabla 2.

La falla F-8 puede generar valores de PGA de 0.57g, mientras que la falla F-3 valores de 0.47 g. En conclusión, en análisis anterior, significa que el sustrato rocoso se encuentra fallado y en condiciones muy vulnerables, porque al producirse un sismo de magnitudes y aceleraciones considerables anotadas, los suelos que se encuentran sobre ellas tienden a moverse provocando deslizamientos en masa, por lo tanto, el área de estudio, en la zona de estudio se encuentra situada en una zona de alta sismicidad. Ver Tabla 2.

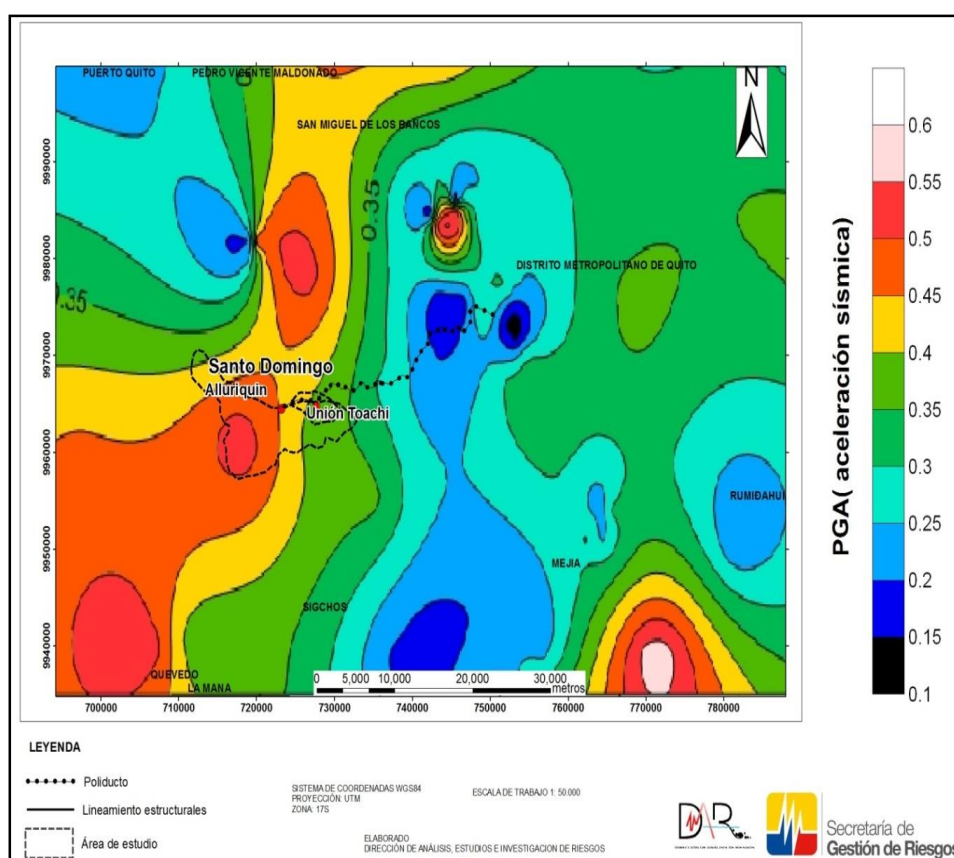
**Tabla 2***Parámetros.*

Falla capaz	Tipo	Longitud de falla (Km)	Prof. falla (Km)	Distancia más cercana falla - sitio (Km)	Azimut	Buzamiento aparente	Rake	Ancho de falla	Posición estructural de falla	Máximo desplazó. (m) desde relaciones empíricas propuestas por Well & Coppermish, 1994	Magnitud estimada desde relaciones empíricas propuestas por Leonard, 2010	PGA (aceleración) desde Fukushima & Tanaka, 1994	Niveles de confiabilidad desde análisis sísmológicos y morfológicos	Bibliografía, referencia citada	Dist. Sitio - Plano falla en profundidad (Rrup) considerando un buzamiento de 45 grados
F-01	Inversa	26	28	1	5	85	180	9	Hangingwall	1,1	6,5	0,17	Cierta	Eguez et al., 2003	28
F-02	Inversa	15	10	19	330	90	90	8	Hangingwall	0,8	6,2	0,31	Cierta	Eguez, 2003	-42
F-03	Inversa	141	11	3	55	45	90	14	Hangingwall	2,3	7,7	0,47	Cierta	Eguez et al., 2003	6
F-04	Inversa	18	20	14	330	45	90	8	Footwall	0,9	6,3	0,21	Cierta	Eguez et al., 2003	27
F-05	Inversa	18	10	25	92	45	90	8	Footwall	0,9	6,2	0,32	Cierta	Eguez et al., 2003	26,9
F-06	Inversa	50	22	34	130	45	90	11	Footwall	1,4	6,9	0,27	Cierta	Eguez et al., 2008	40,5
F-07	Inversa	37	48	18	40	45	90	10	Footwall	1,2	6,7	0,12	Cierta	Eguez et al., 2008	51,3
F-08	Inversa	58	3	19	45	45	90	11	Footwall	1,5	7,1	0,57	Cierto	Alvarado et al., 2014	36
F-09	Inversa	58	12	9	345	45	90	11	Footwall	1,5	7,1	0,4	Cierto	Alvarado et al., 2014	17

*Nota.* Parámetros estructurales de falles en área de estudio.**Fuente:** Camacho, J. 2022

En base a los valores de PGA (Peak Ground Acceleration) se obtuvo un escenario de estimaciones de niveles sísmicos, los cuales se encuentran asociados a dominios estructurales comprensivos (levantamiento tectónico), distensión y tras concurrentes. Localmente el PGA es de 0.45 a 55. Figura 6.

**Figura 6**  
*Estimación.*



**Nota.** Estimación de máximas aceleraciones (PGA) para el área Alluriquín, desde los datos de sismicidad, modelos tectónicos con fallas geológicas regionales y segmentadas activas y capaces de generar sismos de considerables magnitudes. **Fuente:** SGR 2015.

Estimación de máximas aceleraciones (PGA) para el área Alluriquín, desde los datos de sismicidad, modelos tectónicos con fallas geológicas regionales y segmentadas activas y capaces de generar sismos de considerables magnitudes. Fuente SGR 2015.

#### **2.4. Hipótesis o ideas a defender.**

El análisis espacial de zonas inestables en el tramo de la vía Alóag – Santo Domingo desde el km 43 al 56, se pueden cartografiar mediante la Aplicación de Geomática Aplicada que utiliza metodologías para determinar deformaciones topográficas del relieve, el flujo de acumulación - empuje de masa utilizando parámetros morfométricos y la Ley de Falla de Taludes de Mohr-Columb.

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO.

#### 3.1. Tipo de investigación.

El tipo de investigación utilizada en esta tesis por una parte es Aplicada ya que utiliza metodologías que se pueden aplicar a la realidad de manera práctica y rápida. Por otro lado, también esta investigación es de tipo Descriptiva ya que realiza un análisis de escenarios reales mediante la utilización de parámetros medibles.

No se utilizaron medidas de dispersión centrales que se utilizan en la Estadística Gaussiana ya que la población es muy pequeña, que en este caso corresponde al absisados de la vía desde el km 43 al 56 de la vía Alóag – Santo Domingo.

#### 3.2. Materiales y Métodos

Para toda la simulaciones y elaboración de la cartografía final se utilizó el sistema de referencia de coordenadas referidos al mapa internacional UTM correspondiente al cuadrángulos 17 M y N, zona continental, que corresponde al Sistema de Referencia de Coordenadas Geodésicas UTM, WGS84 zona 17 Sur y punto de referencia -81°00 Longitud E-O; 0°00'00'' Latitud N-S.

Se trabajó con un modelo digital de elevación de 12.5 metros de resolución espacial, obtenidos del Alaska-Vertex de la Agencia Nacional Aeroespacial-NASA, el GAD en la vía Aloag – Santo Domingo, tramo desde el 43 al 56. La información de planimetría y otra información temática fue obtenida del Sistema Nacional de Información-SIN, Instituto Geográfico Militar-IGM, Instituto Geofísico Nacional-IGN y de otras fuentes.

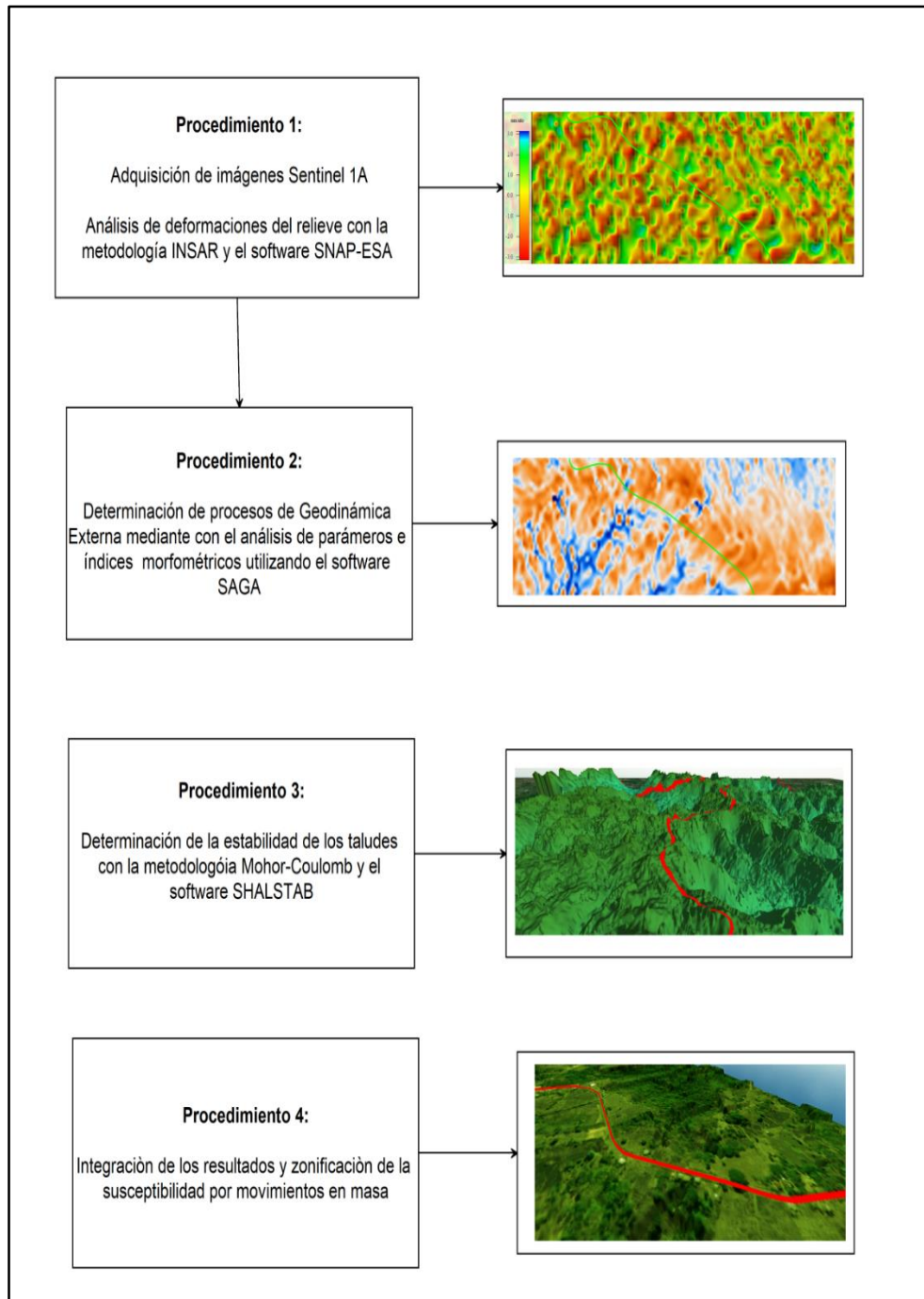
Para elaborar el proceso interferométrico se utilizaron 9 imágenes Sentinel 1 dentro del periodo de tiempo comprendido ente el 10 de febrero de 2016 hasta el 24 de abril de 2016, antes y después del sismo del 16 de abril de 2016 que afectó principalmente a la costa ecuatoriana.

Como se mencionó anteriormente, este estudio aplicó una metodología combinada para determinar zonas susceptibles ante movimientos en masa mediante tres procedimientos de Geomática Aplicada Avanzada (Sistemas de Información Geográfica, Teledetección y Modelación Numérica). La primera herramienta de Geomática Aplicada y su metodología para determinar la deformación del relieve topográfico, utilizó la teoría de la Interferometría Diferencial (INSAR). El software utilizado para aplicar la metodología INSAR fue el Sentinel Application Platform-SNAP de la Agencia Espacial Europea-ESA.

La segunda metodología de Geomática Aplicada para determinar posibles tipos de movimientos en masa, utilizó el Modelo Morfométrico desarrollado por Cando, M. [10] con el software Sistema para Análisis Geocientífico Automatizado-SAGA del Departamento de Geografía Física, Hamburgo y Göttingen, Alemania y finalmente, una tercera herramienta de Geomática Aplicada para determinar zonas inestables, utilizó el criterio de Mohr-Coulomb, en base del software de uso público Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Arcview-SHALSTAB de la University of California, Berkeley. Para cumplir con los objetivos específicos propuestos se siguió el flujo de procedimientos que se pueden observar en la Figura 7.

## Figura 7

### Procedimientos.



*Nota.* Flujo de procedimientos para la determinar la susceptibilidad ante Movimientos en Masa vía Alóag – Santo Domingo, tramo desde el 43 al 56. **Fuente:** Camacho, J. 2022

A continuación, se describen todos los procedimientos indicados en la Figura 7:



### **3.3.Procedimiento 1**

#### **Adquisición de imágenes Sentinel 1 y análisis de deformaciones Del relieve con el método INSAR.**

En los últimos años, la Interferometría por Radar de Apertura Sintética y sus variantes, se ha utilizado para medir deformaciones en relieve de forma muy eficaz basándose en dos imágenes tomadas en distinta época (INSAR) o utilizando grandes pilas de imágenes SAR (DINSAR)(William Dietrich, 2018).

La técnica INSAR y sus variantes, hacen uso de los datos adquiridos por sensores de Radar de Apertura Sintética-SAR espaciales y utilizan al máximo la información contenida en la fase o desplazamiento vertical de radar de imágenes SAR complejas adquiridas en diferentes momentos sobre la misma área de estudio. Varios investigadores han contribuido a mejorar la ubicación espacial de las subsidencias del relieve topográfico de túneles o galerías que provocan la desecación de los acuíferos por extracción de material o de minerales del subsuelo (Baumann, 2018).

La técnica INSAR y sus aplicaciones han sido documentadas en varios artículos en revistas científicas de alto nivel como Nature y Science, Remote Sensin, entre otras, en donde ha contribuido en diferentes campos de las Geo ciencias como la sismología, con importantes logros científicos, incluyendo análisis cosísmico y post-sísmico, antes de la ocurrencia de un terremoto (Dietrich, 2018).

De la misma manera como aporte la vulcanología, es la rama de la geología que estudia el vulcanismo y todas sus manifestaciones, como volcanes, géiseres, fumarolas, erupciones volcánicas, magmas, lavas, tefras, entre otras.

Los vulcanólogos los geólogos especialistas en esta rama, relacionada con la geodinámica y la geomorfología visitan frecuentemente los volcanes terrestres, en especial los que están activos, para observar las erupciones y recoger restos volcánicos como la tefra (ceniza o piedra pómez), rocas y muestras de lava.

La vulcanología es otro campo de aplicación importante, con varios estudios de deformación volcánica (deflación y elevación). Estas deformaciones volcánicas han permitido determinar los posibles orígenes de lahares secundarios

La mayoría de los fenómenos que se da en el interior de la tierra, los movimientos y la dinámica del magma se conocen muy poco. De cualquier forma, es conocido que a una erupción le puede seguir el movimiento de magma hacia la capa sólida (la corteza de la tierra) bajo un volcán y creando una cámara magmática.

Es así que el magma del depósito es expulsado hacia arriba y acaba fluyendo sobre la superficie de la tierra en forma de lava, o bien el magma expulsado puede calentar el agua de los alrededores, transformando el agua en vapor, lo que aumentaría considerablemente la presión.

Como consecuencia, pueden producirse erupciones explosivas. Siendo estas erupciones explosivas pueden expulsar gran cantidad de restos volcánicos, como ceniza volcánica (también llamada tefra) o bombas volcánicas, las cuales pueden llegar a ser lo suficientemente grandes como para matar a personas y animales. Las erupciones pueden oscilar entre efusivas y extremadamente explosivas.(Bordino, 2018)

El análisis DINSAR es una variante del INSAR y se ha aplicado para detectar deslizamientos con la técnica de Dispersión Persistent Scatter-PS la que puede determinar la geometría de algunos tipos de deslizamientos de tierra con buenos resultados. (ESA, 2018)

En el caso de hundimientos y levantamiento del suelo, el análisis INSAR ha obtenido resultados eficientes en varias partes del mundo que han sido descritos en revistas especializadas. Se ha demostrado como túneles y galerías subterráneas han desequilibrado los sistemas de agua de la escorrentía superficial, así como los sistemas de flujo de agua subterránea, provocando la destrucción de edificios en la superficie. Se han investigado otros procesos de hundimiento en todo el mundo por

otros factores como bombeo de fluidos, trabajos de construcción, actividad geotérmica, entre otros. (ESA, 2018)

En la mayoría de los resultados publicados que se refieren a áreas urbanas, los datos INSAR son consistentes incluso en períodos prolongados, debido a la existencia de reflectores artificiales estáticos como edificios y otras estructuras de hormigón armado que se mantienen estables.

Con el advenimiento de las técnicas de Persistent Scatterers con alta y pesado coherencia, se han obtenido resultados más eficientes para monitorear las deformaciones del relieve fuera de las áreas urbanas, suburbanas e industriales.(ESA, 2018)

En Ecuador, existen pocos estudios utilizando imágenes SAR, metodologías INSAR y sus variantes. En 1977 el Gobierno ecuatoriano creó el Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), entidad tecnológica y científica destinada a integrar las más avanzadas tecnologías relacionadas con Geodesia, Recursos Naturales, Medio Ambiente, Catastro, Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Clirsen, utilizó imágenes de radar de visión lateral y de apertura real (SLAR), adquiridas por las empresas petroleras de la región amazónica y el primer mosaico semi controlado de Radar Aero con apertura sintética transportada (SAR), imágenes tomadas para la exploración de campos petroleros en 1982.

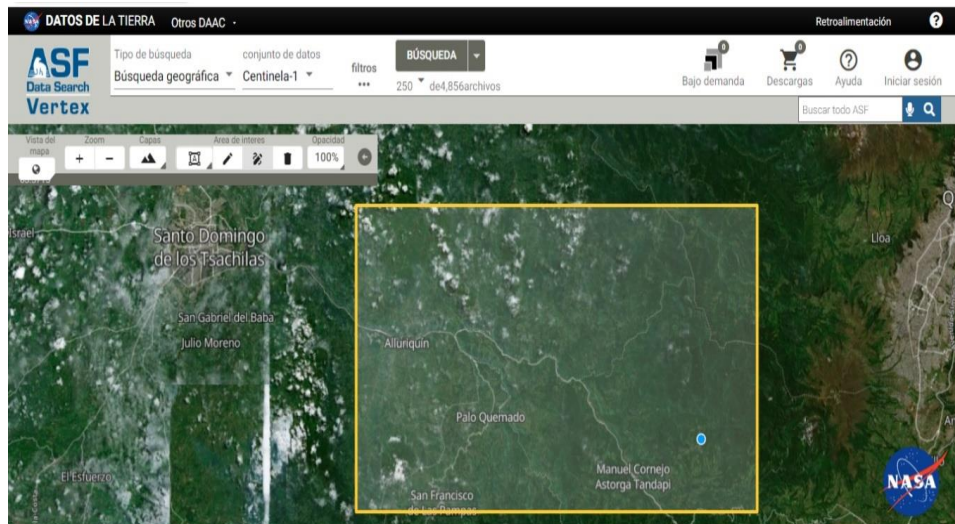
En esta tesis, para determinar la intensidad de las deformaciones del relieve, se ha seguido la secuencia de pasos seguidos por (Cando, M. 2019 [25], utilizando 9 imágenes Sentinel 1 tomadas desde el 10 de febrero de 2016, antes del sismo del 16 de abril de 2016, hasta el 24 de abril de 2016, seis días después del sismo.

Las imágenes Sentinel 1 que se utilizaron para determinar las deformaciones del terreno utilizando la técnica de Interferometría por Radar de Apertura Sintética-

INSAR, se obtuvieron del Proyecto Copérnico Open Access Hub y del Alaska Satélite Facility. Figura 8.

### Figura 8

*Delimitación de la zona.*



*Nota.* Delimitación de la zona de estudio para la obtención de las imágenes Sentinel 1 en Copernicus Open Access Hub. Fuente: ASF Alaska Satellite Facility 2021.

Las especificaciones de las imágenes es la siguiente con respecto a los resultados de la búsqueda, con imágenes satelitales de acuerdo a la zona de estudio: Tabla 3.

**Tabla 3**

*Especificaciones.*

---

N°	Especificaciones
1	S1A_IW_SLC__1SSV_20160210T233638_20160210T233705_009890_00E805_A76C
2	S1A_IW_SLC__1SSV_20160224T110032_20160224T110100_010087_00EDCD_C1B
3	S1A_IW_SLC__1SSV_20160305T233642_20160305T233709_010240_00F21B_7186
4	S1A_IW_SLC__1SSV_20160319T110032_20160319T110100_010437_00F7B1_08D8
5	S1A_IW_SLC__1SSV_20160329T233642_20160329T233709_010590_00FC19_B0D1
6	S1A_IW_SLC__1SSV_20160412T110033_20160412T110101_010787_0101F2_F95A
7	S1A_IW_SLC__1SSV_20160424T110052_20160424T110119_010962_010747_782F.zip
8	S1A_IW_SLC__1SSV_20160210T233638_20160210T233705_009890_00E805_A76C
9	S1A_IW_SLC__1SSV_20160422T233643_20160422T233710_010940_010698_3C55
10	S1A_IW_SLC__1SSV_20160424T110052_20160424T110119_010962_010747_782F

---

**Nota.** Obtención de resultados de búsquedas referentes al lugar de estudio mediante la utilización de la herramienta ASF Data Search. **Fuente:** Camacho, J. 2022

Una descripción breve de este tipo imágenes Sentinel 1 SLC se presenta a continuación:

Los productos de nivel 1 Single Look Complex (SLC) utilizados en este estudio, son imágenes en el rango inclinado por el plano de imágenes de azimut, en el plano de imagen de la adquisición de datos satelitales.

Cada píxel de la imagen está representado por un valor de magnitud complejo (I y Q) y, por lo tanto, contiene información de amplitud y fase. Cada valor de I y Q es de 16 bits por píxel. El procesamiento de todos los productos SLC da como resultado una sola mirada en cada dimensión utilizando el ancho de banda de señal completa disponible.

Las imágenes están georreferenciadas utilizando datos de órbita y altitud del satélite basado en un Modelo Digital de Elevaciones-MDE obtenido de sitios públicos (SRTM) o de levantamiento propio.

Las imágenes SLC se producen en una geometría Doppler cero. Esta convención es común con los productos de rango inclinado estándar disponible de otros sensores SAR.

Los productos SM SLC contienen una imagen por canal de polarización (es decir, una o dos imágenes) y se muestrean con el espaciado natural de píxeles. Esto significa que el espaciado de píxeles se determina, en azimut por la frecuencia de repetición de pulsos (PRF), y en rango por la frecuencia de muestreo del rango del radar.

Las imágenes y el análisis de deformaciones del relieve topográfico, en esta investigación fueron tomadas en febrero de 2016 antes del sismo del 16 de abril de 2016 y en abril 24 de 2016, 6 días después del sismo que destruyó parte de la costa de la provincia de Manabí.

Con esto, se demostró que el análisis INSAR en combinación con las otras dos metodologías, es una manera de anticiparse a los movimientos en masa provocados por sismos mayores como el ocurrido el 16 de abril de 2016 (sismo 16A), que provocó varios deslizamientos en los taludes, ocasionó subsidencias y levantamientos del terreno como en Manta, Portoviejo, Pedernales y otros sectores con pérdida ingente de sistemas socioeconómicos y de vidas humanas. Esto es lo que Cando, M 2019, llama Previsión, un paso antes de la ocurrencia de un desastre.

El método INSAR y las técnicas derivadas de Interferometría Diferencial, tienen la capacidad de detectar deformaciones diminutas del relieve con precisión milimétrica utilizando datos del Radar de Apertura Sintética-SAR de microondas. En este estudio se ha utilizado la metodología INSAR para determinar este tipo de deformación en mm/año, como herramienta ideal para monitorear el hundimiento del relieve topográfico en grandes áreas y por períodos de tiempo prolongados, con una alta precisión de unos pocos milímetros a centímetros por kilómetro cuadrado.

Como se indicó anteriormente, se utilizaron imágenes centinela en la banda C para determinar la deformación y el desplazamiento acumulado durante un período de febrero 106 a abril de 2016 antes y después del sismo del 16 de abril de 2016, período en el que se produjeron varios hundimientos en las zonas costeras.

El Sistema de Radar de Apertura Sintética-SAR, permite la obtención de imágenes de reflectividad del suelo, las que procesadas por técnicas INSAR (Interferometría de Rada de Apertura Sintética), se obtienen mapas precisos de deformación del relieve.

La tecnología (INSAR) o Interferometría SAR es la técnica que se basa en el estudio del patrón de interferencia de fase de las ondas de dos imágenes SAR (Sentinel 1) para generar mapas de desplazamientos del relieve topográfico en mm/año y modelos digitales de elevación del terreno.

Con esta técnica es posible determinar desplazamientos del relieve de grandes extensiones, sin necesidad de mediciones de campo y a bajo costo.

Esta técnica también puede proporcionar información para comprender la evolución geomorfológica de un área de estudio.

Una antena de apertura sintética o virtual consiste en un vector de señales de radar sucesivas y consistentes que son transmitidas y recibidas por una pequeña antena que se mueve a lo largo de una determinada trayectoria de vuelo u órbita.

El procesamiento de la señal utiliza las magnitudes y fases (desplazamiento vertical de un punto tomado en dos épocas distintas) de la señal recibida en pulsos sucesivos para crear una imagen.

A partir de la diferencia de fase, los datos obtenidos son las distancias entre el satélite y la superficie terrestre, calculadas mediante la medición de tiempos y retrasos. Las principales plataformas que utilizan Radar Synthetic Aperture se muestran en la Tabla 4

**Tabla 4**  
*Resolución.*

<b>Satellite</b>	<b>Band</b>	<b>Acquisition mode</b>	<b>Nominal pixel dimensiones: ground range x azimuth (m)</b>	<b>Repeat cycle (day)</b>
ERS-1 & ERS-2	C	Standar Beam	20x4	35
Envisat	C	Standar Beam	20x4	35
Radarsat-1	C	Standar Beam	20x5	24
Radarsat-1	C	Fine Beam	10x5	24
Radarsat-2	C	Standard Beam	20x5	24
Radarsat-2	C	Fine Beam	10x5	24
Radarsat-2	C	Ultra Fine Beam	3x3	24
TerraSAR-X	X	Standard	3x3	11
TerraSAR-X	X	Spotlight	1.5x1.5	11
Cosmo SkyMed	X	Standard	3x3	16(8)
Cosmo SkyMed	X	Spotlight	1.5x1.5	16(8)
ALLOS PALSAR	L	Fine Beam	10x5	46

**Nota.** En la tabla 4 podemos visualizar la resolución de imágenes satelitales del área de estudio. **Fuente:** Camacho, J. 2022

A lo largo de cada una de las posiciones de antena se transmitirá una ráfaga de medidas (Burst). Dado que los sistemas SAR son coherentes, en cada posición diferente de antena se almacenará la información correspondiente a amplitud y fase de los ecos recibidos. Combinando dicha información se puede “alargar” virtualmente la longitud de la antena.

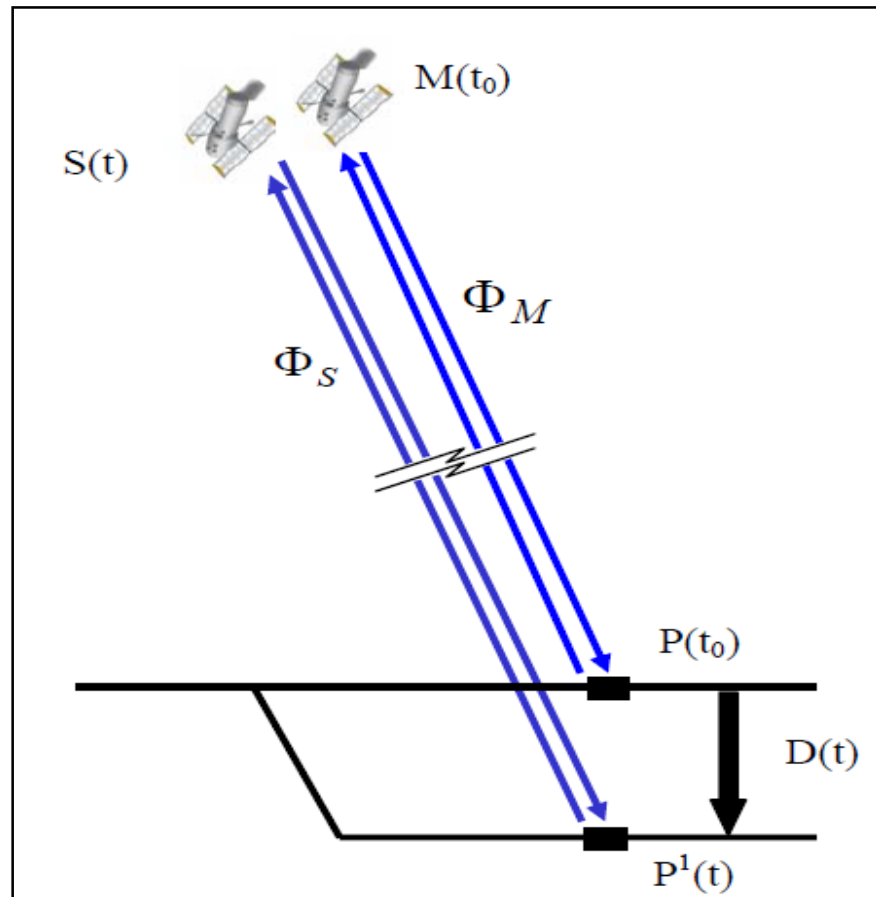
El concepto básico del proceso de Interferometría Diferencial parte del siguiente principio “Si al menos dos observaciones de la posición de un mismo sitio se obtienen desde el espacio en diferentes momentos, la "Fase Interferométrica", es



directamente proporcional a cualquier cambio en el rango de las características topográficas del relieve”.

**Figura 9**

*Diagrama de desplazamiento.*



**Nota.** Diagrama de desplazamiento del relieve topográfico y cambio de fase de la señal de radar. **Fuente:** Crosetto, M. 2021.

En la Figura 9, se presenta un esquema de la disposición espacial de los satélites para la adquisición de un Interferograma, para lo que se ha seguido lo que M. Crosetto et al., Describe sobre los principios básicos de la Interferometría a partir del Radar de Apertura Sintética-SAR.

En el tiempo  $t_0$ , el sensor obtiene una primera imagen SAR, midiendo la fase  $\Phi_M$  (ecuación 1), esta imagen se llama Máster, M. Si la deformación del relieve topográfico ocurre,  $D$ , durante un tiempo  $t_1$ , el punto  $P$  se mueve a  $P_1$ .

Posteriormente, el satélite obtiene una segunda imagen en el tiempo  $t_1$ , y mide la fase  $\Phi_S$ . Esta imagen se llama Esclava, S. La técnica INSAR calcula la diferencia de fase entre  $\Phi_S$  y  $\Phi_M$ , una diferencia llamada Fase Interferométrica  $\Delta\Phi_{Int}$ .

$$\Delta\Phi_{Int} = \Phi_S - \Phi_M \text{ (ecuación 1)}$$

Esta Fase Interferométrica en mm/año, representa la subsidencia o levantamiento del relieve topográfico en el área de estudio en dos épocas distintas mediante dos imágenes o una pila de imágenes como en esta investigación, y puede ser aplicada en grandes áreas como en este caso dentro del periodo desde el 10/02/2016 al 24/04/2016, con una alta precisión de unos pocos milímetros a centímetros por km<sup>2</sup>.

Para el estudio de subsidencias y levantamientos del relieve topográfico en la vía, se procesó una serie de tiempo de las 9 imágenes generando interferogramas en la banda C, banda que tiene un rango de frecuencia nominal, de 8 a 4 GHz (3,75 a 7,5 cm de longitud de onda) dentro de la porción de microondas (radar) del espectro electromagnético. Los radares de formación de imágenes equipados con banda C generalmente no se ven obstaculizados por los efectos atmosféricos y son capaces de obtener imágenes a través de nubes tropicales y lluvias.

Su capacidad de penetración con respecto a las copas de los árboles o los suelos es limitada y está restringida a las capas superiores pero es importante por su alta sensibilidad a la rugosidad de la superficie del suelo y la pendiente, por lo tanto se pueden extraer parámetros Morfométricos como curvaturas, convergencias y otros índices para relacionarlos con controles de deformación estructurales sismo-geológico-tectónicos y de erosión con lo que, en áreas con poca vegetación, las unidades geológicas-geomorfológicas pueden ser separadas por juntas estructurales por cambios en la rugosidad de la superficie.

Los resultados se verificaron en aquellos sitios de la vía que se han hundido o se han levantado por cambios en corrientes de agua subterráneas y/o discontinuidades geomorfológicas superficiales activadas por procesos geodinámicas subterráneos. Los deslizamientos por corte en la vía no son

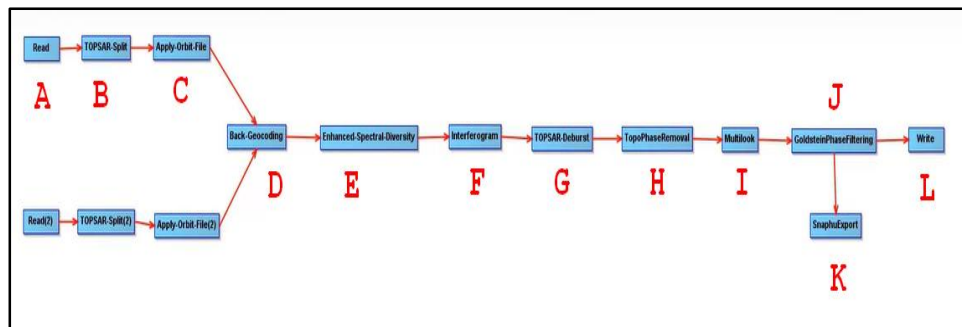
considerados como de origen natural por lo que no se han incluido dentro del inventario de movimientos en masa.

A continuación, se presenta un resumen para la obtención de la deformación del relieve mediante el Interferograma.

El análisis de las deformaciones del relieve se realizó en base del su flujo de procesos de la Figura 10, utilizando el software Plataforma de Aplicaciones SentiNel- SNAP de la Agencia Espacial Europea-ESA.

**Figura 3**

*Aplicación.*



**Nota.** Diagrama de desplazamiento del relieve topográfico y cambio de fase de la señal de radar. **Fuente:** Camacho, J. 2022

**A.- Read: Abrir todos los archivos zip**

El siguiente proceso se realizó en pares tomando la imagen más antigua como la imagen máster:

- (S1A\_IW\_SLC\_\_1SSV\_20160210T233638\_20160210T233705\_009890\_00E805\_A76C) y las demás imágenes como esclavas.

Por lo tanto, existieron 8 pares que generaron 8 interferogramas.

Posteriormente se realizó un Stack o apilamiento de los resultados para determinar el desplazamiento total del relieve topográfico en la vía en ese periodo de tiempo.

### **A.1. File / Open Product**

- S1A\_IW\_SLC\_\_1SSV\_20160210T233638\_20160210T233705\_009890\_00E805\_A76C
- S1A\_IW\_SLC\_\_1SSV\_20160412T110033\_20160412T110101\_010787\_0101F2\_3AF7
- S1A\_IW\_SLC\_\_1SSV\_20160224T110032\_20160224T110100\_010087\_00EDCD\_C14B
- S1A\_IW\_SLC\_\_1SSV\_20160305T233642\_20160305T233709\_010240\_00F21B\_7186
- S1A\_IW\_SLC\_\_1SSV\_20160319T110032\_20160319T110100\_010437\_00F7B1\_08D8
- S1A\_IW\_SLC\_\_1SSV\_20160329T233642\_20160329T233709\_010590\_00FC19\_B0D1
- S1A\_IW\_SLC\_\_1SSV\_20160412T110033\_20160412T110101\_010787\_0101F2\_F95A
- S1A\_IW\_SLC\_\_1SSV\_20160422T233643\_20160422T233710\_010940\_010698\_3C55
- S1A\_IW\_SLC\_\_1SSV\_20160424T110052\_20160424T110119\_010962\_010747\_782F

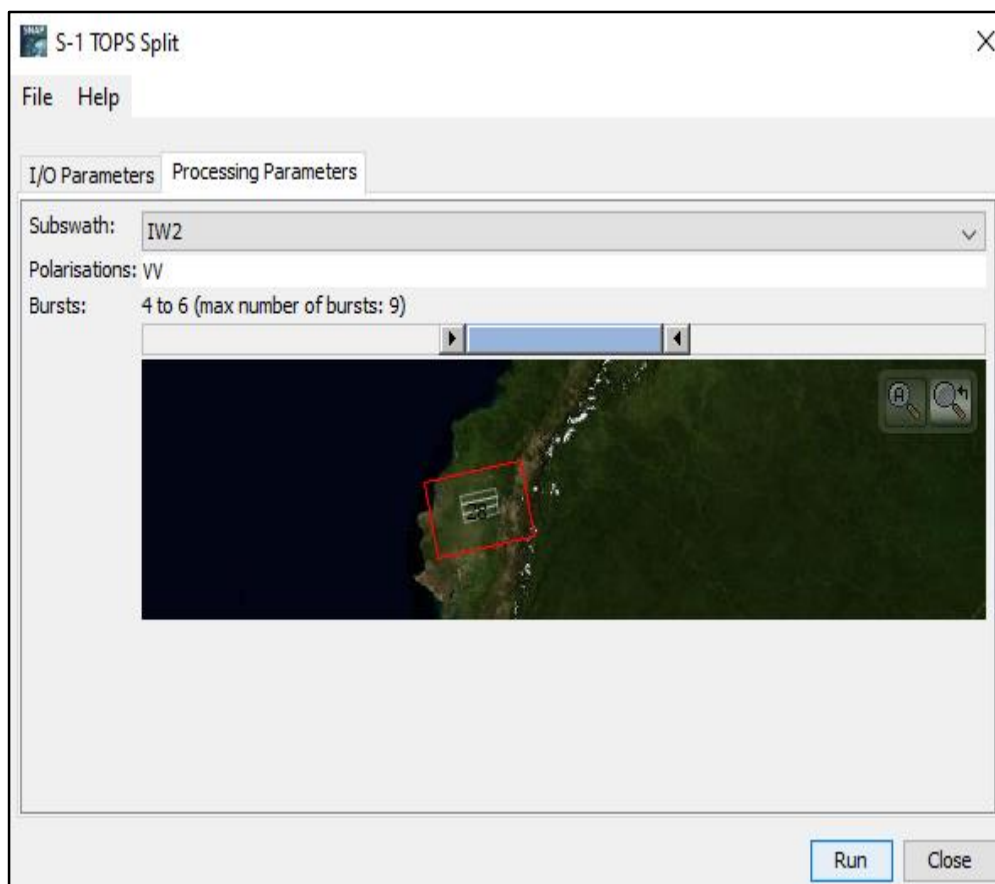
### **B.- Reprocesamiento TOPSAR-Split**

Para cada par de imágenes, tomando la más antigua como imagen máster, se seleccionó la secuencia: Radar---Sentinel-1 TOPS---S1TOPS Split. Figura 11.

Esto permitió en corregirlo de las imágenes, dentro de la misma franja de estudio o sub-swath (existen tres franjas o sub-swath, IW1, IW2 e IW3) que en este caso se escogió la IW2 por que abarca toda el área de la vía. Se escogió y el número de burst (cada sub-swath es conformado por nueve bursts) que cubren el área de estudio que en este caso se escogió de la polarización de la onda emitida VV.

## Figura 4

Plataforma de aplicación.



**Nota.** Plataforma de aplicación Sentinel-SNAP de ESA, procedimiento para obtener el corre gistro de las imágenes, dentro de la misma franja de estudio.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

### C.- Apply Orbit File.

Esta opción permitió obtener datos precisos de las órbitas de los satélites que se descargan automáticamente de ESA. Secuencia: Apply-Orbit-File.

### D.- Back Geocoding.

Esta opción permitió obtener un Modelo Digital de Elevaciones para realizar un re muestreo de las imágenes y realizar el corregirlo en base de un modelo de cotas de referencia básicas para el análisis de deformación del relieve topográfico. Secuencia: Radar-Coregistration-S1 Tops Coregistration-S1 Back Geocoding.

### **E. - Enhanced Spectral Diversity.**

Esta opción permitió obtener una mayor precisión de coregistro de las imágenes en función de la diversidad espectral de los objetos reflejados. Secuencia: Radar-Coregistration-S1 Tops Coregistration-S1 Enhanced Spectral Diversity

### **F.- Generación del Interferograma.**

En base de las configuraciones anteriores, SNAP calculó el Interferograma y aplica la corrección por la curvatura de la Tierra en función del Modelo Digital de Elevaciones- MDE. Secuencia: Radar-Interferometric-Products-Interferogram Formation.

### **G.- Topsar Deburst.**

Esta opción eliminó las líneas entre ráfagas (burst) para dejar la imagen continua. Secuencia: Radar-Sentinel-1 Tops-S1 Tops Deburst.

### **H.- Topo Phase Removal.**

Esta opción permitió generar el Interferograma Diferencial mediante la sustracción de la topografía obtenida de Modelo Digital de Elevaciones de la zona de estudio (zonas de subsidencia y levantamiento del relieve independiente del MDE). Secuencia: Radar-Interferometría -Products-Topographic-Phase-Removal

### **I.- Multilook.**

Esta opción obtuvo un promedio de las respuestas espectrales de los pixels para mejorar la calidad de la imagen SAR al reducir el moteado (sal y pimienta) y adquirir un píxel cuadrado en la imagen de salida, ya sea en el rango o en la dirección del azimut o en ambas direcciones. Las líneas posteriores se promedian para obtener una mejor imagen de respuesta. Secuencia: Radar-Sar Utilities-Multilooking

## J.- Goldstein Phase Filtering.

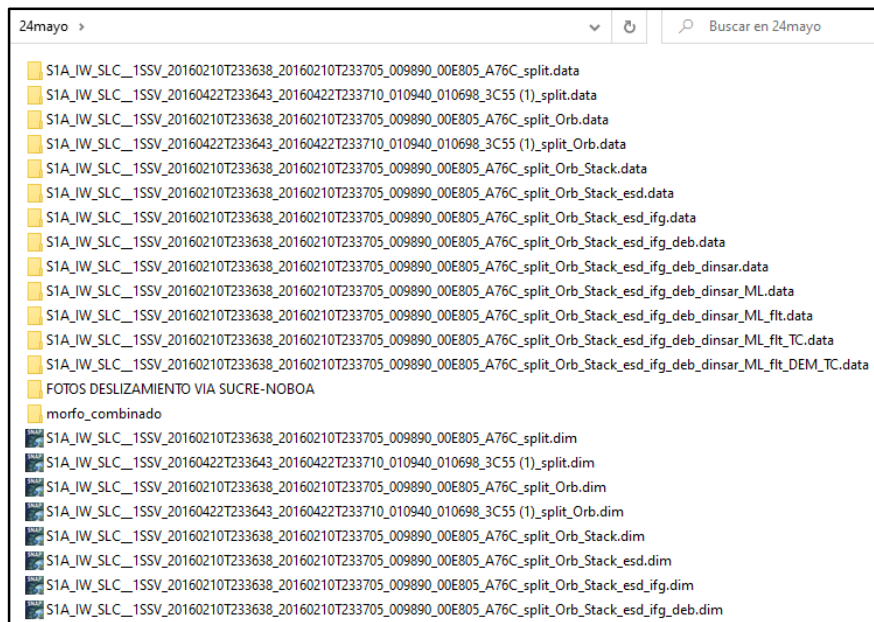
Esta opción se utiliza para suprimir el ruido de Fase conservando los bordes de las franjas (burst) para generar el interferograma filtrado, minimizando la pérdida de señal y reduciendo el nivel de ruido. Secuencia: Radar-Interferometric-Fitering-Goldstein Phase Filtering.

## k- Write

Esta opción, permitió escribir cada uno de las opciones (A-K) en archivos temporales de procesamiento hasta el resultado final como se ve en la Figura 12.

## Figura 5

*Archivos de salida.*



**Nota.** Archivos de salida obtenidos de cada opción del procesamiento en SNAP.

**Fuente:** ESA 20.

Los rangos topográficos de subsidencia/levantamientos del relieve en comparación entre la imagen máster del 2016-02-21 y las imágenes esclavas hasta el 2016-04-22 se pueden ver en la Figura 13.

### 3.4.Procedimiento 2

Obtención de Índices Morfométricos utilizando SAGA GIS. (Cando, M, 2019).

La importancia de realizar modelos de flujo de masa como aluviones es el objetivo de este procedimiento y sus resultados permitirán direccionar acciones importantes para mantener la vía en servicio para la población. Se utilizó un Modelo de Elevación Digital MED de 12.5 m de resolución espacial. Figura 13.

**Figura 6**

Rangos topográficos.

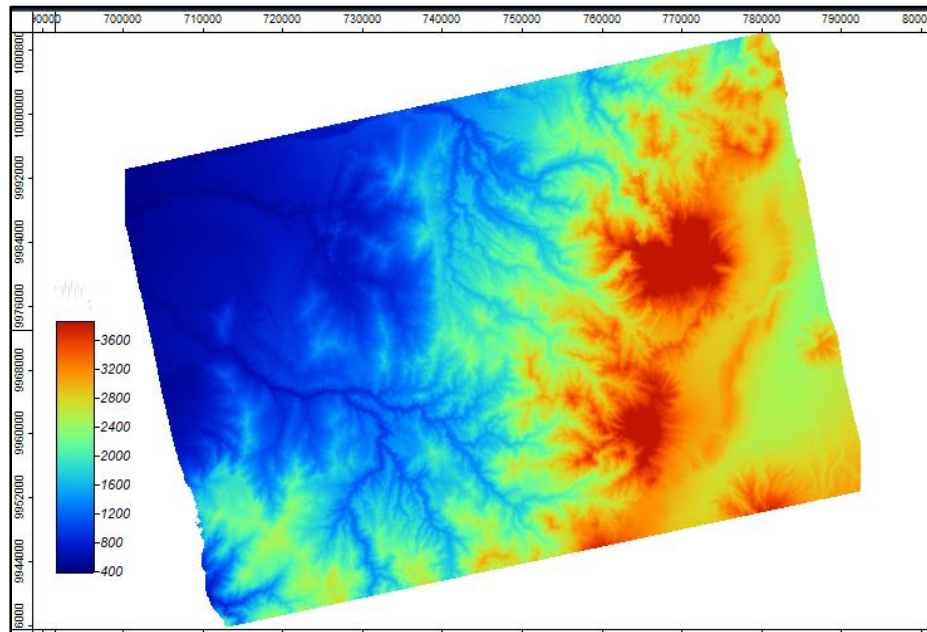


*Nota.* Rangos topográficos de subsidencia/levantamientos del relieve por Interferometría Diferencial. **Elaborado por:** Camacho, J. 2022



## Figura 14

Modelo Digital.



**Nota.** Modelo Digital de Elevaciones MDE de 12.5 m de resolución espacial de la Agencia Espacial Europea-Vertex Alaska. **Fuente:** Camacho, J. 2022

Este Modelo ha servido para mejorar la trayectoria de los flujos de masa que provocan zonas inundables y contribuyen a aumentar la fuerza con la que viajan los aluviones, en base de la extracción de Parámetros e Índices Morfométricos como la acumulación y Dirección de Flujo de la escorrentía superficial del agua de precipitación (FCC), el Índice de Humedad Topográfica (TWI) y la Longitud-Magnitud de la Pendiente (LS).

Parámetros e índices que permitieron ubicar espacialmente las rutas secundarias de aporte y embalsamiento de flujos de agua en zonas de intersección de drenajes, determinar la capacidad de embalsamiento de flujos acumulados de escorrentía superficial y la pérdida potencial del suelo por procesos de erosión como iniciadores de movimientos en masa en función de la longitud y magnitud de la pendiente.

El software utilizado para obtener estos parámetros e índices fue el System for Automated Geoscientific Analysis (SAGA).

Los Índices Morfométricos principales estudiados, como se indicó anteriormente, fueron los siguientes:

### **Índice Dirección y Acumulación de Flujo-FACC.**

La Acumulación y Dirección de Flujo de la Escorrentía Superficial del agua de precipitación, se calculó como el área de contribución ascendente (captación) utilizando el modelo hidrológico D8.

El resultado es un ráster de flujo acumulado para cada celda, determinada por la acumulación del peso de todas las celdas que fluyen hacia cada celda sifón del Modelo Digital de Elevaciones-MDE con pendiente descendente o utilizando la línea de Máxima Pendiente. El flujo acumulado se basa en el número total de celdas, o una fracción de ellas que fluye a cada celda en el ráster de salida (sifón).

En la Figura 15 se pueden ver la Dirección y Acumulación de flujo de la escorrentía de agua de precipitación en los márgenes de cauces y quebradas capaces de producir erosión intensa, márgenes que deben mantener su vegetación original o deberán ser reforestadas.

Los valores más altos (tendencia al color blanco intenso) representan mayores acumulaciones de flujo y áreas de flujo concentrado que pueden usarse para identificar canales de cursos de agua de llenado rápido y rutas de aluviones.

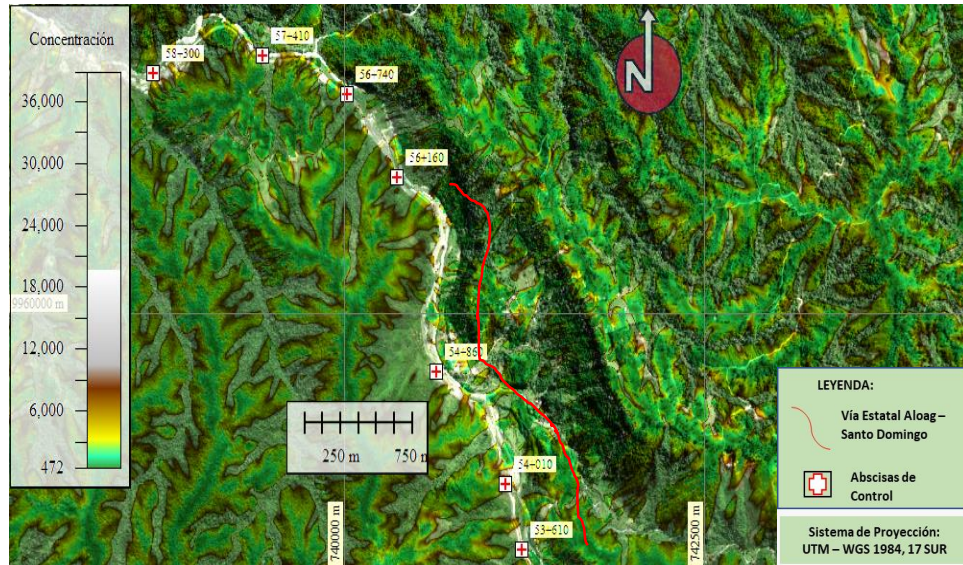
En la Figura 16, se puede ver un bloque diagrama de una retícula de celdas de altura de un Modelo Digital de Elevaciones-MED.

A partir de este bloque se puede explicar de manera rápida el funcionamiento del Modelo Hidrológico D8:

Las líneas de acumulación y dirección de flujo de la escorrentía del agua precipitada, empieza en la zona alta de la malla del relieve, y a partir de la celda con cota más alta, en función de la Línea de Máxima Pendiente, traza un vector de dirección de flujo y calcula cuantas celdas concurren o acumulan agua en esa celda.

**Figura 15**

*Dirección y acumulación de flujo*



**Nota.** SAGA GIS. Dirección y Acumulación de Flujo-FACC. Los valores más altos (tendencia al color azul intenso) representan mayores acumulaciones de flujo de escorrentía capaces de generar aluviones. **Fuente:** Camacho, J. 2022

Por ejemplo, en referencia al gráfico de la Figura 15, en donde las celdas (b, 4) es la que tiene la cota más baja de la malla (empezando por las filas superior en las celdas (a, 1... d, 1), todas las celdas superiores tendrán un valor de acumulación de flujo de 1 ya que solo ellas son acumuladores, siendo (b, 1) la celda con la cota más alta.

Las celdas (a, 2...d, 2), tendrán la dirección de flujo hacia las celdas de cotas menores y pendientes máximas y un valor de acumulación de 2 ya que acumulan agua tanto de las celdas (a, 1...d, 1), como de las propias celdas, siendo la celda (b, 2) la de más baja cota en esa fila por lo que tiene un comportamiento de sifón. En la fila (a, 3...d, 3), la dirección de flujo de la columna (a, 1...a, 4) se corta en (a, 3) ya que (a, 4) está en cota más alta que (a, 3) por lo que el flujo se dirige hacia (b, 3) que es la celda de cota más baja en esa fila. Los valores de acumulación de flujo en (a, 3) es 3, ya que es la suma de los valores de (a, 1) +(a, 2) +(a, 3). En (b,3) será igual a 6 ya que es resultado de (a,1) +(a,2) +(a,3) +(b,2) +(b,2) +(b,3).

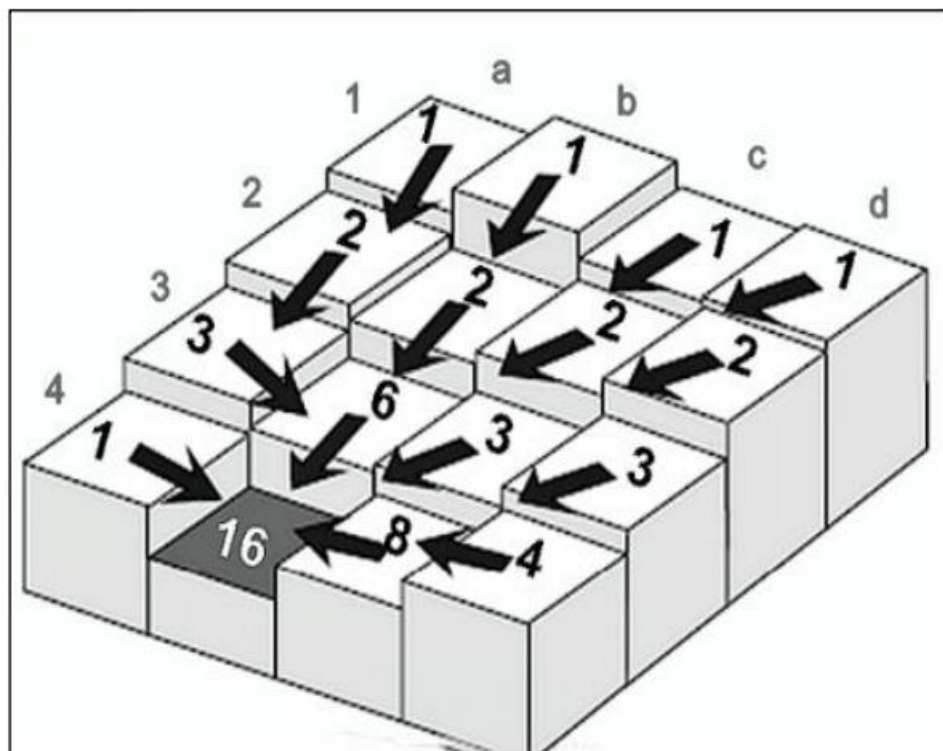
La celda (a, 4) más alta que (a, 3) dirigirá el flujo hacia el sifón (b, 4) continuo.

En las celdas de columna (c,1...c,4) más altas que las celdas de la columna (b,1...b,4), la dirección de flujo se dirigirá hacia (c,4) la celda más alta en esa columna, celda que recibirá el flujo de agua que viene de la columna (d,1...d,4) columna más alta que la (c,1...c,4) por lo que en la celda (c,4) se acumulará el flujo de 8 celdas incluida ella misma de esta manera: (c,1...c,4) +(d,1...d,4).

Finalmente, en la celda sifón (b,4) confluirán todas las celdas (a,1...a,4) +(b,1...b,4) +(c,1...c,4) +(d,1...d,4) obteniéndose un valor de 16 celdas que se acumulan o fluyen hacia dicha celda.

**Figura 16**

*Bloque, diagrama de un modelo digital*



**Nota.** Bloque diagrama de un Modelo Digital de Elevaciones y funcionamiento del Modelo Hidrológico D8 a partir de las cotas más altas para determinar la Dirección y Acumulación del Flujo de la Escorrentía Superficial del agua de precipitación. Modificado de Jenson et al., 1988. **Fuente:** Cando M, 2019.

- **Índice de Humedad Topográfica-TWI.**

El Índice de Humedad Topográfica-TWI modela la dinámica de los flujos superficiales y subterráneos basándose en el control topográfico de la escorrentía que ofrece una mejor perspectiva en relación con la predicción de los sitios donde la saturación y la alta concentración de escorrentía pueden actuar como embalses y rutas de flujo iniciales de aluviones con proyección hacia procesos mayores de inundación. Figura16.

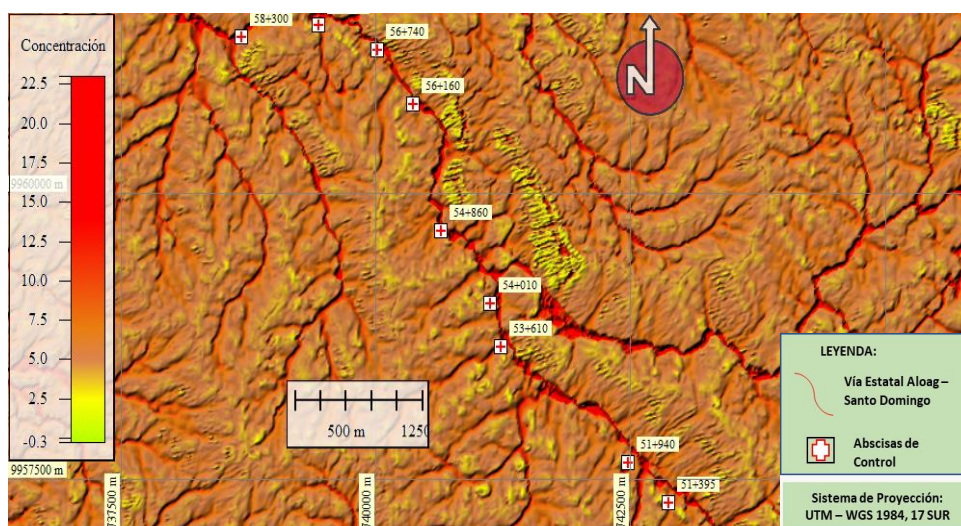
El TWI combina la contribución a la escorrentía de un área local drenada y su pendiente, y se usa comúnmente para cuantificar el control topográfico en procesos hidrológicos y se define como:

$$\text{TWI} = \text{Ln} (af/\tan \beta) \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde **af** es el área local drenada para un punto de cálculo, y **tan β** es la pendiente direccional de la celda de interés (y de los ocho vecinos en el caso de utilizar un algoritmo D8). **Ln** es logaritmo natural.

**Figura 17**

*Índice de humedad*



**Nota.** Índice de Humedad Topográfica-TWI, en la zona de estudio km 43 al km 56. **Fuente:** Camacho, J. 2022

Los valores más altos con tendencia al color rojo, representan depresiones y geoformas capaces de acumular agua, formar flujos-guías de agua, quebradas y quebradillas. Los valores más bajos con tendencia al color amarillo, representan crestas y pequeñas divisorias de aguas en las facetas geomorfológicas desde nacen los flujos de agua que se depositan en las partes bajas.

- **Índice Longitud y Magnitud de la Pendiente-LS.**

Conociendo la dirección y el área de acumulación de flujo o área de captación específica obtenidos del Modelo Hidrológico D8 y el Índice de Humedad Topográfica, el factor LS determina el potencial de erosión del suelo por acción de la escorrentía superficial. El factor L da el impacto de la longitud de la pendiente, mientras que el factor S explica el efecto de la inclinación de la pendiente.

El cálculo del índice de longitud de pendiente (LS) es utilizado por la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), basado originalmente en la pendiente y el área de captación específica. El Índice LS es adimensional, con valores iguales y mayores que 0.

Para calcular este El programa SAGA calcula el Índice LS utilizando los algoritmos propuestos por Desmet y Govers (1996), algoritmo dentro del que la Longitud de la Pendiente, L, calcula el efecto de la longitud de la pendiente sobre la erosión, y el componente magnitud de la pendiente, S, calcula el efecto de la pendiente sobre la erosión.

Wischmeier y Smith (1978), definieron el factor L como la relación entre la pérdida de suelo de la longitud de una pendiente horizontal y la pérdida correspondiente de la longitud de la pendiente de una parcela unitaria (22,13 m).

De acuerdo con esta definición, la longitud de la pendiente es la distancia desde el punto de origen del flujo terrestre hasta el punto donde el gradiente de la pendiente disminuye lo suficiente como para que comience la deposición o que las aguas de escorrentía fluyan hacia un canal. Según esta simple definición, el factor L se puede representar como:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m \quad (\text{ecuación 2})$$

En donde  $\lambda$  es la longitud de la pendiente en metros y  $m$  es equivalente a 0,5 para pendientes superiores al 5%, 0,4 para pendientes entre 3% –4%, 0,3 para pendientes entre 1% –3% y 0,2 para pendientes inferiores al 1%.

En este estudio, para calcular el factor magnitud de la pendiente  $S$ , se adoptó el algoritmo de Renard y col. (1997) en RUSLE para la estimación del factor  $S$  basada en el gradiente de pendiente:

$$S = 10,8 \times \sin(^\circ) + 0,03, \text{ donde gradiente de pendiente } < 0,09 \quad (\text{ecuación 3})$$

$$S = 16,8 \times \sin(^\circ) - 0,5, \text{ donde gradiente de pendiente } \geq 0,09 \quad (\text{ecuación 4})$$

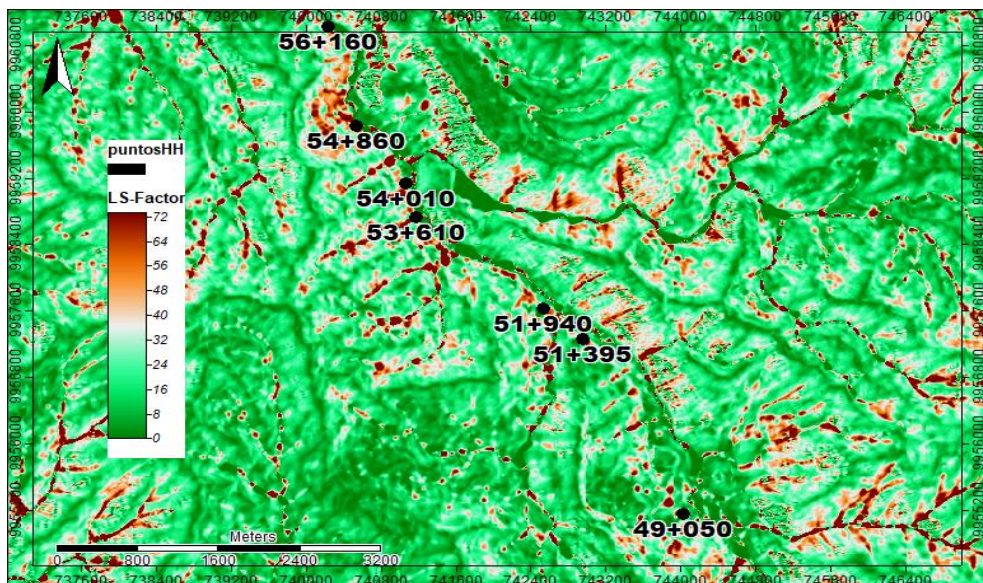
4)

Donde ( $^\circ$ ) es el gradiente de pendiente en grados.

Los valores más altos de color hacia el café oscuro representan una mayor susceptibilidad a la erosión. Figura 18.

### Figura 18

*Longitud y Magnitud de la Pendiente-LS.*



**Nota.** SAGA GIS. Longitud y Magnitud de la Pendiente-LS. Valores más altos con tendencia al color café oscuro representan zonas de mayor erosión. **Fuente:** Camacho, J. 2022

### 3.5.Procedimiento 3

Determinación del Índice de estabilidad utilizando el software SHALSTAB en base de la teoría Mohr-Coulomb. (Cando, M. 2019).

Este procedimiento, realizó el análisis de estabilidad de los taludes de los márgenes de quebradas y zonas cercanas a la vía, para definir áreas potenciales de generación de coluviones a través de procesos de erosión y eliminación masiva del suelo que pueden acumularse en el cauce y producir embalses artificiales.

El programa Shallow Slope Stability-SHALSTAB fue utilizado para mapear terrenos inestables poco profundos, combinando las características de flujo estacionario del subsuelo (flujo de agua que se mueve a poca profundidad debajo de la superficie del suelo con una velocidad constante, considerando la relación morfología-hidrología.

El software de susceptibilidad por deslizamientos de tierra poco profundos Shallow Slope Stability-SHALSTAB, se basa en la teoría Mhor-Coulomb y sus parámetros: grado de saturación interna del suelo ( $h/z$ ) y precipitación efectiva ( $q/T$ ), parámetros necesarios para desestabilizar una ladera. En base a esa relación, SHALSTAB utiliza dos tipos de modelos numéricos para determinar zonas inestables: el modelo de estabilidad de taludes y el modelo hidrológico.

El modelo de estabilidad de taludes utilizado por SHALSTAB, está basado en la teoría del talud infinito, que simula el grado de estabilidad de una determinada porción del suelo localizada sobre el afloramiento rocoso. Puede ser representado por la siguiente ecuación: Ecuación (5).

$$\frac{h}{z} = \frac{c}{\rho_w g z \cos\theta \tan\theta} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left[ 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right] \quad (\text{ecuación 5})$$

En donde  $h$  es la altura de la columna de agua en el subsuelo (m);  $z$  es el espesor del suelo (m);  $c$  es la Cohesión del suelo (kpa);  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $\text{cm/s}^2$ );  $\rho_s$  y  $\rho_w$  son las densidades del suelo y de la columna de agua respectivamente ( $\text{kg/m}^3$ );  $\phi$  es el ángulo de fricción interna de la masa del suelo (grados) y  $\theta$  es el ángulo del talud natural del terreno (grados).



Este modelo supone, por lo tanto, que las resistencias al movimiento a lo largo de los lados y extremos del deslizamiento de tierra no son significativas.

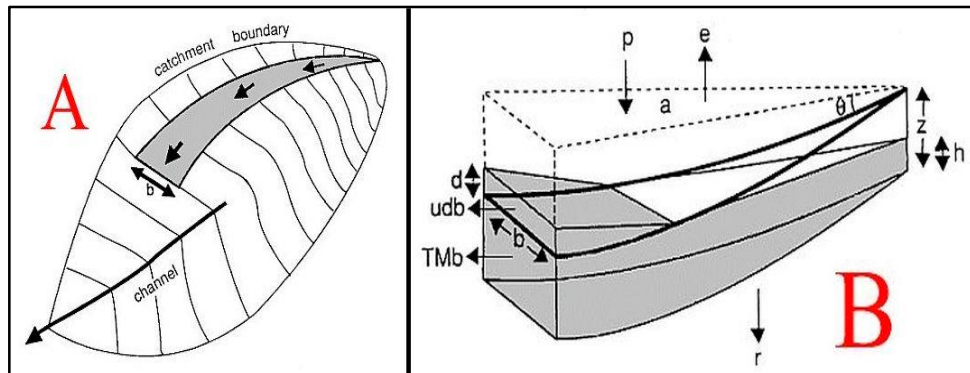
El modelo hidrológico determina la relación entre la concentración de agua y la transividad del suelo para determinar la condición de saturación. Este modelo puede ser expresado a partir de la ecuación 6:

$$W = \frac{Q}{T} \frac{a}{b \sin \theta} \quad (\text{ecuación 6})$$

Dónde: W representa el Índice de Humedad del suelo, que puede ser dado también en función de la razón h (grosor capa de suelo)/z (altura de la columna de agua en el subsuelo); Q es la intensidad de la lluvia (mm); T es la Transividad del suelo (m<sup>2</sup>/día), es decir, el producto entre la conductividad hidráulica saturada y el grosor del suelo; a es el área de contribución o el área drenada dado en m<sup>2</sup>; b es el largo de contorno unitario (resolución de la grilla dado en m) y  $\theta$  es la pendiente local medida en grados.

La disposición geométrica de este modelo y sus relaciones hidrológicas se puede ver en la Figura 19, en donde p: precipitación; e: evapotranspiración; r: drenaje profundo; q: lluvia efectiva (q=p-e-r); h: profundidad vertical del flujo superficial saturado; z: profundidad vertical del plano de falla-deslizamiento que generalmente es un sello arcilloso T: transividad; M: sin  $\theta$ ;  $\theta$  ángulo de la pendiente natural del terreno. Modelo teórico base aplicado en Mettma Ridgestudy 1999).

**Figura 19**  
Modelo Hidrológico



**Nota.** Bosquejo del modelo hidrológico: (A) vista en planta y (B) sección transversal de un área de drenaje a lo largo de un contorno de longitud  $b$ . **Fuente:** Diez Herrero, 2018.

El análisis de la estabilidad en las laderas a lo largo de la vía con SHALSTAB, mediante la relación  $Q/T$ , intensidad de la precipitación,  $Q$ , en relación con la capacidad del subsuelo para transmitir agua a lo largo de las laderas  $T$  (Transitividad) determinó que, cuánto cuanto mayor sea  $Q$  en relación con  $T$ , más probable será que el suelo esté saturado y mayor será el número de sitios con pendientes inestables. Esta relación utilizó la clasificación de píxeles con valores positivos estables a valores casi estables y crónicamente inestables con valores negativos de acuerdo con las 7 clases de estabilidad que aporta SHALSTAB ilustradas en la Tabla 5.

**Tabla 5***Estabilidad*

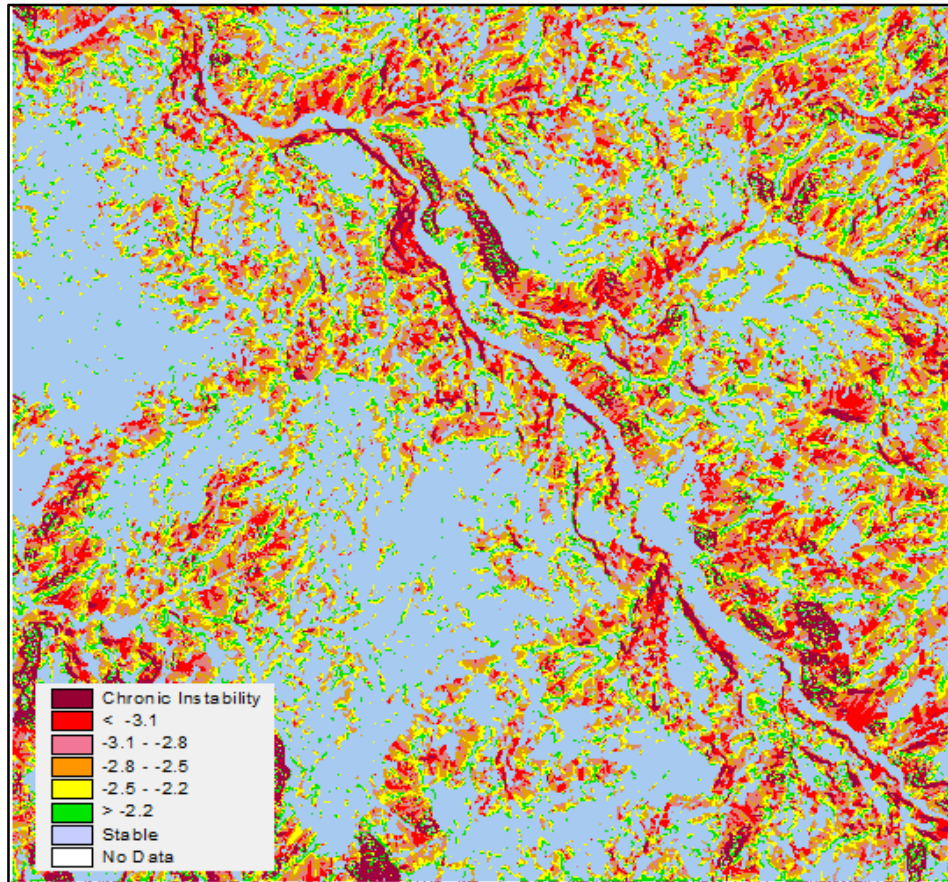
<b>Clases SHALSTAB</b>	<b>Interpretación de las clases</b>
Inestabilidad crónica	Incondicionalmente inestable y saturado
$\text{Log } Q/T -1 < -3,1$	Incondicionalmente inestable insaturado
$3,1 < \text{Log } Q/T -1 < -2,8$	Inestable y saturado
$-2,8 < \text{Log } Q/T -1 < -2,5$	Inestable e insaturado
$-2,5 < \text{Log } Q/T -1 < -2,2$	Estable e insaturado
$\text{Log } Q/T -1 > -2,2$	Incondicionalmente estable e insaturado
Stable	Incondicionalmente estable y saturado

**Nota.** Clases de estabilidad obtenidas con SHASTAB e interpretación de las clases obtenidas. **Fuente:** Camacho, J. 2022

Esta clasificación en el tramo de la vía de estudio, se ve en la Figura 20.

**Figura 20**

*Estabilidad*



**Nota.** Mapa crudo de procesos Shalstab.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

### **3.5.1. Integración de la información y mapas finales de zonas de susceptibles a movimientos en masa en el tramo de la vía km 43 al km 56.**

En este procedimiento se integraron los resultados obtenidos de los procedimientos anteriores para la elaboración de los mapas de zonas susceptibles a movimientos en masa en base de los resultados intermedios de cada proceso que han determinado zonas deformadas, meteorizadas, que en función de la cantidad acumuladores de flujo que pueden trazar las rutas por donde los aluviones pueden fluir e intersectarse para generar embalses artificiales, saturar los taludes y pueden actuar como rutas de flujo inicial de coluviones-aluviones, además de zonas inestables de fácil erosión.

Además, se integró la información de inventario de deslizamientos en varios puntos de control que comprobaron y validaron la metodología aplicada con una eficiencia del 100%.

La integración de la información se realizó en función de la calculadora de SAGA, tomando en cuenta el rango de intensidad de cada factor analizado.

Así se tomaron rangos de mayor subsidencia-levantamiento del relieve topográfico obtenido del análisis INSAR cuyos rangos son de [-3; 3] mm/año, rangos negativos indicativo de subsidencia y rangos positivos de levantamiento del relieve se relacionaron con los Índices Morfométricos y la relación  $q/T$ .

Esta combinación se correlacionó con el inventario de deslizamientos con puntos de control de campo, tal como se muestra en la Figura 21, en la cual las zonas de color rojo son las zonas más inestables con la ocurrencia de movimientos en masa relacionadas directamente con zonas muy deformadas del relieve y muy meteorizadas que fueron cartografiadas en mapas de zonas susceptibles a movimientos en masa en base de la cantidad acumuladores de flujo que aporten a la generación de las rutas por donde los aluviones discurren.

Las formas que presentan alta capacidad de saturar, por lo general son productores de coluvión-aluviones en sitios con alta concentración de flujos de escorrentía, concentración de flujos que pueden actuar como iniciadores de aluviones, además de causar inestabilidad por ser zonas de fácil erosión. Este mecanismo también puede ayudar a determinar la tipología de movimientos en masa como flujos de lodo y escombros, caída de bloques por empuje de flujo de masa, movimientos rotacionales, movimientos trasnacionales, reptación y solifluxión en suelos.

## CAPÍTULO IV

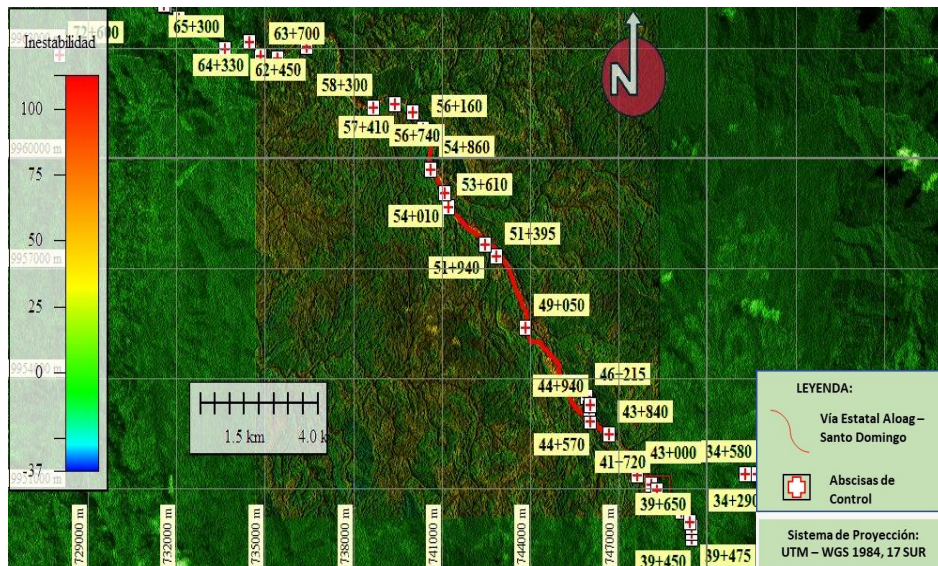
### 4. ANÁLISIS E INTEPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados finales obtenidos a partir de los procedimientos explicados para conseguir el objetivo específico 1, que culminó con la integración de todos resultados de cada procedimiento, a continuación, se describen las zonas de máxima susceptibilidad ante movimientos en masa.

La Figura 21 muestra el resultado final integrado de los resultados de cada proceso de simulación que fueron comprobados con un inventario de campo principalmente en los inicios de las quebradas. La tendencia al color rojo indica la máxima intensidad de inestabilidad en relieves por subsidencias en laderas cóncavas y la tendencia al color azul indica deformaciones del relieve gravitacionales profundas. Las zonas estables y cuasiestables se presenta con tendencia al color amarillo-verde respectivamente.

Con los resultados calculados se puede observar la relación de inestabilidad directa entre las zonas de deformación del relieve topográfico, los flujos de acumulación- intersección-erosión sobre el modelo digital de elevaciones y la máxima influencia que tiene el Índice Topográfico de Humedad para producir rutas de flujos de masa con acumulación de escombros en los cauces principal y aportantes de los taludes que finalmente desfogan en las partes bajas en forma de coluvión-aluviones que rompen las vías dentro del tramo del km 43 al km 56. Estos fenómenos se disparan desde quebradas y guías de agua con dirección al río Pilatón, incluyendo la capacidad de inundar zonas fuera del área de estudio. El detalle de este proceso de flujos de masas se puede ver en la Figura 21. Integración de los resultados INSAR-Modelo Morfométrico SALSTAB.

**Figura 21**  
*Integración de resultados*



*Nota.* Integración de los resultados INSAR-Modelo Morfo métrico-SALSTAB. Zonas de movimientos en masa a partir de deformaciones del relieve topográfico conectadas a quebradas, quebradillas y guías de agua por donde fluyen flujos de avalanchas.

**Figura 22**  
*Resultado de simulación*



*Nota.* Resultado de la simulación de flujos de masa y zonas inestables. **Fuente:** Camacho, J. 2022

En la Figura 22, se puede ver un detalle del resultado de la simulación de zonas inestables como resultado de la integración de los procesos elaborados que son los sitios en donde se produce meteorización en las partes altas, erosión transporte y depositarían de sedimentos en forma de coluvión-aluviones que taponan frecuentemente los cauces de las quebradas y producen embalses artificiales que luego provocan aluviones por lluvias intensas como los ocurridos recurrentemente.

Los valores negativos indican inestabilidad en los márgenes de las quebradas, márgenes que se encuentran deforestadas de manera intensa. Principalmente los movimientos en masa en los taludes de las quebradas, son capaces de generar sedimentos que han taponado las quebradas, son de tipo flujo de masa, caída de bloques, expansión lateral de bloques de lava, deslizamientos rotacionales.

La erosión del suelo es otro tipo de proceso de Geodinámica Externa que desestabiliza los taludes por remoción de la cobertura vegetal origina

**Figura 23**

*Procesos de inestabilidad*



**Nota.** Procesos de inestabilidad de taludes por integración de los procedimientos aplicados. Las zonas de color rojo son las más inestables y son los sitios en donde se general los movimientos



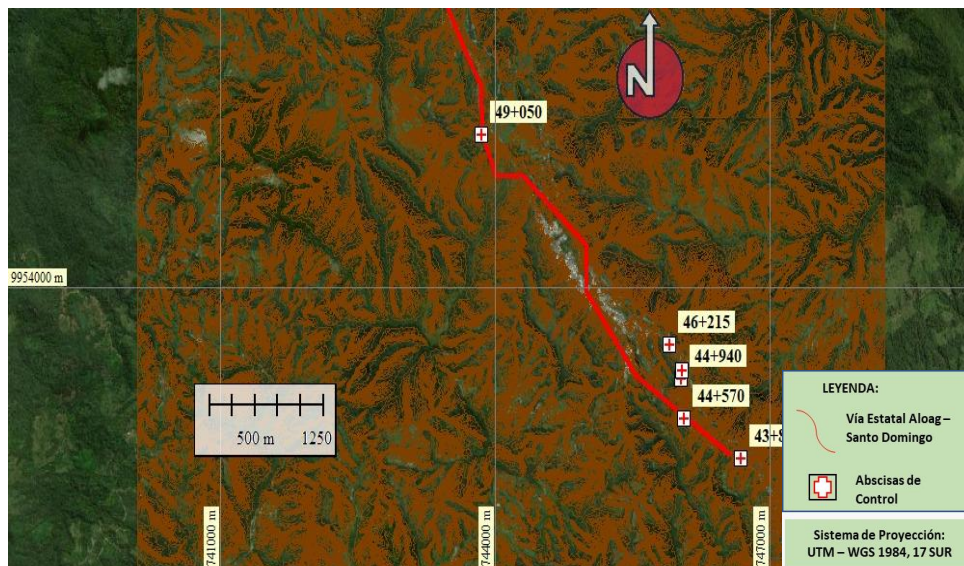
en masa y determinan zonas de erosión de los cauces de los drenajes. En color oscuro se representan flujos de masa. **Fuente:** Camacho, J. 2022

Los procesos de inestabilidad de taludes por integración de los procedimientos aplicados. Las zonas de color rojo son las más inestables y son los sitios en donde se general los movimientos en masa y determinan zonas de erosión de los cauces de los drenajes. En color oscuro se representan flujos de masa.

En las Figuras 24, se muestran vectores obtenidos de la modelación de flujos de masa y su relación con el inventario de campo.

### Figura 24

#### *Vector de flujo de masa*



**Nota.** Vectores de flujo de masa (líneas de color café) obtenidos de la modelación de flujos de masa y su relación con el inventario de campo. Los símbolos de relleno negro son los puntos de control de campo de movimientos en masa. **Fuente:** Camacho, J. 2022

Lo vectores de flujo de masa (líneas de color café) obtenidos de la modelación de flujos de masa y su relación con el inventario de campo. Los símbolos de relleno negro son los puntos de control de campo de movimientos en masa.

En las Figuras 25 a la 50 se presenta perfiles del resultado final de la aplicación de la metodología integrada.

En las figuras las fajas vectoriales de color negro, representan los flujos de masa que afectan la vía que generalmente ocurren como coluvión-aluviones desde zonas de represamiento de agua en zonas medias de quebradas y guías de agua.

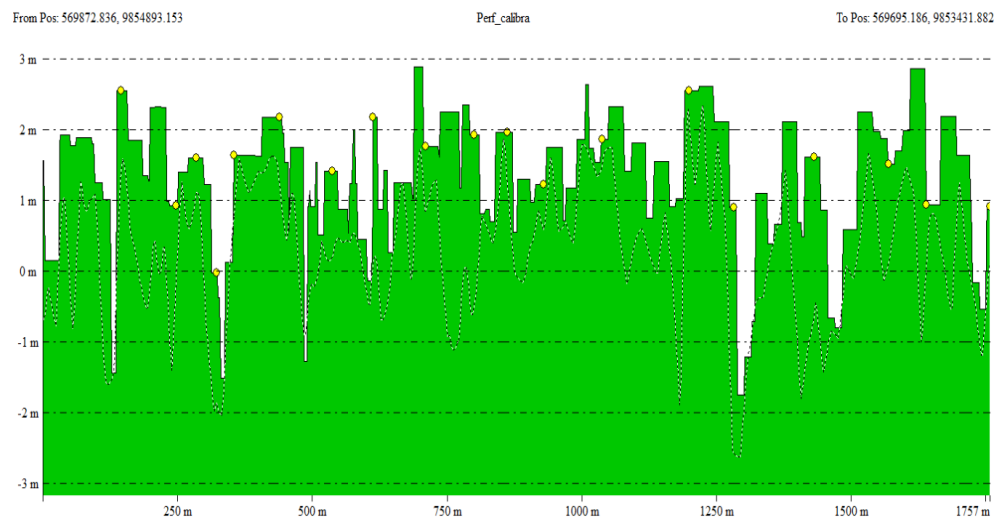
En general los sitios embalsados por coluviones que son desfogados como aluviones en épocas de precipitación intensa, han causado destrucción en la vía aguas abajo como se puede ver en varias fotos tomadas en varios sectores.

#### 4.1. Análisis Perfiles

Los perfiles representan el cambio morfométrico ocurrido en el período de estudio INSAR antes y después del sismo del 16 de abril de 2016, incluyendo los resultados de la simulación integrada con los métodos Morfométrico Shalstab. Estos perfiles demuestran que ocurrieron cambios intensos del relieve topográfico.

**Figura 25**

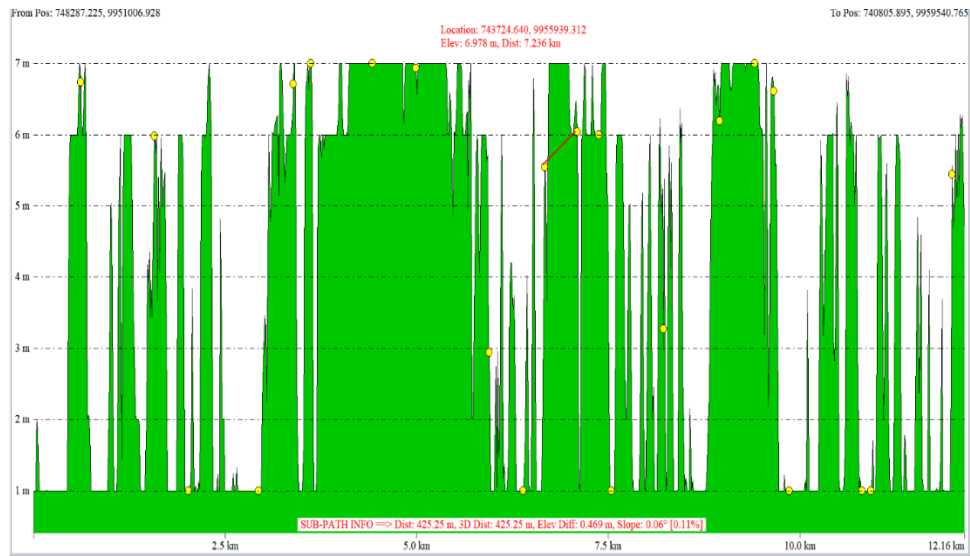
*Perfil de resultado topográfico 20160210*



**Nota.** Perfil topográfico 20160210. **Fuente:** Camacho, J. 2022

## Figura 26

### Perfil de resultado topográfico 20160224



**Nota.** Perfil topográfico 20160224. **Fuente:** Camacho, J. 2022

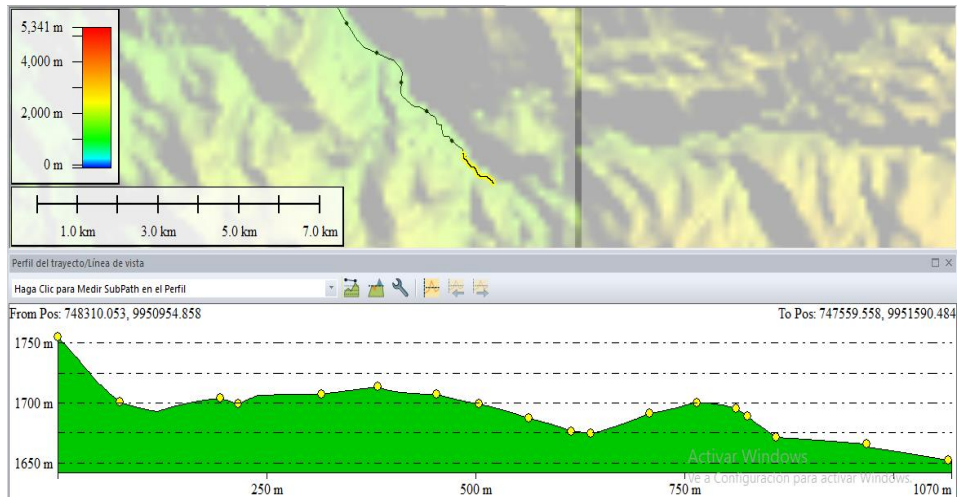
El perfil topográfico de las Figuras 25 y 26 en este período, muestra discontinuidades propias por estar el tramo de vía dentro de un paisaje técnico-erosivo intenso en donde se presentan mayores zonas inestables con acumuladores de sedimentos en las partes altas y medias que generalmente en épocas de intensa pluviosidad se transforman en coluvión-aluviones.

La comparación de los perfiles topográficos evidencia que la zona correspondiente a este tramo de la vía Alóag Santo Domingo mantiene en su estructura un grado de erosión y generación de movimientos en masa de intensa a moderada posiblemente causado también por el sismo del 16 de abril de 2016 que afectó a gran parte de la Costa Ecuatoriana y también a la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas. Estos eventos generaron coluviones en las cotas medias y aluviones en las cotas bajas que afectaron al tramo de la vía. Investigaciones de campo evidenciaron que dichos coluvión-aluviones aumentan en épocas de intensas precipitaciones causando procesos erosivos han degradado el perfil topográfico del terreno. Hay que destacar que, en un periodo de tiempo tan corto, los procesos de erosión y movimientos en masa por deformación del relieve topográfico-erosión posiblemente fueron activados por lluvias intensas luego del sismo del 16 de abril de 2016.

## 4.2. Análisis perfil topográfico ajustado a cada km de la zona de estudio.

**Figura 27**

*Perfil de resultados km 43*



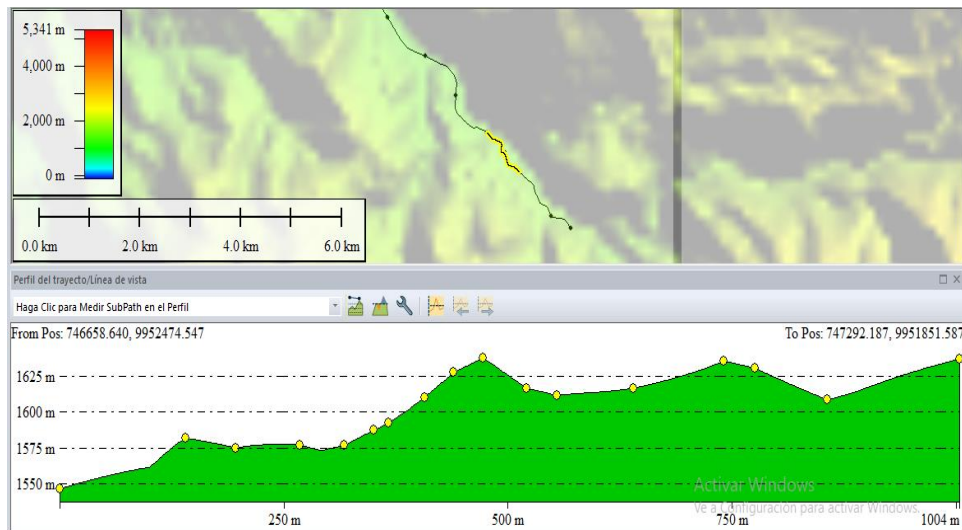
**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 43 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

Se observa que la cota más alta empieza a los 1750 m hasta llegar a los 1070 m respectivamente se observa la presencia de coluviones representados en círculos de color amarillo teniendo un total de 18 para el primer tramo de la vía de estudio.

**Figura 7**

*Perfil de resultados km 44*

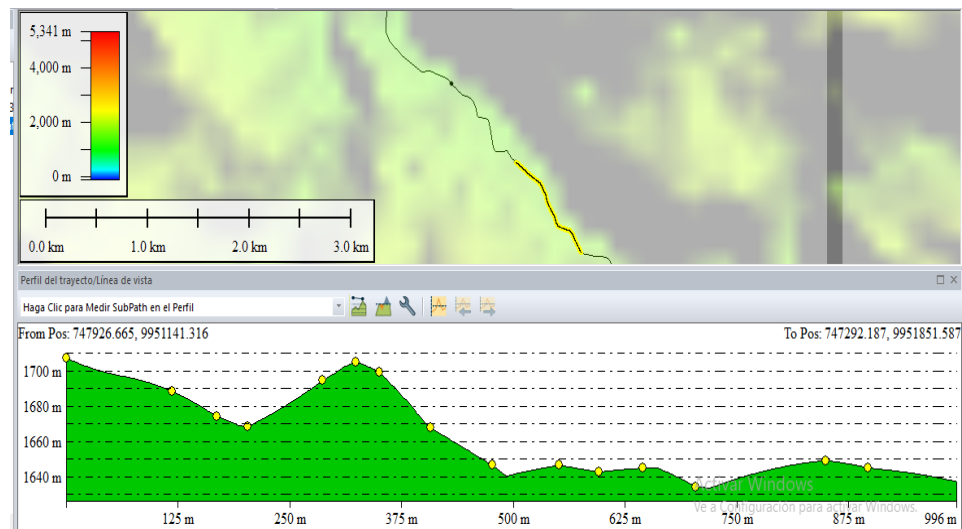


**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 44 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

**Figura 29**

*Perfil de resultados km 44*



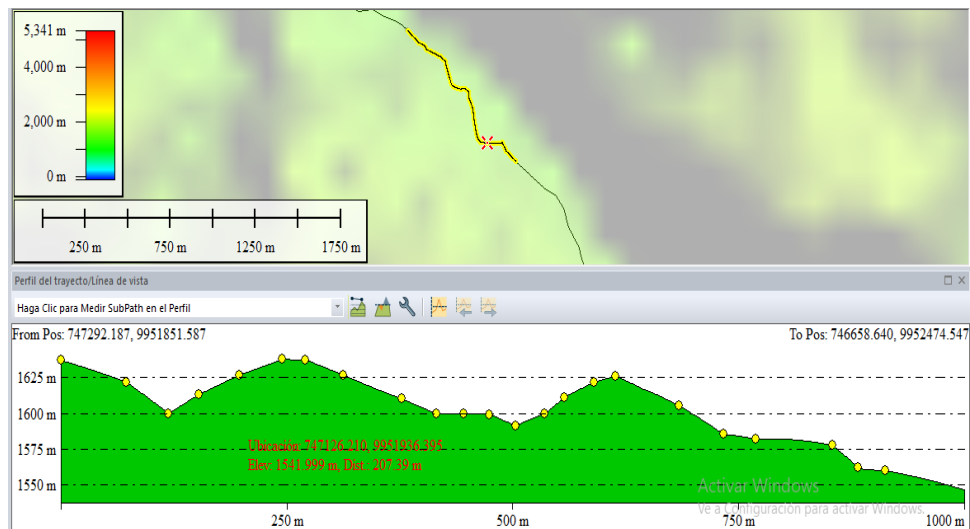
**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 44 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

Se aprecia la cantidad de 15 coluviones a lo largo del km 44 de la vía Alóag Santo Domingo, la formación de estos coluviones responde a materiales sueltos que se han depositado en las depresiones de la montaña por fenómenos de erosión.

### Figura 30

Perfil de resultados km 45



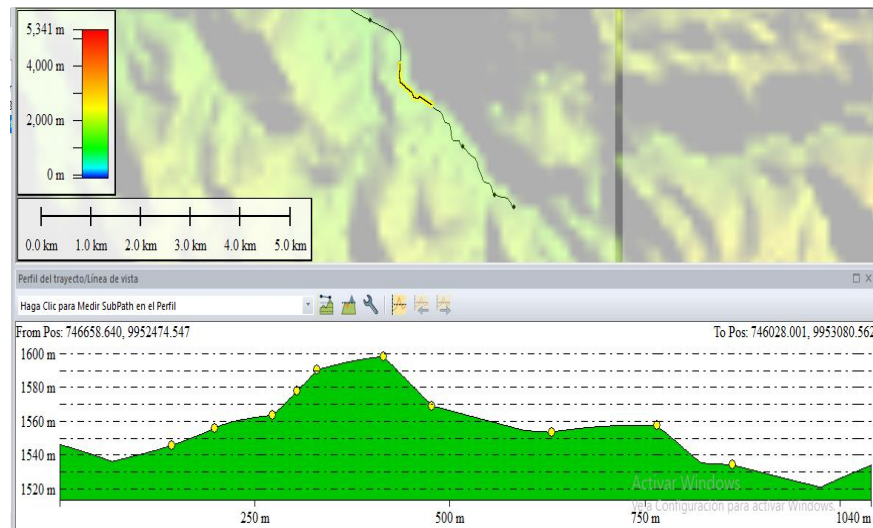
**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 45 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

El perfil topográfico muestra la formación de 23 coluviones observando que estos se generan en las cotas bajas de las laderas como resultado de la erosión de las partes más altas.

**Figura 31**

Perfil de resultados km 46



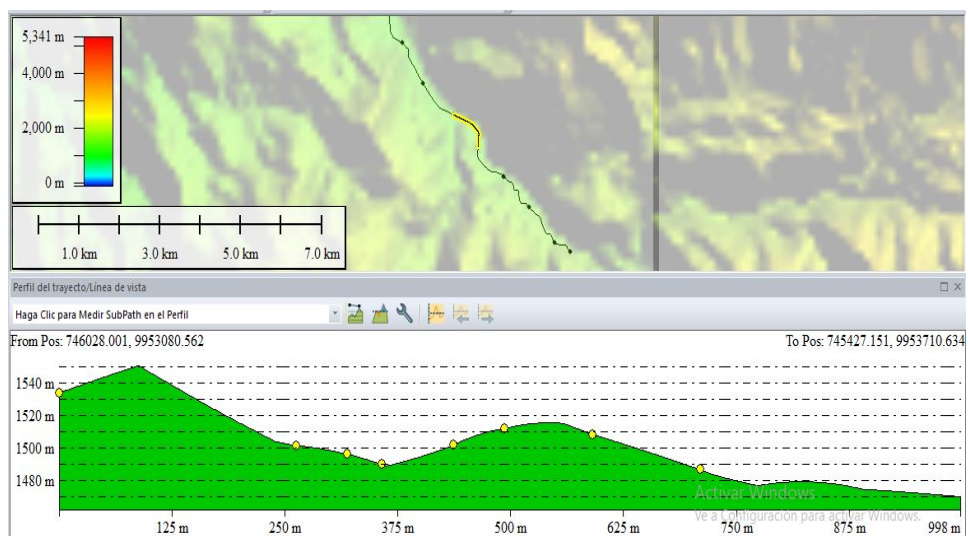
**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 46 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

El perfil topográfico muestra la formación de 10 coluviones durante este tramo se aprecia que las cotas más altas alcanzan los 1600m

**Figura 32**

Perfil de resultados km 47



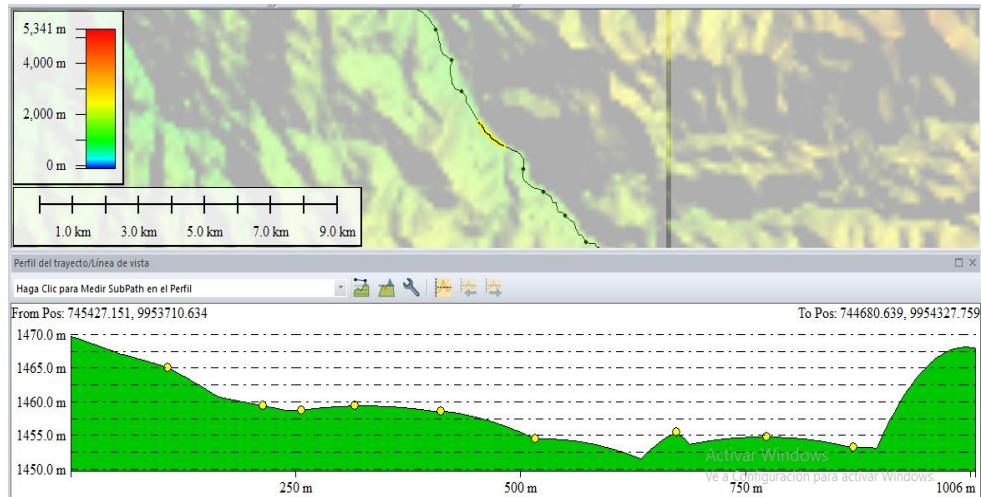
**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 47 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

La cota máxima se ubica en los 1540m, la formación de coluviones es moderada con 10 formaciones respectivamente.

### Figura 33

Perfil de resultados km 47



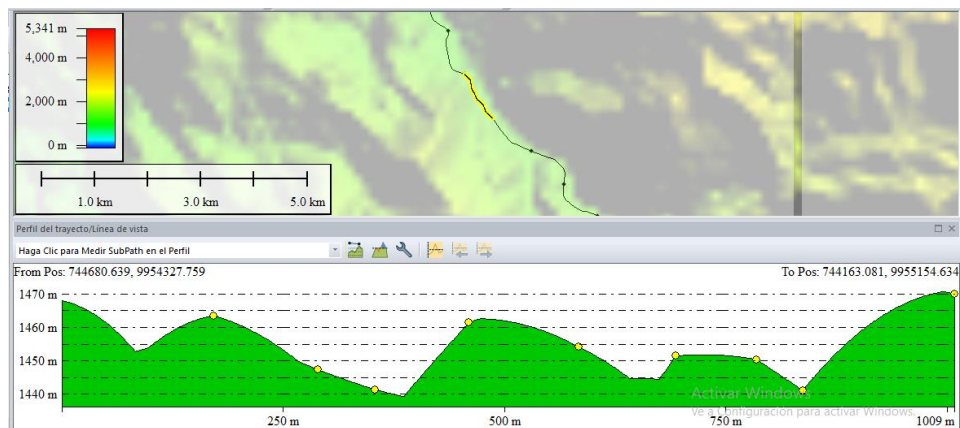
**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 48 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

Con respecto al km 47 el número de coluviones se establece en 10, se observa que estas se forman en las cotas más bajas con respecto al promedio establecido por la ruta.

### Figura 34

Perfil de resultados km 48



**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 48 de la vía Alóag Santo Domingo.

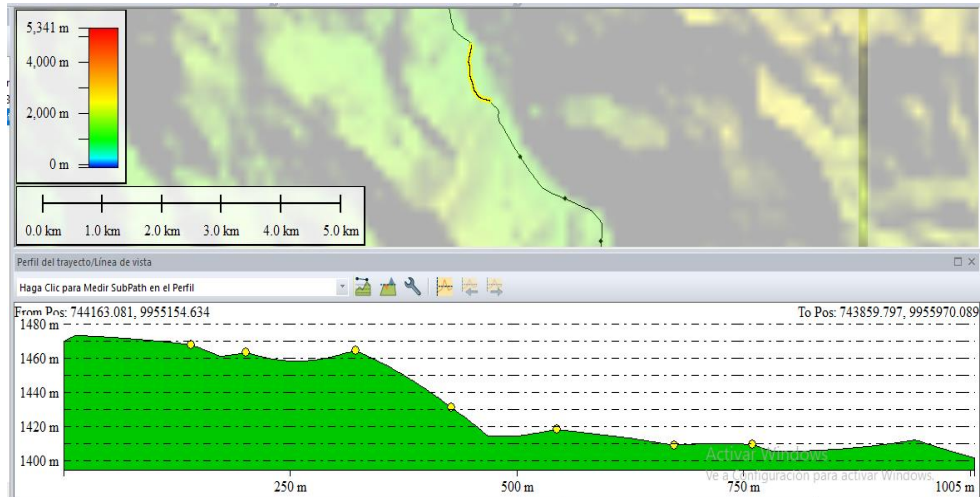
**Fuente:** Camacho, J. 2022



El perfil muestra la formación de 8 coluviones para este tramo de la vía

### Figura 35

Perfil de resultados km 49



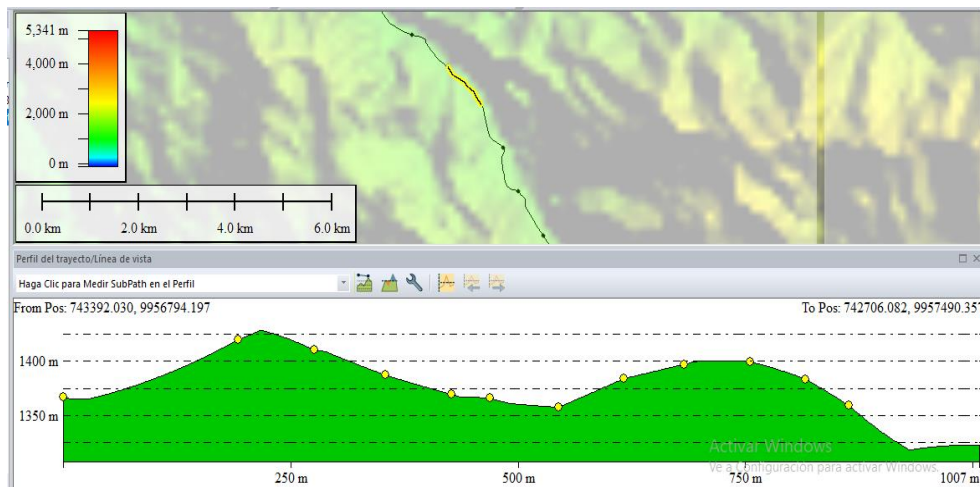
**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 49 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

Se aprecia que la cota Vuelve ascender hasta los 1460m en el tramo inicial y este vuelve a descender hasta los 1400 m con un número de 7 coluviones respectivamente.

### Figura 36

Perfil de resultados km 50



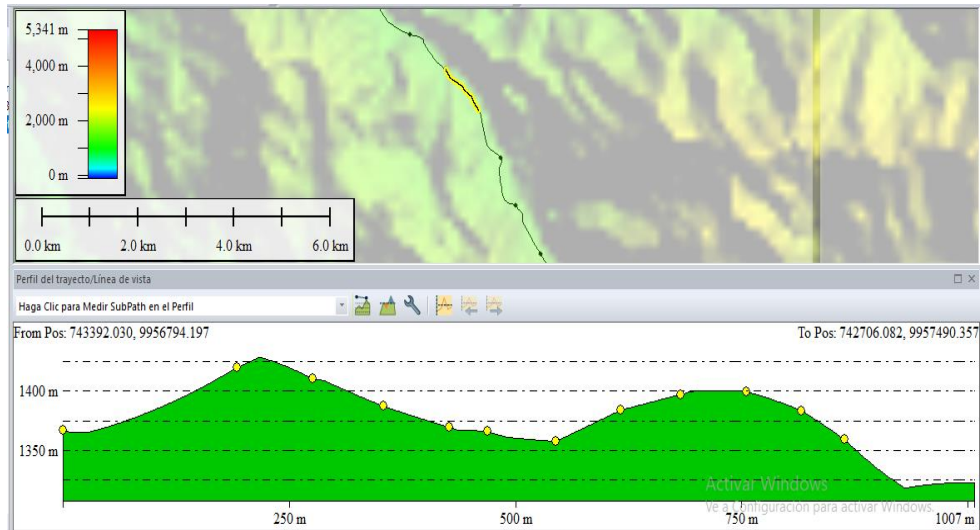
**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 50 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

Se observa que dentro de este tramo de la ruta los coluviones ascienden a 12, ubicados en cotas promedio de 1300- a 140m.

### Figura 37

Perfil de resultados km 51



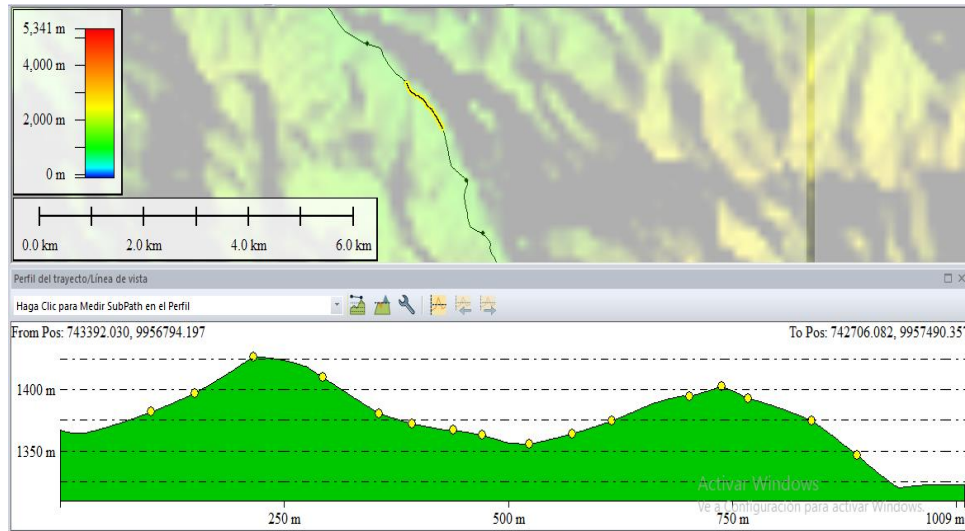
**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 51 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

Al cabo de llegar al km 51 de la vía Alóag Santo Domingo, la cantidad de coluviones aumenta se aprecia que estos coluviones se agrupan en las cotas bajas del tramo de la vía con 13 coluviones respectivamente.

**Figura 38**

*Perfil de resultados km 52*



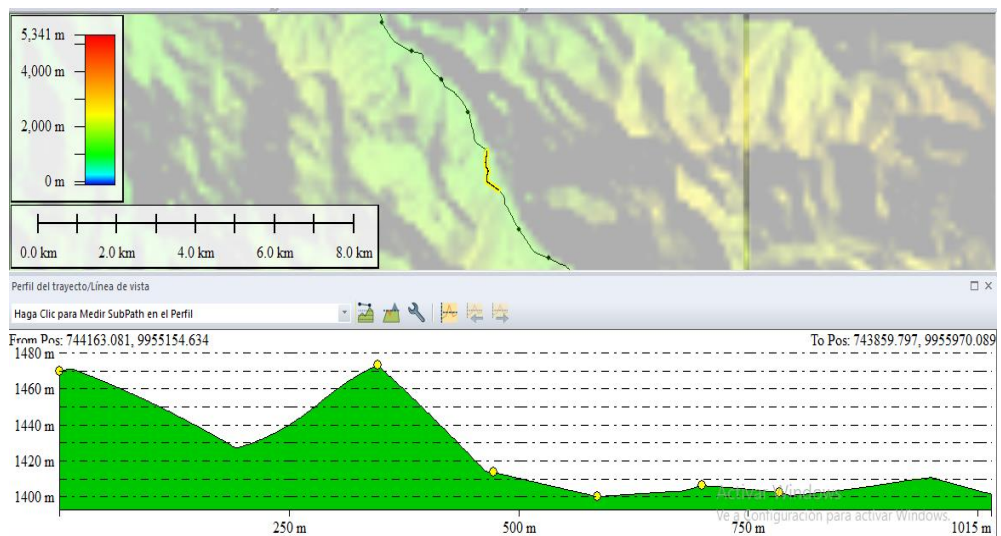
**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 52 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

La formación de estos coluviones se mantiene con un número de 17 para el km 52 de la vía de estudio.

**Figura 39**

*Perfil de resultados km 53*



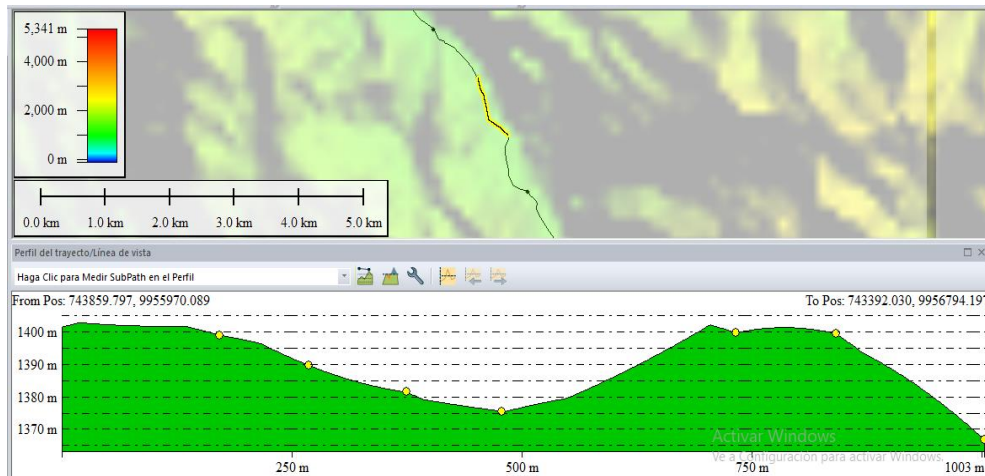
**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 53 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

Durante este tramo se observa que la zona es más estable por lo que el grado de erosión no ha sido muy agresivo resultando en la formación de pocos coluviones 6 para ser específico por lo que se considera que este tramo es bastante estable.

### Figura 40

Perfil de resultados km 54



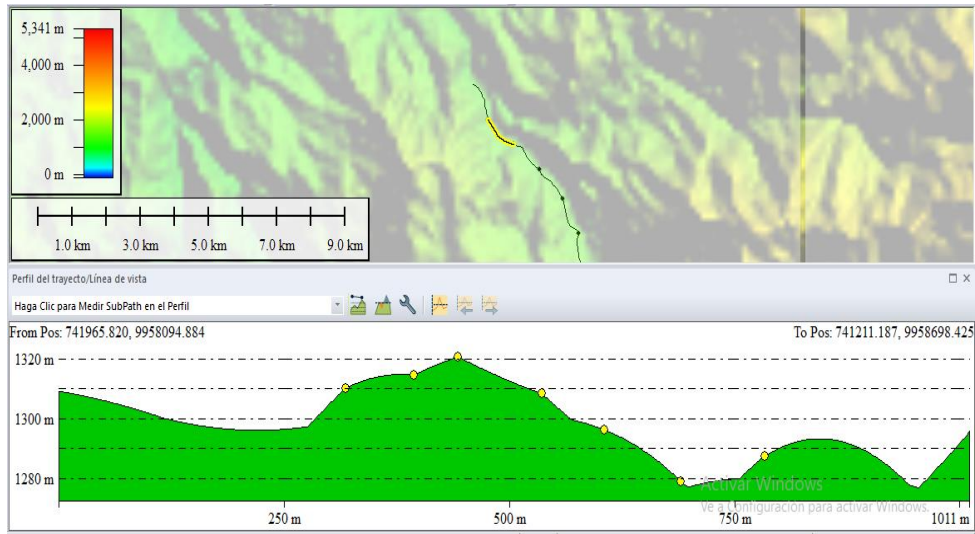
*Nota.* Perfil de Resultados correspondiente al km 54 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

El perfil topográfico muestra la presencia de 7 coluviones ubicados en las cotas con un rango de 1380- a 1390m respectivamente.

**Figura 41**

*Perfil de resultados km 55*



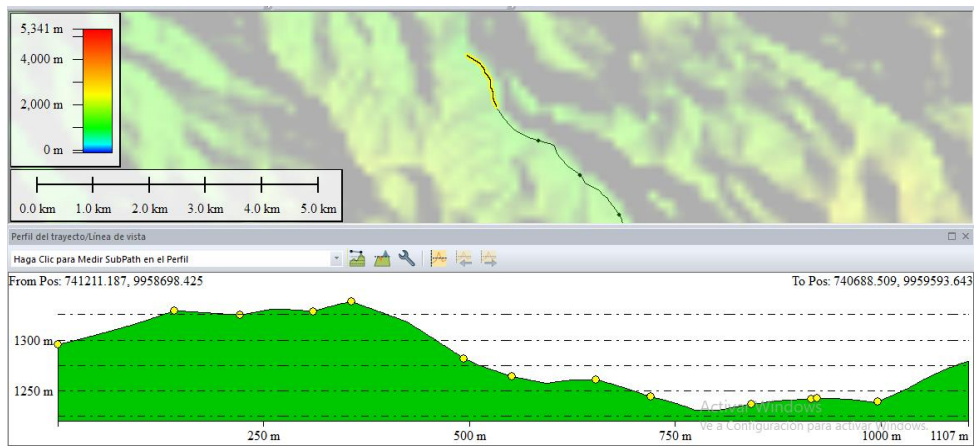
**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 55 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

Se visualiza la presencia de 8 coluviones a lo largo del km 55 de la vía aparentemente se nota que este tramo de la zona es estable.

**Figura 42**

*Perfil de resultados km 56*



**Nota.** Perfil de Resultados correspondiente al km 56 de la vía Alóag Santo Domingo.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

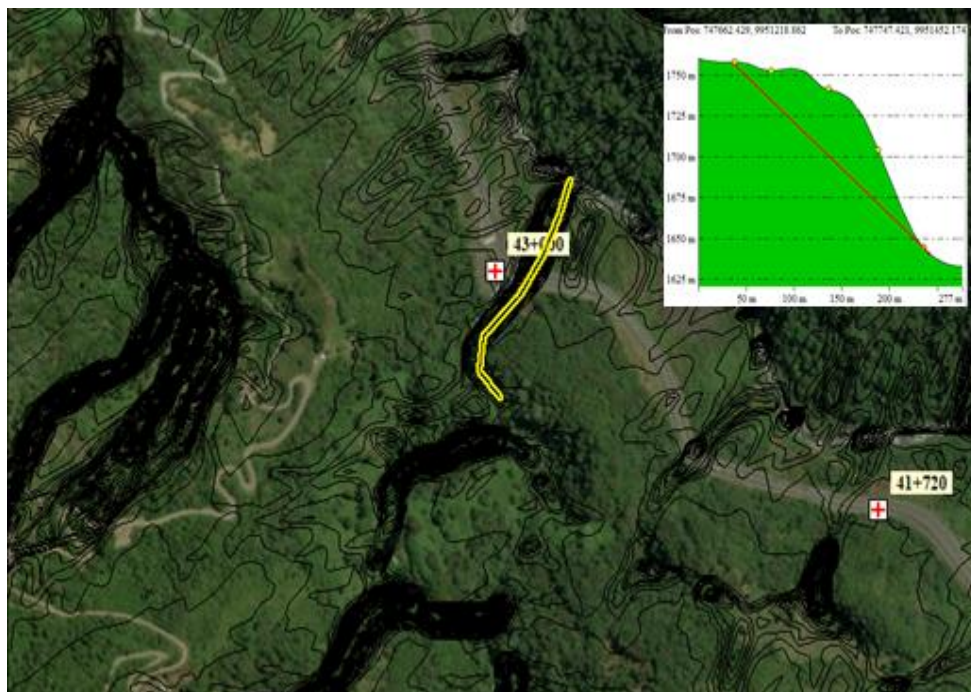
El tramo final de la vía muestra la presencia de 13 coluviones agrupados en cotas no superior a los 1300 m

### Perfil perpendicular km 43

**Análisis:** Se presenta un coluvión-aluvión con dos crestas activadas por intensas precipitaciones a precipitada en esta zona, responden a procesos erosivos que se han rellenado de sedimentos en gargantas morfológicas que generan embalses durante largos periodos de tiempo y desfogan violentamente en épocas de intensas precipitaciones.

### Figura 43

*Ubicación de la abscisa del Km 43*



*Nota.* Ubicación de la abscisa del Km 43 al inicio del tramo de la vía en estudio

**Fuente:** Camacho, J. 2022

En planta la ubicación de la abscisa del Km 43 al inicio del tramo de la vía en estudio y perfil perpendicular a la vía línea de color amarillo). La línea delgada de color rojo del perfil marca el plano de deslizamiento de coluvión.

## Perfil perpendicular km 44

### Figura 44

*Ubicación de la abscisa del Km 44*



*Nota:* Ubicación de la abscisa del Km 44.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

En planta la ubicación de la abscisa del Km 44. En la zona existen múltiples flujos de masa potenciales y activos y en el perfil perpendicular a la vía (línea de color amarillo), la línea delgada de color rojo del perfil marca el plano de deslizamiento de un posible coluvión.

**Análisis:** El perfil perpendicular a la vía muestra una posible cuña de deslizamiento. Además, pueden existir varios flujos de masa potenciales que mantienen una tendencia similar a deslizamiento en quebradas y guías de agua que ponen en amenaza a la vía.

En las Fotos A y B se observan el plano y el frente de la cuña de deslizamiento. Y flujos de masa potenciales que pueden afectar la vía.

**Fotografía 3**  
*Deslizamientos*



**Nota.** Imagen A y B captada en la zona de estudio. Deslizamiento de roca-suelo (A) y rutas de flujos potenciales de masa (B). Fuente: Camacho, J. 2022



## Perfil perpendicular km 45.

### Figura 45

Ubicación de la abscisa del Km 45



*Nota.* Ubicación de la abscisa del Km 45.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

En planta la ubicación de la abscisa del Km 45. En la zona existen múltiples taludes susceptibles a caída de bloques de roca, así como posibles flujos de masa potenciales cerca de la ciudad de Tandapi.

**Análisis:** En la zona existen múltiples taludes susceptibles a caída de bloques de roca, así como posibles flujos de masa potenciales cerca de la de la vía y de la ciudad de Tandapi. El perfil muestra un talud con intensa pendiente con la posible ocurrencia de caída de bloques de roca.

### Perfil km 46 + 215.

**Análisis:** A partir de este kilometraje, se encuentran emplazados en quebradas, quebradillas y guías de agua varios flujos de masa que ponen en amenaza a la ciudad de Tandapi como se puede ver en la Figura 46.

El corte de vía en los frentes de flujos de masa activos ha acelerado el proceso destructivo de la vía.

## Figura 46

Ubicación de la abscisa del Km 46 + 215



Nota. Ubicación de la abscisa del Km 46+215.

Fuente: Camacho, J. 2022

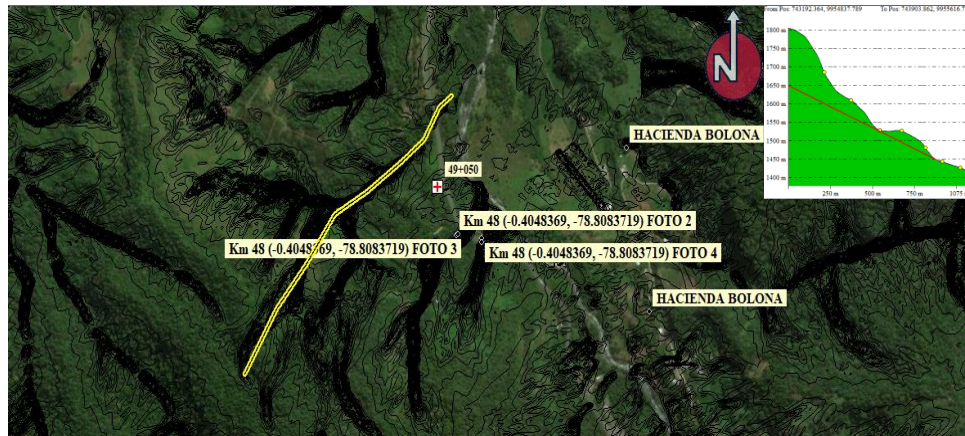
En planta la ubicación de la abscisa del Km 46 + 215. En la zona existen múltiples taludes susceptibles a flujos de masa que ponen en amenaza a la ciudad de Tandapi incluyendo caída de bloques de roca. En el perfil un coluvión sobre un plano de deslizamiento (línea de color rojo).

**Análisis:** El perfil topográfico correspondiente al km 47 muestra una particularidad y es que durante este trayecto los fenómenos erosivos se han desarrollado con mayor agresividad, resultando en coluviones maduros, representados en crestas a lo largo del perfil, presumiblemente es una zona con potencial erosivo elevado que supone un riesgo. La abscisa del km 47 se encuentra en este tramo de la vía dentro de la ciudad de Tandapi.

## Perfil perpendicular km 48 y 49 +050.

### Figura 47

Ubicación la abscisa del Km 48 y 49 + 050



*Nota.* Ubicación la abscisa del Km 48 y 49 + 050. Fuente: Camacho, J. 2022

En planta la ubicación la abscisa del Km 48 y 49 + 050. En la zona existen múltiples taludes susceptibles a flujos de masa que ponen en amenaza a la ciudad de Tandapi incluyendo caída de bloques de roca. En el perfil un coluvión sobre un plano de deslizamiento (línea de color rojo).

**Análisis:** desde la salida norte de la ciudad de Tandapi, existen varios flujos de masa potenciales y activos que han destruido la vía, en una combinación intensa de coluviones jóvenes y antiguos que posiblemente se formaron por la cantidad de embalses creados en las zonas altas y medias de las quebradas que finalmente desfogaron por las rutas de estas quebradas que finalmente terminaron en coluvión-aluviones, como se puede observar en las Fotos C. El corte de vía ha ocasionado deslizamientos locales de pequeños coluviones.

## Fotografía 4

### Rutas

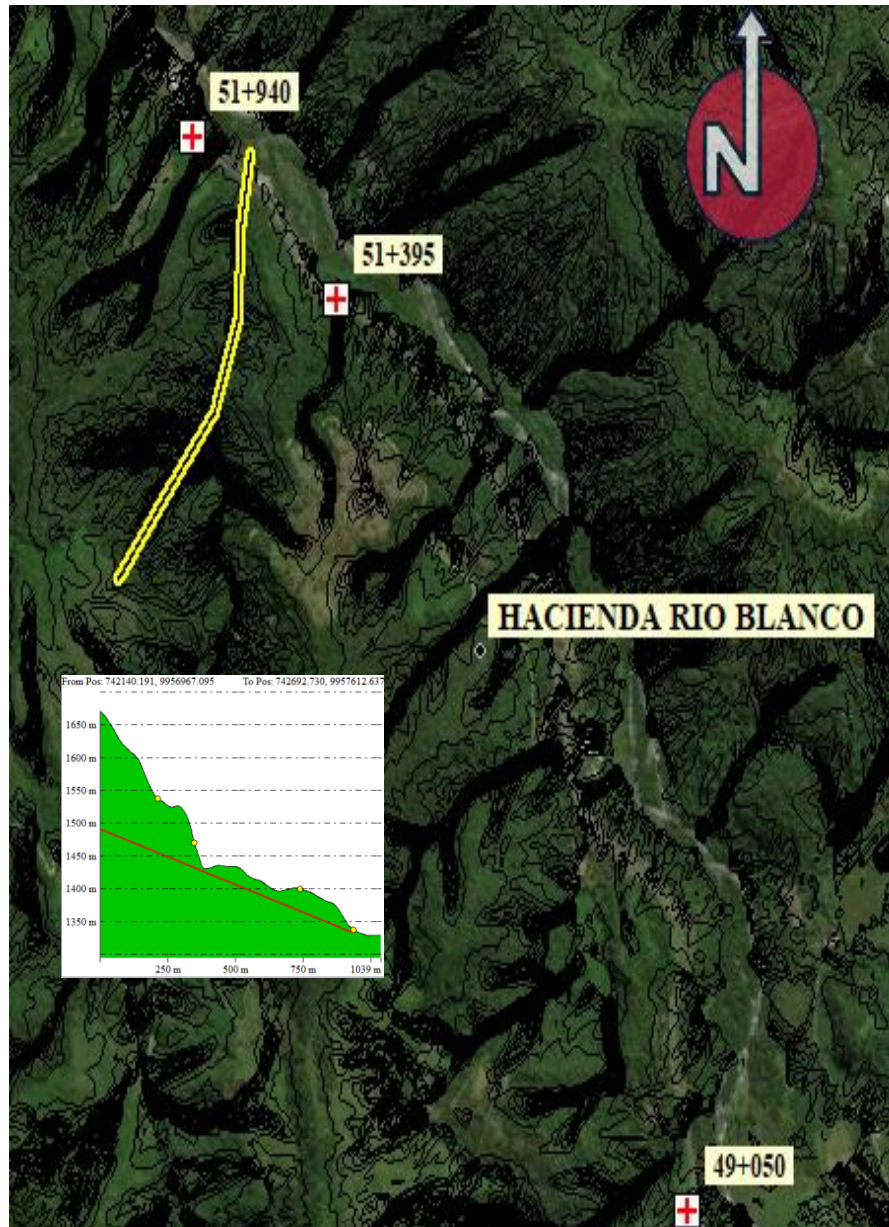


*Nota.* Imagen C y D captada en la zona de estudio. En (C) rutas de coluvión-aluviones y en (D) plano de deslizamiento de talud por corte de vía

**Perfil perpendicular km 49+050 al km 51 + 940.**

**Figura 48**

*Ubicación la abscisa del Km 49 + 050 al km 51 + 940*



*Nota.* Ubicación la abscisa del Km 49 + 050 al km 51 + 940

**.Fuente:** Camacho, J. 2022

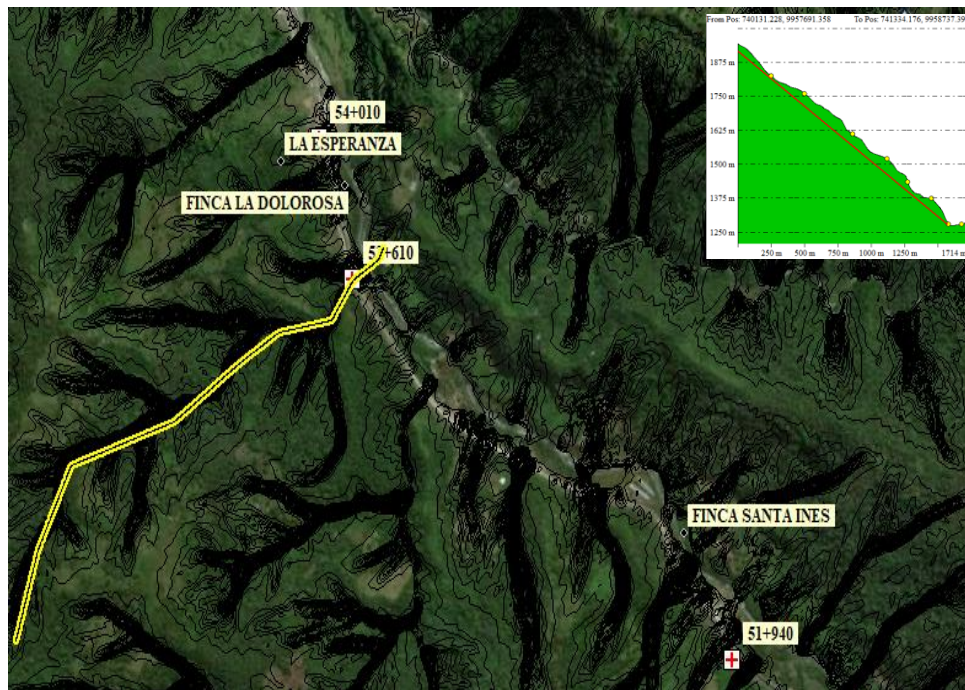
Múltiples quebradas en taludes susceptibles a flujos de masa incluyendo caída de bloques de roca. En el perfil varios coluviones y planos de caída de rocas. Elaboración propia J Camacho 2022.

**Análisis:** En este tramo de la vía existe también una combinación de flujos de masa e forma de coluvión-aluvión maduro y joven que han puesto en vulnerabilidad en el tramo de la vía.

### Perfil perpendicular km 51+940 al km 54 + 010

#### Figura 49

*Ubicación la abscisa del km 51+940 al km 54 + 010*



**Nota.** Ubicación la abscisa del Km 51+940 al km 54 + 010.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

Múltiples quebradas en taludes susceptibles a flujos de masa. En el perfil varios coluvión-aluviones activos y potenciales. En el perfil topográfico se visualizan varios coluvión- aluviones potenciales y activos. Elaboración propia J Camacho 2022.

**Análisis:** en este tramo igualmente existen varios flujos de masa en quebradas, quebradillas y guías de agua capaces de mover coluvión-aluviones en las cotas 1425 a 1600, generalmente coluviones de formación jóvenes, que en un futuro pueden representar un peligro latente, dado su capacidad de provocar fenómenos de deslizamiento hacia la carretera.

Estos coluvión-aluviones se agrupan en las cotas altas de la vía, provocando deslizamientos rotacionales y traslacionales. Este tipo de flujos de masa se pueden ver en las Fotografías E y F.

### **Fotografía 5**

*Flujo de masa*

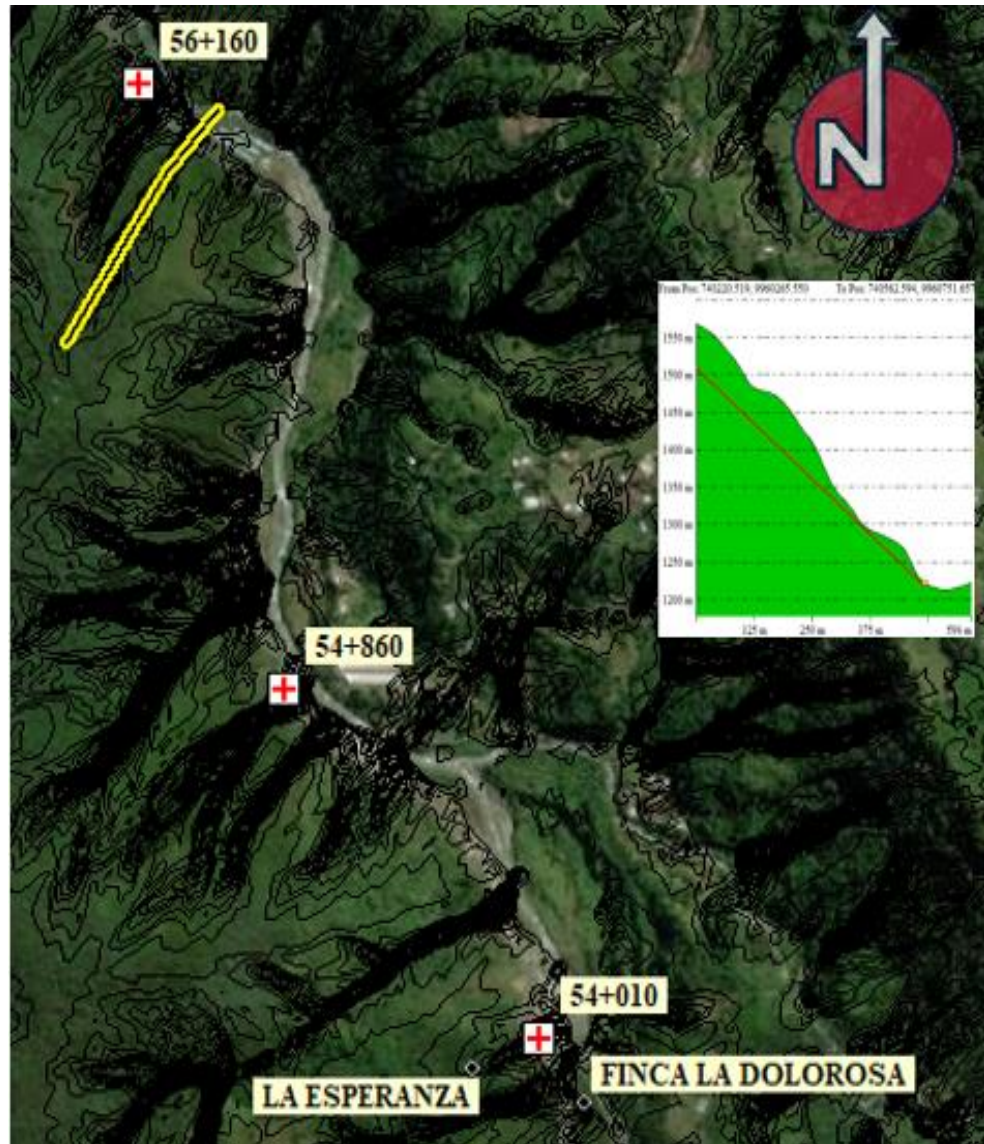


*Nota.* Imagen propia, captada en la zona de estudio. Fotos E y F. Flujos de masa comprobados en el tramo de la vía km 51+940 al km 54 + 010. **Fuente:** Camacho, J. 2022

## Perfil perpendicular Km 54+010 al 56+160.

**Figura 50**

*Flujos de masa en el tramo 54+010 al km 56 + 160*



*Nota.* Múltiples flujos de masa en el tramo 54+010 al km 56 + 160. En el perfil varios coluvión-aluviones activos y potenciales. En el perfil topográfico se visualizan varios coluvión-aluvión potenciales y activos. **Fuente:** Camacho, J. 2022



Múltiples flujos de masa en el tramo 54+010 al km 56 + 160. En el perfil varios coluvión-aluviones activos y potenciales. En el perfil topográfico se visualizan varios coluvión- aluvión potenciales y activos.

**Análisis:** El perfil correspondiente al este tramo de la vía muestra varios coluviones activos por lluvias intensas y tienen las mismas características que los coluvio- aluviones de los tramos anteriores incluyendo procesos de erosión intensos con la acumulación-transporte de flujos de masa que terminan en la vía en forma de coluvion-aluviones.

Dentro del marco del objetivo 2 se puede determinar que las obras tanto estructurales y no estructurales permiten controlar, minimizar la amenaza de los movimientos en masa, estas consisten en estructuras de retención de masas en movimiento, se las realiza con el fin de detener los deslizamientos, es decir una vez que se presenten los movimientos en masa por cualquier fenómeno de carácter natural o antrópico desde la aparición de grietas superficiales o deslizamientos, para de esta forma tratar de contrarrestar y así evitar los deslizamientos, a continuación detallamos algunas de las alternativas estructurales y no estructurales.

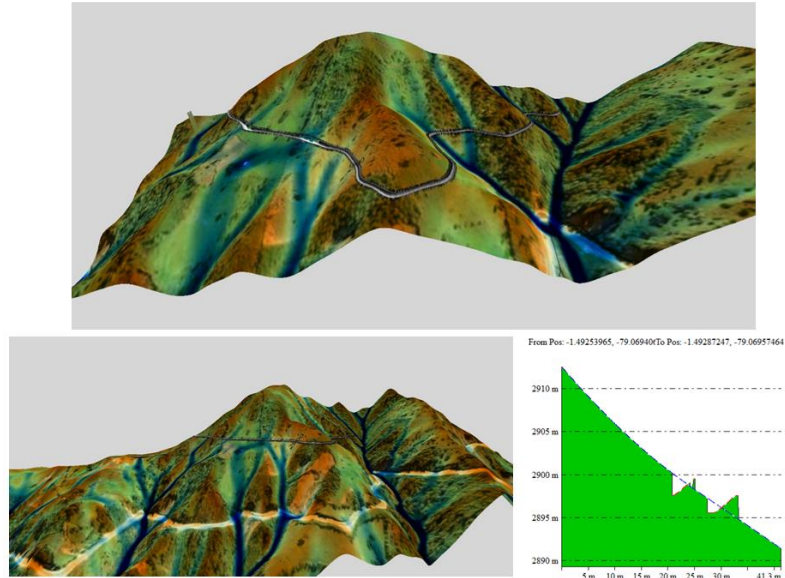
**Bermas.** Estas consisten en realizar una franja longitudinal, comprendida del arcén (margen lateral de una carretera) y el interior de talud más próximo a la vía. Figura 51.

**Mallas de Protección de Taludes.** Es una protección que va adosado a la superficie del talud de tal manera que este en contacto directo con la malla, la misma se utiliza en pendientes muy inclinadas con materiales inestables.

**Cunetas de Coronación.** Estas cunetas son estructuras de drenaje de forma artificial su función principal consiste en desviar y disminuir la energía de la escorrentía superficial del agua generada especialmente en la época de lluvias en los límites de las bermas esto se puede utilizar en el km 43 se utiliza por el evento de flujo de masa y de otro tipo de flujo como de lodo son recurrente ya que ese tramo de la vía se encuentra en una microcuenca con intensa fluviosidad (mayor a 2200ml) .

## Figura 8

*Coronas y bermas de control*



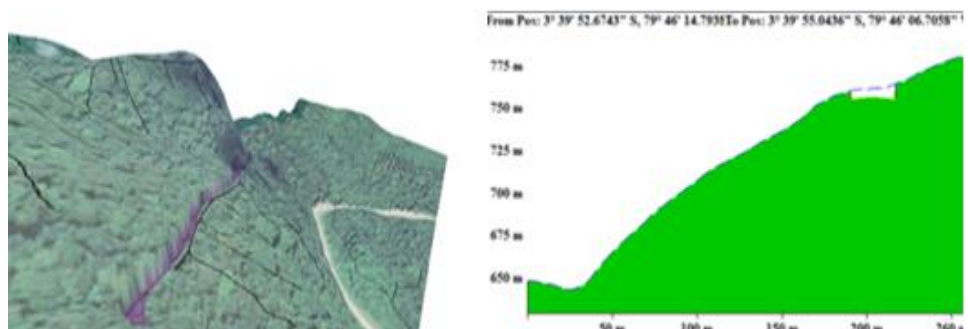
*Nota.* Coronas y bermas de control de escorrentía del agua de precipitación.

**Fuente:** Camacho, J. 2022

**Abatimiento de taludes.** Esta consiste en realizar mediante corte y remoción de los materiales para disminuir la inclinación del talud lo cual sería necesario aplicarlo en el km 52 se utiliza en este sector existen “sombrosos de suelos sobresaturados que se desprenden fácilmente por lo que hay que remover la capa.

## Figura 9

*Corte y remoción*



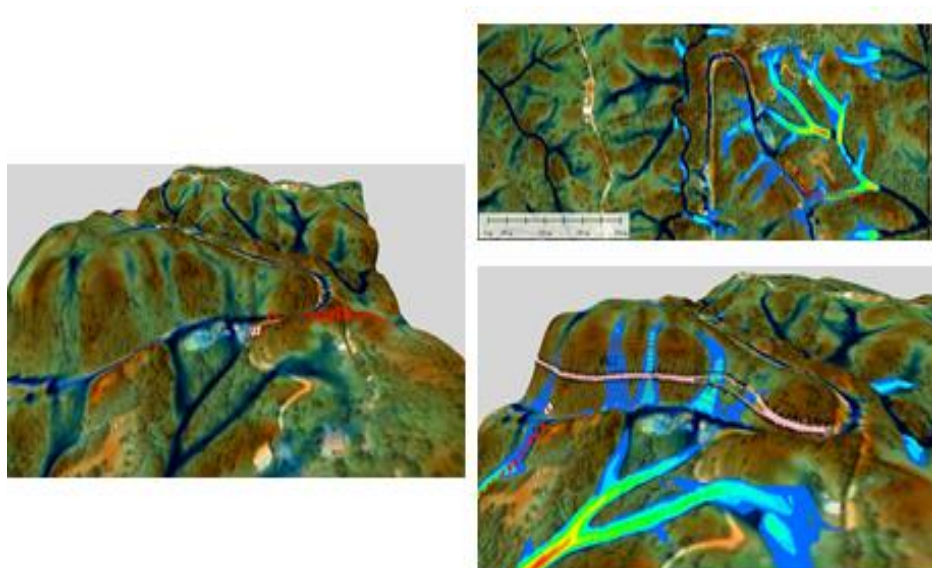
*Nota.* Corte y remoción de los materiales para disminuir la inclinación del talud. **Fuente:** Camacho, J. 2022

**Remoción de material en la cabeza del talud.** Esta técnica consiste en permitir un equilibrio de fuerzas para mejorar la estabilidad del talud ya que la vía en estudio tiene fallas activas en la cual esta técnica en mención es muy útil, cabe mencionar también que depende de las características geotécnicas del terreno.

**Drenaje superficial.** La finalidad de estos drenajes es en si el manejo directo de las aguas de escorrentías del talud, evitando así la infiltración en el interior del talud y su posterior erosión, en base a los estudios realizados se puede aplicar en los km 48 al 52 de la vía Aloag – Santo Domingo, se utiliza esto cuando existe más de dos flujos entreconectados es necesario capturar los mismo con una obra de drenaje superficial no revestida para mantener un flujo constante y de baja energía que puede ser transportado hacia las partes bajas por este drenaje utilizando un drenaje principal .

**Figura 10**

*Control de drenaje*



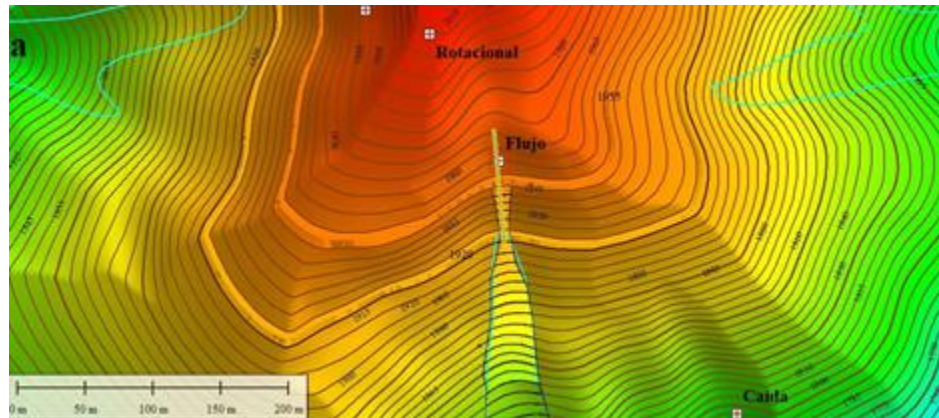
**Nota.** Control de drenaje superficial mediante captura de flujo. **Fuente:** Camacho, J. 2022

**Colectores en forma de espina de pez abierta.** Esta técnica sirve para disminuir la infiltración de agua en las áreas de arriba del talud conduciendo las mismas hacia afuera de las áreas de posible deslizamiento, por canales previamente impermeabilizados y de una forma escalonada, este trabajo se puede aplicar desde

el km 47 al 51 del tramo en estudio, la cual se debe utilizar por que puede disipar de los flujos de escorrentías abiertas donde existen microcuencas abiertas cóncavas. Figura 54 (a y b).

### Figura 11

*Figura a*

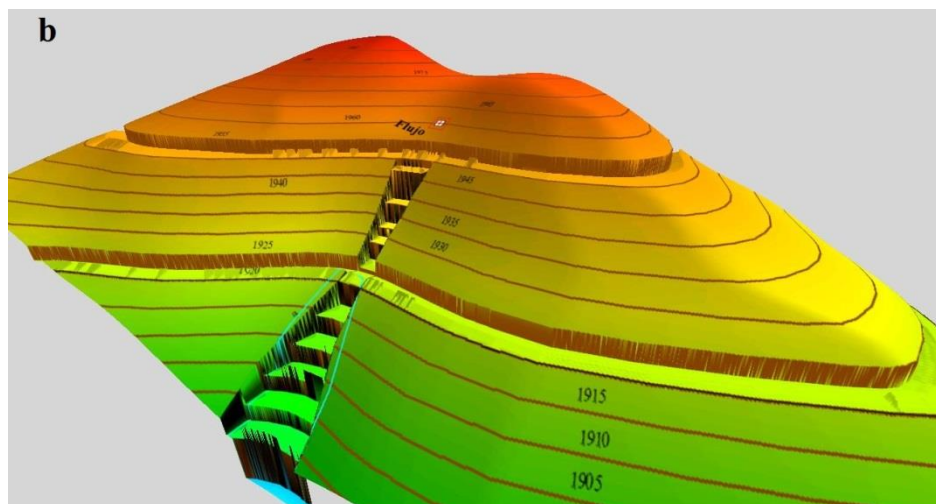


*Nota.* Colectores en forma de espina de pez de pez abierta, vista en planta (a).

**Fuente:** Camacho, J. 2022.

### Figura 12

*Figura b*



**Nota.** Vista 3d en (b). **Fuente:** Camacho, J. 2022

## 5. CONCLUSIONES

En esta investigación se determinó que en las partes altas de las quebradas y guías de agua en sus cabeceras, no se producen movimientos en masa y exclusivamente son zonas de recarga en zonas deformadas por tectonismo y erosión. La comprobación de campo realizada corroboraron que los movimientos en masa identificados dentro del area de drenaje de las quebradas ocurren como resultado de una combinación de factores naturales como la deformación tectónica y factores climáticos, como por factores antrópicos principalmente la eliminación de las coberturas vegetales originales.

Finalmente, el conteo total del tramo correspondiente del km 43 al 56 de la vía Alóag - Santo Domingo muestra un promedio de 177 coluviones, lo que supone que el tramo de esta vía está sujeto a fenómenos de erosión constantes y moderadas, lo que ha ocasionado el agrupamiento de material en las zonas bajas de la vía.

Sin embargo, cabe considerar que este tipo de fenómenos que arrastran sedimentos sueltos y no consolidadas hasta su depósito en las zonas planas de las vías, se ve influenciado en gran medida por fenómenos tales como la precipitación, el tipo de suelo y los movimientos del suelo, lo que puede desencadenar en un riesgo latente de que estos coluviones puedan llegar a acumularse de tal manera que generen deslizamientos y estabilización del suelo.

## **6. RECOMENDACIONES**

Este trabajo investigativo da como recomendaciones específicamente para la reducción de este tipo de amenazas la construcción de obras estructurales y no estructurales como por ejemplo, mallas de protección de taludes, cunetas de coronación, desviadores de flujo, bermas con desarenadores y otras estructuras que permitan reducir la energía de la acción del flujo de agua de la escorrentía superficial principalmente. Cabe mencionar que el compromiso de las autoridades competentes para el monitoreo en las zonas de alta probabilidad de movimientos en masa.

Este aporte investigativo del análisis de estas amenazas por aluviones, puede ayudar a las Autoridades Municipales tanto en la Prefectura de Pichincha, como también en la Prefectura de Santo Domingo de los Tsáchilas, así como las instituciones vinculadas al tema de Gestión de Riesgos para reducir el riesgo de movimientos en masa con la reducción, mitigación, implementando medidas estructurales y no estructurales para reducir esta amenaza y así evitar que los sectores aledaños se vean perjudicados por los movimientos en masa en el aspecto socio-económico.

## BIBLIOGRAFÍA

Cando Jácome, M.; Martínez-Graña A. (2018). Numerical modeling of flow patterns applied to the analysis of the susceptibility to movements of the ground. *Geosciences*, 8, 340 pp. ISSN 2076-3263. Special Issue Tectonics and Morphodynamics. Categories: Geosciences Multidisciplinary (32/182- Q1). Impact Factor Scopus: 1.97. <https://doi.org/10.3390/geosciences8090340>

Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A. (2019). Differential interferometry, structural lineaments and terrain deformation analysis applied in Zero Zone 2016 Earthquake (Manta, Ecuador). *Environmental Earth Sciences*, 78:499. Ed.: Springer Nature. ISSN 1866-6280. Impact Factor JCR\_2018: 1.871. Categories: Water Resources (51/91- Q3), Geosciences Multidisciplinary (108/196-Q3). <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-019-8517-4>

Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A. (2019). Differential interferometry, structural lineaments and terrain deformation analysis applied in Zero Zone 2016 Earthquake (Manta, Ecuador). *Environmental Earth Sciences*, 78:499. Ed.: Springer Nature. ISSN 1866-6280. Impact Factor JCR\_2018: 1.871. Categories: Water Resources (51/91- Q3), Geosciences Multidisciplinary (108/196-Q3). <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-019-8517-4>

Díez Herrero, A. (. (2018). Geomorfología e hidrología fluvial del río Alberche: modelos y SIG para la gestión de riberas. Madrid: Instituto Geológico.

Gualavisí Llive, M. S. (2018). Cartografía geológica y zonificación de susceptibilidad de fenómenos de remoción en masa en la zona de influencia del tramo tres (KP 225 al KP 351) del Oleoducto de Crudos Pesados–OCP Ecuador SA . Quito: Quito: UCE.

Obregón, C. &. (2014). Aplicación del mapa de susceptibilidad por procesos de geodinámica superficial a la gestión territorial. Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas., 17-33.

Search, A. D. (15 de Junio de 2022). ASF Data Search - University of Alaska System. Obtenido de ASF Data Search - University of Alaska System: <https://search.asf.alaska.edu/#/>

SNGRE. (15 de Junio de 2015). Sistema Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencia. Obtenido de Sistema Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencia: <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/>

Tsáchilas, G. P. (15 de Junio de 2015). GAD Parroquial Santp Domingo de los Tsáchilas. Obtenido de <https://www.gptsachila.gob.ec/>

Vallejo, C. W. (2009). Evolución geodinámica de la cordillera Occidental (Cretácico tardío-Paleógeno). 142-144.

Baumann, V. (2018). Modelos de estabilidad de taludes para lahares inducidos por lluvia durante erupciones de larga duración. [https://www.researchgate.net/publication/326139979\\_Slope\\_stability\\_models\\_for\\_rainfall-induced\\_lahars\\_during\\_long-lasting\\_eruptions](https://www.researchgate.net/publication/326139979_Slope_stability_models_for_rainfall-induced_lahars_during_long-lasting_eruptions)

Bordino, J. (2018). Vulcanología: qué es y objetivos. <https://www.ecologiaverde.com/vulcanologia-que-es-y-objetivos-3646.html>

Castellet, E. B. (2018). Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. [https://www.researchgate.net/publication/236934961\\_Iber\\_-\\_Herramienta\\_de\\_simulacion\\_numerica\\_del\\_flujo\\_en\\_rios](https://www.researchgate.net/publication/236934961_Iber_-_Herramienta_de_simulacion_numerica_del_flujo_en_rios)

CEDEÑO, M. B. (2010). INTERPRETACIÓN DEL ESTUDIO MULTITEMPORAL (CLIRSEN 1969-2006) DE LAS COBERTURAS DE MANGLAR, CAMARONERAS Y ÁREAS SALINAS EN LA FRANJA COSTERA DEL ECUADOR CONTINENTAL. [http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/11985/1/Tesis\\_Maestria\\_Manuel\\_Bravo.pdf](http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/11985/1/Tesis_Maestria_Manuel_Bravo.pdf)

CLIRSEN. (2018). Centro de Levantamientos Integrados de Recursos



Naturales por Sensores Remotos - CLIRSEN.  
<https://www.igac.gov.co/es/contenido/centro-de-levantamientos-integrados-de-recursos-naturales-por-sensores-remotos-clirsen>

COOTAD. (2018). COOTAD. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/09/Resolución-SGR-105-2018.pdf#:~:text=140>  
del Código Orgánico de,de manera concurrente y de

Dietrich, G. E. (2018). Validación del Modelo de Deslizamientos Someros, SHALSTAB, para la gestión forestal.  
[https://www.researchgate.net/publication/284902139\\_Validation\\_of\\_the\\_Shallow\\_Landslide\\_Model\\_SHALSTAB\\_for\\_forest\\_management](https://www.researchgate.net/publication/284902139_Validation_of_the_Shallow_Landslide_Model_SHALSTAB_for_forest_management)

Fossen. (2018). geología estructural.  
<https://www.geologiaestructural.com/introduccion/>

Galofré, J. G. (2017). LA AMENAZA SÍSMICA.  
[https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/896/La\\_amenaza\\_sismica.pdf](https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/896/La_amenaza_sismica.pdf)

Garcia, D. (2017). Comparación de los resultados de la simulación de flujo de un modelo físico a escala con el modelo numérico utilizado por el software IBER 2D. <https://docplayer.es/76996698-Maestria-en-ingenieria-civil.html>

IBER. (2010). Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas.  
[file:///C:/Users/usuario/Downloads/Manual\\_Basico\\_Usuario\\_Iber.pdf](file:///C:/Users/usuario/Downloads/Manual_Basico_Usuario_Iber.pdf)

INSAR. (2018). Obtenga una imagen completa con los datos y la tecnología del radar de apertura sintética. [https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI-SARscape?gclid=Cj0KCQjwkOqZBhDNARIsAACsbfKjsjuGSSSzhpTy10ktvQxoVJTGe2ThFPMtKqK8epFZgja1U8U7mLkaArzsEALw\\_wcB](https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI-SARscape?gclid=Cj0KCQjwkOqZBhDNARIsAACsbfKjsjuGSSSzhpTy10ktvQxoVJTGe2ThFPMtKqK8epFZgja1U8U7mLkaArzsEALw_wcB)

Jácomey, M. C. (2018). Modelado Numérico de Patrones de Flujo Aplicado al Análisis de Susceptibilidad a Movimientos del Suelo.  
<https://www.mdpi.com/2076-3263/8/9/340>

MOKARRAM, M. (2017). DETERMINATION OF A TOPOGRAPHIC WETNESS INDEX USING HIGH RESOLUTION DIGITAL ELEVATION MODELS. <http://eurogeojournal.eu/articles/4>. DETERMINATION OF A TOPOGRAPHIC WETNESS INDEX USING HIGH RESOLUTION DIGITAL ELEVATION MODELS.pdf

NEC-SE-DS. (2018). Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-DS. <https://www.obraspublicas.gob.ec/norma-ecuatoriana-de-la-construccion-nec-se-ds/>

Oterino, B. B. (2017). Amenaza sísmica en América Central. [http://grupos.topografia.upm.es/sismo/data/P\\_1\\_22.pdf](http://grupos.topografia.upm.es/sismo/data/P_1_22.pdf)

Pérez, J. I. (2018). Modelación Hidráulica 2D de Inundaciones en Regiones con Escasez de Datos. El Caso del Delta del Río Ranchería, Riohacha-Colombia. [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642018000400143&lng=en&nrm=iso&tlng=en](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642018000400143&lng=en&nrm=iso&tlng=en)

Persistent Scatterers. (2018). Persistent Scatterers. [https://up42.com/blog/tech/how-persistent-scatterer-interferometry-is-used-to-predict-and-prevent#:~:text=What is Persistent Scatterer Interferometry,Synthetic Aperture Radar \(PSInSAR\).](https://up42.com/blog/tech/how-persistent-scatterer-interferometry-is-used-to-predict-and-prevent#:~:text=What is Persistent Scatterer Interferometry,Synthetic Aperture Radar (PSInSAR).)

SENPLADES. (2018). Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES) de Ecuador. <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/instituciones/secretaria-nacional-de-planificacion-y-desarrollo-senplades-de-ecuador>

SNGR. (2018). Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. <https://cambioclimatico-regatta.org/index.php/es/instituciones-clave/item/secretaria-nacional-de-gestion-de-riesgos-sngr>

William Dietrich. (2018). SHALSTAB. <http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/shalstab/index.htm>

YACUPUGRU. (1985). INFORME FINAL. Control de la erosión y

escurrimiento de las laderas del Pichincha QUEBRADA YACUPUGRU. U.S. Agency For International Development. <https://docplayer.es/14295472-Informe-final-control-de-la-erosion-y-escurrimiento-de-las-laderas-del-pichincha-quebrada-yacupugru-u-s-agency-for-international-development.html>

### Document Information

---

Analyzed document	TESIS FINAL JORGE CAMACHO.pdf (D155525707)
Submitted	1/11/2023 10:40:00 PM
Submitted by	
Submitter email	jorge.camacho@ueb.edu.ec
Similarity	6%
Analysis address	apaucar.ueb@analysis.arkund.com

### Sources included in the report

---

### Entire Document

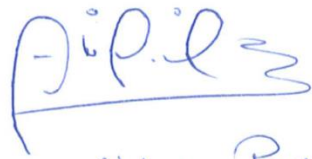
---

### Hit and source - focused comparison, Side by Side

---

**Submitted text** As student entered the text in the submitted document.

**Matching text** As the text appears in the source.

  
Dr. Abelardo Paucar  
Coordinador Maestría  
Percepción y Gestión de Riesgos  
11-ene-2023