

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Evaluación del riesgo frente a deslizamientos en la comunidad de Zumbahuayco,
cantón Azogues, provincia de Cañar.

INGE-2641

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería en Geología

Presentado por:

Jennifer Nicole Cueva Medina

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Dedico esta tesis con todo mi cariño y gratitud a las personas que hacen que cada uno de mis sueños se cumplan, a mis padres John y Jenny, por su incansable apoyo y por ser el pilar fundamental en mi vida y a mis hermanos Juan y Miguel, por su compañía, amor y por ser una fuente inagotable de alegría y motivación.

De igual forma a mis tíos que han sido indispensables en mi formación.

Este logro también es suyo.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis. A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y por creer en mí en cada paso de este camino. A mi tutor de tesis MSc. Ángel Valdiviezo, mis profesores MSc. Peter Olaya, MSc. David Altamirano y MSc (c) Enrique Colmont, quienes, con su sabiduría y guía, me han proporcionado las herramientas necesarias para alcanzar mis metas académicas. Al GAD Municipal de Azogues, MSc. Arián Briones y MSc. Joselyne Solorzano y al equipo del Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT). A mis amigos Adrián, Eudes, Elvis, Astrid, Ariana, Erick y Andrei por su amistad, colaboración y por ser una fuente constante de inspiración. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

Declaración Expresa

Yo Jennifer Nicole Cueva Medina acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 8 de octubre del 2024.



Jennifer Nicole Cueva Medina

Evaluadores

Joselyne Bárbara Solórzano Chauca

Profesor de Materia

Ángel Alberto Valdiviezo Ajila

Tutor de proyecto

Resumen

La comunidad de Zumbahuayco enfrenta recurrentes deslizamientos de tierra, resultado de suelos inestables, pendiente pronunciada y precipitaciones. Esto pone en riesgo la seguridad de 1,025 habitantes, afecta infraestructuras, limita actividades económicas agropecuarias y amenaza la sostenibilidad ambiental de la zona.

La evaluación del riesgo de deslizamientos en la comunidad tiene como objetivo evaluar el riesgo de deslizamiento en la comunidad de Zumbahuayco mediante un análisis integral para la identificación de las zonas susceptibles. Este estudio se justifica por la vulnerabilidad de la comunidad, condicionada por factores geológicos, climáticos y de uso del suelo. Se aplicaron técnicas avanzadas como Tomografías de Resistividad Eléctrica (ERT, por sus siglas en inglés), ensayos geotécnicos y análisis del modelo de talud infinito. Además, se integraron datos censales y geográficos mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) para un análisis integral.

Los resultados indican que las áreas de mayor amenaza se localizan en pendientes pronunciadas, caracterizadas por suelos arenosos de baja cohesión. El análisis de factores de seguridad (FS) mostró una marcada disminución de la estabilidad a profundidades superiores a 10 m, coincidiendo con zonas históricamente afectadas por deslizamientos. Asimismo, se identificaron 63 viviendas en riesgo, distribuidas principalmente en los sectores Pedregal, Portete y Rayoloma.

Se concluye que la comunidad requiere medidas urgentes como sistemas de drenaje adecuados, normas de construcción más estrictas y un sistema de alerta temprana (SAT) para fortalecer la gestión del riesgo. Estas acciones son esenciales para proteger a la población y reducir la exposición a futuros desastres.

Palabras clave: Deslizamientos, factor de seguridad, gestión del riesgo, exposición, estabilidad y SAT.

Abstract

The Zumbahuayco community experiences recurrent landslides caused by unstable soils, steep slopes, and intense rainfall. These events endanger the safety of 1,025 inhabitants, compromise infrastructure, disrupt agro-livestock economic activities, and pose a significant threat to the environmental sustainability of the area.

The risk assessment of landslides in the community aims to identify susceptible areas and propose strategies to mitigate impacts, thus promoting sustainable development. This study is justified by the community's vulnerability, conditioned by geological, climatic, and land use factors. Advanced techniques such as electrical resistivity tomography, geotechnical tests, and infinite slope model analysis were applied. Additionally, census and geographic data were integrated using geographic information systems (GIS) for a comprehensive analysis.

The results indicate that the areas of greatest threat are located on steep slopes characterized by low-cohesion sandy soils. The factor of safety (FS) analysis showed a marked decrease in stability at depths greater than 10 meters, coinciding with areas historically affected by landslides. Furthermore, 63 houses at risk were identified, mainly distributed in the sectors of Pedregal, Portete, and Rayoloma.

It is concluded that the community requires urgent measures such as adequate drainage systems, stricter construction regulations, and an early warning system (EWS) to strengthen risk management. These actions are essential to protect the population and reduce exposure to future disasters.

Keywords: Landslides, factor of safety, risk management, exposure, stability, EWS.

Índice general

Resumen	1
<i>Abstract</i>	2
Índice general	3
Abreviaturas	6
Simbología	8
Índice de figuras	10
Índice de tablas.....	11
Capítulo 1	13
1.1 Introducción.....	14
1.2 Descripción del Problema.....	16
1.3 Justificación del Problema.....	17
1.4 Objetivos.....	19
1.4.1 Objetivo general	19
1.4.2 Objetivos específicos.....	19
1.5 Antecedentes.....	19
1.6 Marco teórico.....	21
1.6.1 Deslizamiento o movimiento en masa	21
1.6.2 Inestabilidad de ladera.....	22
1.6.3 Componentes del riesgo	28
1.6.4 Riesgo de desastre por deslizamientos	32
1.6.5 Gestión del Riesgo	32
1.6.6 Métodos geofísicos.....	33
1.6.7 Propiedades geotécnicas del suelo	35
1.6.8 Factor de seguridad (FS)	36
1.6.9 Talud infinito.....	36
1.6.10 Sistema de Alerta temprana (SAT)	37

Capítulo 2	38
2.1 Zona de Estudio	39
2.1.1 Ubicación	39
2.1.2 Datos históricos	39
2.1.3 Aspectos socioeconómicos.....	40
2.1.4 Clima	40
2.1.5 Hidrografía	41
2.1.6 Geomorfología	41
2.1.7 Cobertura y uso del suelo	42
2.2 Marco Geológico	45
2.2.1 Contexto tectónico regional	45
2.2.2 Contexto geológico de Ecuador	46
2.2.3 Geología Regional.....	47
2.2.4 Geología Estructural.....	56
Capítulo 3.....	58
3.1 Selección metodológica	59
3.2 Metodología.....	61
3.2.1 Fase 1: Análisis de contexto.....	62
3.2.2 Fase 2: Análisis de la amenaza.....	63
3.2.3 Mapa de amenaza	76
3.2.4 Fase 3: Análisis de la vulnerabilidad.....	77
3.2.5 Fase 4: Análisis de la exposición	79
3.2.6 Fase 5: Análisis del riesgo.....	80
3.2.7 Fase 6: Hoja de ruta.....	81
Capítulo 4.....	83
4.1 Resultados.....	84
4.1.1 Cálculo de la amenaza.....	84

4.1.2	Cálculo de la exposición	101
4.1.3	Cálculo de la vulnerabilidad.....	103
4.1.4	Hoja de ruta	112
4.2	Discusión	119
Capítulo 5		121
5.1	Conclusiones.....	122
5.2	Recomendaciones	122
Referencias		124

Abreviaturas

ACR	Análisis Cuantitativo de Riesgos
DEM	Modelo Digital de Elevación
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ERT	Tomografía de Resistividad Eléctrica
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
FS	Factor de seguridad
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
IIGE	Instituto de Investigación Geológico y Energético
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
INIGEMM	Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico
IUGS	Unión Internacional de Ciencias Geológicas
MAGAP	Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PRECUPA	Prevención Ecuador Cuenca Paute
SAT	Sistemas de alerta temprana
SENAGUA	Secretaría Nacional del Agua
SIG	Sistema de Información Geográfica
SNGR	Secretaría Nacional de Gestión de Riegos
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
UNAE	Universidad Nacional de la Educación

UNISDR	Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas
UTM	Universal Transverse Mercator
ZFT	Trazas de fisión

Simbología**Simbología**

Ar	Argón
C	Centígrados
cm	Centímetros
E	Este
Fm.	Formación
H	Hora
Ha	Hectáreas
km	Kilómetros
KN	Kilo-Newton
KPa	Kilo-pascal
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
m	Metro
Ma	Millones de años
Mb.	Miembro
mm	Milímetro
MPa	Mega-Pascal
msnm	Metros sobre nivel del mar
N	Norte
NE	Noreste
NNE	Nornoreste
O	Oeste
Ohm	Ohmnios

Pb	Plomo
s	Segundo
S	Sur
SO	Suroeste
Sr	Estroncio
SSE	Sursureste
SSO	Sursuroeste
U	Uranio

Índice de figuras

Figura 1 <i>Deslizamientos a través del tiempo en Ecuador</i>	15
Figura 2 <i>Casa afectada en Zumbahuayco</i>	16
Figura 3 <i>Evidencias de los movimientos en masa en la comunidad</i>	18
Figura 4 <i>Clasificación por tipo de movimiento y material</i>	25
Figura 5 <i>Acciones tanto preventivas como reactivas sobre adaptación/gestión del riesgo</i>	33
Figura 6 <i>Componentes de un SAT</i>	37
Figura 7 <i>Mapa de ubicación</i>	39
Figura 8 <i>Esquema tectónico regional simplificado del margen de Ecuador</i>	45
Figura 9 <i>Mapa geológico del Ecuador</i>	46
Figura 10 <i>Mapa geológico del sur del Ecuador</i>	47
Figura 11 <i>Columna estratigráfica de la cuenca de Cuenca</i>	48
Figura 12 <i>Mapa geológico</i>	56
Figura 13 <i>Mapa Sismo–Estructural Regional asociado al sector de Zumbahuayco</i>	57
Figura 14 <i>Escalera de Abstracción</i>	61
Figura 15 <i>Diagrama de flujo de la metodología</i>	62
Figura 16 <i>Mapeo geológico</i>	66
Figura 17 <i>Cuarteo en la estructura de viviendas</i>	66
Figura 18 <i>Vuelo de dron</i>	67
Figura 19 <i>Equipos ETR</i>	68
Figura 20 <i>Calicatas para la toma de muestras</i>	70
Figura 21 <i>Ensayo de granulometría</i>	71
Figura 22 <i>Ensayo de límites de Atterberg</i>	72
Figura 23 <i>Ensayo de corte directo</i>	73
Figura 24 <i>Ensayo de permeabilidad</i>	74
Figura 25 <i>Mapa de ubicación de las ERT y calicatas</i>	75
Figura 26 <i>Mapa de ubicación de las viviendas</i>	86
Figura 27 <i>Grietas y escarpes en la comunidad</i>	87
Figura 28 <i>Mapa de suelos</i>	88
Figura 29 <i>Interpretación de la ERT (T01) empleando la configuración gradiente</i>	91
Figura 30 <i>Interpretación de la ERT (T01) empleando la configuración dipolo–dipolo</i>	91
Figura 31 <i>Interpretación de la ERT (T02) empleando la configuración dipolo–dipolo</i>	92
Figura 32 <i>Interpretación de la ERT (T03) empleando la configuración gradiente</i>	92

Figura 33 Interpretación de la ERT (T03) empleando la configuración dipolo–dipolo.....	93
Figura 34 Interpretación de la ERT (T04) empleando la configuración gradiente	93
Figura 35 Interpretación de la ERT (T04) empleando la configuración dipolo–dipolo.....	94
Figura 36 Interpretación de la ERT (T05) empleando la configuración gradiente	94
Figura 37 Interpretación de la ERT (T05) empleando la configuración dipolo–dipolo.....	95
Figura 38 DEM de la zona de estudio	95
Figura 39 Mapa de pendientes	96
Figura 40 Mapa de amenaza en base al FS con profundidad de entre 1–15 m	99
Figura 41 Mapa de FS vs casas afectadas	100
Figura 42 Mapa de exposición de las viviendas.....	101
Figura 43 Mapa de uso de suelo.....	102
Figura 44 Mapa de exposición por uso de suelo	103
Figura 45 Mapa de vulnerabilidad de las viviendas	104
Figura 46 Mapa de vulnerabilidad por el uso de suelo.....	105
Figura 47 Riesgo específico de viviendas.....	106
Figura 48 Riesgo específico de uso de suelo	108
Figura 49 Riesgo total a deslizamientos.....	110
Figura 50. Mapa de riesgo vs deslizamientos mapeados por el IIGE.....	111
Figura 51 Indicadores de inestabilidad de talud en la comunidad	112
Figura 52 Taludes críticos.....	114
Figura 53 Deslizamiento antiguo	114

Índice de tablas

Tabla 1 Indicadores de inestabilidad en ladera.....	27
Tabla 2 Cobertura y uso de la tierra y Sistemas productivos agropecuarios del Ecuador continental.....	43
Tabla 3 Posibles combinaciones para calcular la amenaza y el riesgo de deslizamiento.....	60
Tabla 4 Investigación de deslizamientos	64
Tabla 5 Ubicación de las ERT.....	68
Tabla 6 Ubicación de las calicatas y muestras	69
Tabla 7 Tiempo de ejecución de corte directo	73

Tabla 8 <i>Tipo de ensayo de permeabilidad</i>	74
Tabla 9 <i>Datos necesarios para aplicar Safety factor</i>	76
Tabla 10 <i>Valores designados</i>	77
Tabla 11 <i>Parámetros de resistencia y sus valores</i>	78
Tabla 12 <i>Valores de vulnerabilidad</i>	79
Tabla 13 <i>Resistencia de las viviendas afectadas</i>	84
Tabla 14 <i>Clasificación SUCS de los suelos</i>	89
Tabla 15 <i>Valores obtenidos en laboratorio de Geotecnia, FICT-ESPOL</i>	90
Tabla 16 <i>Rásters necesarios para Safety Factor</i>	97
Tabla 17 <i>Área en riesgo por escenario de la amenaza</i>	120

Capítulo 1

1.1 Introducción

Las montañas y cordilleras no solo constituyen impresionantes paisajes, también son sistemas geo–socio–ecológicos complejos con un rol vital en la biodiversidad, los ciclos del agua y las comunidades humanas que viven en sus alrededores (Sarmiento et al., 2023). Sin embargo, estas zonas no están exentas de problemas, como son el cambio climático, el uso descontrolado del suelo, la explotación excesiva de los recursos, aumento de la población y la expansión urbana generando inestabilidad en las laderas, lo que deriva en deslizamientos de tierra o movimientos de masa (Alcántara-Ayala, 2021). Estos factores, que a menudo van de la mano, pueden intensificar los daños a las comunidades, las infraestructuras y los ecosistemas. Por ejemplo, la deforestación y el crecimiento desmedido de las ciudades elevan la probabilidad de que ocurran deslizamientos de tierra y lluvias torrenciales, mientras que, el cambio climático trae consigo fenómenos meteorológicos extremos más frecuentes (Alcántara-Ayala, 2024).

La posibilidad de que ocurran estos eventos –ya sean extremos o moderados– genera una amenaza real que se traduce en riesgos económicos, sociales y ambientales. Este riesgo depende de factores como la vulnerabilidad del entorno, la capacidad de recuperación de las personas y el ecosistema (Cardona, 2013).

Reconocer y comprender la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo es fundamental para implementar una buena gestión integral del riesgo. Este enfoque debe incluir no solo peligros climáticos, sino también geológicos y aquellos provocados por el ser humano o la tecnología (Cardona Arboleda et al., 2020).

El Ecuador debido a sus condiciones geológicas, geográficas y climáticas ha estado siempre expuesto al impacto de diversas amenazas geológicas e hidroclimáticas, como las originadas por deslizamientos o movimientos en masa (Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico (INIGEMM), 2013). En 2023, la Secretaría Nacional de Gestión de Riegos (SNGR) declaró cinco alertas por el alto riesgo de deslizamientos en Azuay,

Chimborazo, Cañar y Manabí de las cuales dos fueron alertas amarillas y tres alertas naranjas, a diferencia de los años 2021 y 2022 que solo hubo dos de estas alertas en todo el año (Beltrán, 2023). Ejemplos de estos deslizamientos que dejaron grandes pérdidas humanas y materiales fueron los deslizamientos de la Josefina en 1993, Alausí en 2023, La Gasca en 2024 y El Placer de Baños de Agua Santa en 2024 (Figura 1).

Figura 1 *Deslizamientos a través del tiempo en Ecuador*



Nota. Deslizamientos que han dejado víctimas mortales y grandes pérdidas económicas: a) La Josefina, b) Alausí, c) La Gasca y d) El Pacer. Tomado de El Telégrafo, (2023); El universo, (2024); Gualaceo, (2024); Lascano (2024).

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el riesgo de deslizamientos en la comunidad de Zumbahuayco, perteneciente al cantón Azuay, en la provincia de Cañar. Para ello, se emplearán técnicas geofísicas, estudios geomecánicos, mapeo geológico y análisis de datos censales, con el fin de identificar las zonas más susceptibles y proponer una hoja de ruta de medidas de mitigación potenciales.

1.2 Descripción del Problema

La comunidad de Zumbahuayco, con una población de 1025 habitantes según el censo de población y vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) en el 2022, por sus características geológicas y de uso del suelo, enfrenta diversos impactos debido a los deslizamientos de tierra presentes en su comunidad (Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), 2024) (Figura 2). Este tipo de fenómenos ponen en riesgo tanto la seguridad de los residentes como la estabilidad de las infraestructuras locales. La naturaleza del terreno en combinación con factores geológicos y climáticos hace que esta comunidad sea particularmente vulnerable a estos desastres (Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR), 2009).

Figura 2 Casa afectada en Zumbahuayco



Nota. Casa con daños estructurales por los impactos de deslizamiento en Zumbahuayco.

Los factores climáticos, como precipitaciones intensas, y el cambio en el uso del suelo, debido a actividades agrícolas o construcciones no planificadas, contribuyen a la desestabilización del terreno (Cardona Arboleda et al., 2020). Este fenómeno es altamente observable y susceptible de medición, lo que permite el análisis técnico de variables clave como la inclinación del terreno, la composición del suelo y la saturación de agua en las pendientes, a través de análisis geomecánicos y estudios geofísicos.

El proyecto se desarrolla en colaboración con el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de Azogues, una institución pública que tiene la responsabilidad de velar por el bienestar y la seguridad de las comunidades dentro de su jurisdicción. Esta colaboración garantiza que los resultados del análisis puedan ser aplicados en medidas concretas de mitigación y planificación territorial que reduzcan el riesgo de desastres en Zumbahuayco.

La relevancia actual de este problema radica en la necesidad de generar un plan de acción que mitigue los riesgos de deslizamientos, considerando el aumento de eventos extremos asociados al cambio climático. Es un tema que no solo afecta la calidad de vida de los habitantes, sino que también amenaza el desarrollo sostenible de la comunidad. La capacidad de observar, medir y analizar estas variables permitirá establecer una base sólida para la identificación de áreas con mayor susceptibilidad, prevenir daños mayores y tomar decisiones informadas en la gestión del territorio.

1.3 Justificación del Problema

La comunidad de Zumbahuayco enfrenta un grave riesgo de deslizamientos de tierra, afectando la seguridad de sus habitantes, de su infraestructura y, medios de vida (Figura 3). La importancia de resolver este problema radica en la necesidad de prevenir pérdidas humanas, económicas y ambientales. Los deslizamientos recurrentes en la zona han afectado directamente a las actividades económicas esenciales, como la agricultura y la ganadería, que son el sustento principal de la comunidad. Además, el aislamiento provocado por los deslizamientos interrumpe el comercio y el suministro de productos básicos, afectando el bienestar de la población.

Este proyecto no solo busca abordar una problemática local, sino que también se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), contribuyendo a la construcción de comunidades más resilientes y sostenibles. En primer lugar, el ODS 3 (Salud y Bienestar) se alinea al estudio con la meta 3.d, enfocada en mejorar la capacidad de alerta temprana y gestión de riesgos, ayudando a prevenir lesiones y pérdidas de vidas. En segundo lugar, el ODS 11 (Ciudades

y Comunidades Sostenibles) contribuye a la meta 11.b, promoviendo políticas que aumenten la resiliencia ante desastres mediante la identificación de zonas de alto riesgo y la planificación adecuada para mitigar el impacto de los deslizamientos. Finalmente, el ODS 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres) se refleja en la meta 15.4, al proteger y conservar los ecosistemas montañosos al evitar la pérdida de cobertura vegetal en áreas propensas a estos eventos, promoviendo así el uso sostenible de los recursos naturales (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2018).

Resolver este problema es crucial no solo para garantizar la seguridad de los habitantes, sino también para asegurar la continuidad de las actividades económicas y proteger los ecosistemas locales. Además, ofrece una oportunidad para contribuir a la gestión sostenible del territorio y el cumplimiento de metas globales que promuevan un desarrollo más inclusivo, resiliente y respetuoso con el entorno natural.

Figura 3 *Evidencias de los movimientos en masa en la comunidad*



Nota. a) Colapso de la pared de la escuela en Portete, b) Afectación en la vía Pedregal–Rayoloma, c) Deslizamiento en Portete, d) Zona de grietas en Pedregal, e) Escarpes en Rayoloma, f) Agrietamiento en vivienda en Pedregal y g) Agrietamiento en vivienda en Rayoloma.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el riesgo de deslizamiento en la comunidad de Zumbahuayco mediante un análisis integral para la identificación de las áreas susceptibles.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar las unidades litológicas presentes, sus propiedades geotécnicas, estructuras geológicas, procesos geomorfológicos activos y propiedades del subsuelo en la zona de estudio, para la determinación de la magnitud de la amenaza por deslizamiento.
2. Analizar la vulnerabilidad de la infraestructura y la exposición de la población a los deslizamientos, considerando factores socioeconómicos y ambientales.
3. Categorizar el riesgo por deslizamiento en los sectores de la comunidad, para la elaboración de una hoja de ruta de medidas de mitigación potenciales.

1.5 Antecedentes

En el año 2011 se realizó un estudio sobre el grado de afectación de las familias que han sufrido desintegración debido a la alta tasa de migración, producto de la crítica situación económica a la que se enfrenta la comunidad por la falta de fuentes de trabajo (Valarezo, 2011).

Para el año 2015 se publicó una tesis con el fin de la mejora vial y así incrementar el comercio entre comunidades vecinas (Molina, 2015). En el 2022 se emitió otra tesis en la zona debido a la necesidad de incorporar transportes mixtos, para la movilidad de personas y comercio en la cual se determinó la factibilidad de su implementación (Cabrera, 2022). Por último, Buestán & Saldaña (2023) realizaron un trabajo de tesis centrado en la necesidad de construir un puente sobre el río Deleg con el fin de conectar la comunidad de Ayancay y Zumbahuayco. Estos estudios reflejan la urgencia de la comunidad por implementar medidas y obras que impulsen el crecimiento económico, mejoren la conectividad y promuevan el bienestar de la población local.

El plan de ordenamiento territorial actualizado en 2015 para la parroquia Javier Loyola, donde se ubica la comunidad de Zumbahuayco, identificó dos factores principales que incrementan la susceptibilidad a deslizamientos en la zona:

- El primer factor es la **precipitación** provocando la saturación de los suelos y materiales superficiales. Este proceso de saturación disminuye drásticamente la resistencia al corte y reduce el ángulo de fricción de los materiales, lo que facilita su fractura y posterior movilización por efecto de la gravedad.
- El segundo factor es la **actividad antrópica**. Estudios realizados en la cuenca media y alta del río Paute, en el marco del Proyecto Prevención Ecuador–Cuenca–Paute (PRECUPA), han demostrado que, en la mayoría de los deslizamientos registrados, la intervención humana es un desencadenante común. Actividades como la deforestación, la construcción inadecuada de infraestructura y la modificación del uso del suelo contribuyen a la desestabilización de las laderas, agravando la vulnerabilidad del terreno.

La interacción entre estos dos factores naturales y antrópicos crea un escenario propicio para la ocurrencia de deslizamientos, particularmente en zonas con características geológicas y topográficas frágiles (GAD Parroquial Javier Loyola, 2015).

La comunidad de Zumbahuayco, ha experimentado problemas significativos de inestabilidad del terreno, lo que ha llevado a la manifestación de deslizamientos, grietas en el suelo, escarpes y grietas estructurales en viviendas. Esta zona está compuesta principalmente por rocas sedimentarias plegadas y depósitos volcanoclásticos, lo que, sumado a la presencia de fallas geológicas y la incidencia de eventos sísmicos, ha aumentado la vulnerabilidad del terreno a movimientos en masa. Un evento sísmico de magnitud 4.2 fue registrado en 2017, el que podría ser uno de los detonantes clave en la reactivación de alguna falla geológica, exacerbando las deformaciones del suelo en la región (IIGE, 2024).

En el 2021, la comunidad en conjunto con la alcaldía realizó la limpieza de quebradas, cunetas y colectores de agua lluvia como medida de mitigación por la presencia de deslizamientos, tomando como causa de estos movimientos en masa la infiltración del agua al suelo.

Las inspecciones técnicas realizadas en la comunidad por el IIGE en 2024 revelaron la presencia de grietas de tracción con aperturas que varían entre 0.3 y 60 cm, afectando tanto a las viviendas como a las vías de acceso. Los deslizamientos identificados incluyen movimientos rotacionales y traslacionales, que cubren un área de aproximadamente 121 ha, afectando tanto al sector de Pedregal como el de Rayoloma. En los dos sectores más afectados de la comunidad se identificaron un total de 29 viviendas perjudicadas, entre daños parciales y totales. La falta de trabajos de remediación y la saturación del terreno por la escorrentía superficial durante la temporada de lluvias incrementan el riesgo de que estos movimientos se reactiven (IIGE, 2024).

1.6 Marco teórico

1.6.1 Deslizamiento o movimiento en masa

Los deslizamientos o movimientos en masa son procesos exógenos que ocurren cuando una masa de suelo, detritos, rocas o hielo se desplaza cuesta abajo bajo la influencia de la gravedad. Estos movimientos están directamente relacionados con la inestabilidad de laderas y se producen cuando los esfuerzos cortantes exceden la resistencia al corte de los materiales de la pendiente. Existen múltiples factores que controlan estos procesos, los cuales pueden ser internos o externos (Cardona Arboleda et al., 2020).

Los deslizamientos pueden ser detonados tanto por factores naturales como la precipitación intensa, sismos o actividad volcánica, como por factores antrópicos tales como la deforestación, la construcción inadecuada y la mala planificación de sistemas de drenaje. Las precipitaciones, en particular, son uno de los principales detonantes, ya que incrementan la presión intersticial y reducen la cohesión del material, aumentando así la posibilidad de deslizamiento (Llano-Serna et al., 2015).

Existen diversas clasificaciones para los deslizamientos basadas en la morfología de la superficie de ruptura, el tipo y velocidad de movimiento, y las características de los materiales involucrados. Estas clasificaciones son esenciales para entender la dinámica de los movimientos en masa y realizar inventarios y cartografías que permitan su prevención y mitigación (Cardona Arboleda et al., 2020).

1.6.2 Inestabilidad de ladera

1.6.2.1 Mecanismos de inestabilidad de ladera

Estos mecanismos se refieren al tipo de movimiento de la masa inestable, los principales son el vuelco, caída, deslizamiento, flujos y expansión lateral. Cuando alguno de estos movimientos se combina se los llama movimientos complejos (Figura 4) (Varnes, 1978).

- Los **desprendimientos o caídas** son movimientos rápidos a extremadamente rápidos en los que una masa de cualquier tamaño se desprende de una pendiente pronunciada o acantilado, desplazándose principalmente por el aire en caída libre, o rodando y rebotando. Este fenómeno ocurre a lo largo de una superficie donde no se produce un desplazamiento cortante significativo. Las caídas pueden ser precedidas por movimientos menores que favorecen la separación progresiva de la masa desde su origen. Las caídas de rocas ocurren cuando una masa se desprende directamente de un lecho rocoso, mientras que las caídas de escombros involucran fragmentos detríticos que ya estaban sueltos (Varnes, 1978).
- Los **vuelcos** han sido reconocidos recientemente como un tipo de movimiento distinto, caracterizado por la rotación hacia adelante de una o más unidades alrededor de un punto de pivote, bajo la influencia de la gravedad o de fuerzas ejercidas por unidades adyacentes o fluidos en grietas. Este movimiento inclina la masa sin provocar un colapso inmediato (Varnes, 1978).
- Los **deslizamientos** se caracterizan por el desplazamiento de una masa de tierra a lo largo de una o varias superficies de ruptura, visibles o inferidas, que implican deformación

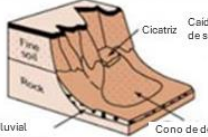
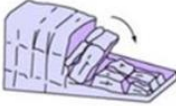
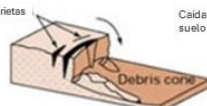
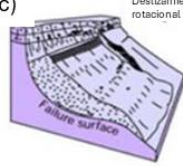
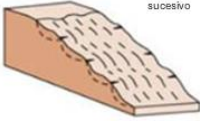
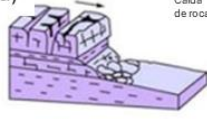
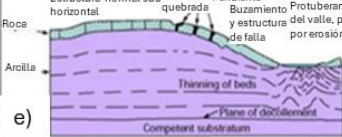
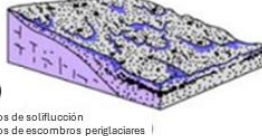
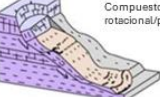
cortante. Este movimiento puede ser progresivo, es decir, la falla no ocurre de manera simultánea a lo largo de toda la superficie de ruptura, sino que se propaga desde un área de falla inicial. La masa desplazada puede continuar moviéndose más allá de la superficie de ruptura hacia lo que era la superficie original del terreno, creando una nueva superficie de separación. Los deslizamientos se clasifican principalmente en rotacionales y traslacionales, distinción clave en el análisis de estabilidad y diseño de métodos de control (Varnes, 1978).

- Los **deslizamientos rotacionales** son un tipo común de movimiento de masa en el que el desplazamiento ocurre a lo largo de una superficie de ruptura cóncava, lo que resulta en un giro rotacional hacia abajo. Estos deslizamientos pueden estar influenciados por fallas, juntas y otras discontinuidades preexistentes en los materiales geológicos, lo que afecta tanto la forma de la superficie de ruptura como la dirección del movimiento. En muchos casos, la superficie de ruptura adopta una forma curva o cilíndrica, con grietas concéntricas que indican la dirección del deslizamiento. Los bloques afectados por este tipo de movimiento tienden a inclinarse hacia atrás, acumulando agua y perpetuando la inestabilidad de la pendiente (Varnes, 1978).
- En los **deslizamientos traslacionales**, la masa de tierra se desplaza hacia abajo o hacia afuera a lo largo de una superficie plana o suavemente ondulada. La masa en movimiento generalmente se desliza sobre la superficie original del terreno, y su avance puede continuar indefinidamente si la inclinación de la superficie y la resistencia al corte son favorables. Los deslizamientos traslacionales suelen estar controlados estructuralmente por superficies de debilidad, como fallas, planos de estratificación y variaciones en la resistencia al corte. A medida que el contenido de agua o la velocidad aumentan, la masa del deslizamiento puede transformarse en un flujo, existiendo una amplia gradación entre ambos tipos de movimientos (Varnes, 1978).

- Los **deslizamientos laterales** se caracterizan por una extensión lateral predominante, facilitada por fracturas de cizalla o tracción. Se pueden distinguir dos tipos principales de movimientos. El primero involucra movimientos distribuidos que resultan en una extensión general sin una superficie basal de cizalla bien definida o una zona de flujo plástico reconocida, y suelen ocurrir en roca madre, especialmente en las crestas de las cordilleras. El segundo tipo implica la fracturación y extensión de materiales coherentes, ya sea roca madre o suelo, debido a la licuefacción o el flujo plástico de material subyacente. Las unidades superiores coherentes pueden hundirse, trasladarse, rotar, desintegrarse o incluso licuarse y fluir. Estos deslizamientos laterales pueden combinar elementos de rotación, traslación y flujo, por lo que se consideran fallas complejas (Varnes, 1978).
- Los **flujos** son un tipo de movimiento de ladera que no encaja en las categorías de caídas, derrumbes, deslizamientos o expansiones laterales. En materiales no consolidados, estos movimientos suelen manifestarse como flujos evidentes, que pueden ser rápidos o lentos, y pueden ocurrir tanto en condiciones húmedas como secas. En roca madre, los movimientos más difíciles de clasificar incluyen aquellos extremadamente lentos que ocurren a través de múltiples fracturas cercanas entre sí, pero no interconectadas, o los que resultan en plegamientos, curvaturas o abultamientos. Estos movimientos a menudo presentan una distribución de velocidades similar a la de los fluidos viscosos, por lo que se consideran una forma de flujo en roca intacta (Varnes, 1978).
- Los **movimientos complejos** involucran una combinación de varios tipos principales de movimiento, ya sea en diferentes partes de la masa en movimiento o en diversas etapas de su desarrollo. Estos movimientos, denominados deslizamientos complejos, pueden incluir desde caídas de rocas hasta flujos de escombros. Un ejemplo de gran relevancia sucedió con la catástrofe del terremoto de 1970 en Perú, donde un flujo masivo de rocas, hielo y tierra descendió desde el monte Huascarán a velocidades de hasta 335 km/h, enterrando las

ciudades de Yungay y Ranrahirca y causando la muerte de más de 18000 personas. Este tipo de deslizamientos complejos, con su inmensa energía cinética, pueden estar parcialmente lubricados por cojines de aire o vapor, lo que contribuye a su alta velocidad y baja fricción, según diversos estudios (Varnes, 1978).

Figura 4 Clasificación por tipo de movimiento y material

	Material	
	Tipo de movimiento	
	Roca	Suelo
Caídas	a)  Caída de roca	 Cicatriz Caída de suelo Coluvial Cono de detritos
	b)  Caída de roca	 Grietas Caída de suelo Debris cone
Deslizamientos	c)  Deslizamiento rotacional simple Failure surface	 Deslizamiento rotacional sucesivo
	d)  Caída de roca	 Caída de suelo
Laterales	e)  Estructura normal sub-horizontal, Pendiente, Buzamiento y estructura de falla, Protuberancia del valle, plano por erosión, Thinning of beds, Plane of décollement, Competent substratum	 Caída de suelo
Flujos	f)  Flujos de soliflucción, Flujos de escombros periglaciares	 Flujo de suelo o todo
Complejos	g)  Deslizamiento de rocas y suelo	 Compuesto no-circular parte rotacional/parte traslacional

Nota. a) Desprendimientos o caídas, b) Vuelcos, c) Deslizamientos rotacionales, d) Deslizamientos traslacionales, e) Deslizamientos laterales, f) Flujos, g) Movimientos complejos.

Modificado de Sacoto (2022).

1.6.2.2 Factores que rigen la inestabilidad de ladera

Los procesos que generan inestabilidad en las laderas están influenciados por factores externos e internos. Los **factores externos** aumentan las fuerzas que actúan sobre una ladera, como los cambios en su geometría debido a la erosión, socavación, incisión de ríos o excavaciones artificiales, así como las cargas adicionales, los efectos de sismos, vibraciones por explosiones o maquinaria pesada, y las variaciones en el régimen hidrológico causadas por precipitaciones intensas o prolongadas. Estos factores facilitan que las fuerzas motoras afecten la estabilidad de la ladera. Por otro lado, los **factores internos** se relacionan con las características intrínsecas de los materiales de la ladera, como su composición, textura, grado de intemperismo y propiedades físico-químicas, los cuales pueden reducir la resistencia de la ladera con el tiempo. Las actividades humanas, como la minería mal planificada y la deforestación, también juegan un papel importante en la modificación de la estabilidad de las laderas, alterando su geometría y afectando la estructura e hidrología del suelo, lo que aumenta la susceptibilidad a procesos de remoción de masa (Alcántara-Ayala et al., 1996).

1.6.2.3 Indicadores de inestabilidad

Los deslizamientos en laderas naturales presentan desafíos significativos que pueden manifestarse de diversas maneras (Tabla 1). La identificación temprana de los indicios de inestabilidad en el terreno permite implementar estrategias de monitoreo y prevención más efectivas. Es fundamental estar atentos a las modificaciones en el entorno, ya que la observación oportuna de estos cambios puede facilitar la implementación de medidas de mitigación desde las primeras etapas del proceso de deslizamiento, contribuyendo así a la reducción de riesgos asociados a estos fenómenos naturales (Alcántara-Ayala et al., 1996).

Tabla 1 *Indicadores de inestabilidad en ladera*

Indicios de Inestabilidad	➤ Ojos de agua, filtraciones o suelos saturados en áreas que generalmente no están húmedas
	➤ Desarrollo de grietas o abultamientos en el terreno
	➤ Estructuras que se han movido o inclinado
	➤ Inclinação o agrietamiento tanto de pisos como la cimentación de concreto
	➤ Ruptura de tubería y estructuras subterráneas
	➤ Inclinação de: postes, arboles, muros o cercos
	➤ Carreteras hundidas
	➤ Variación súbita del caudal de un río
	➤ Ventanas y puertas con espacios en los marcos y que no cierran fácilmente

Nota. Modificada de Alcántara-Ayala et al. (1996).

1.6.2.4 Características que indican el estado de actividad de un movimiento

Los **procesos de ladera activos** se manifiestan en la superficie del terreno a través de escalones, grietas y discontinuidades en la vegetación de las áreas afectadas. La naturaleza de esta actividad está relacionada con la velocidad del movimiento de terreno, y su impacto puede variar considerablemente en las comunidades adyacentes a la zona afectada (Alcántara-Ayala, I. et al., 1996).

Los **procesos de ladera inactivos** explican que la inestabilidad de las laderas no es un fenómeno permanente; los movimientos del terreno pueden evolucionar hasta restablecer las condiciones naturales de equilibrio. El intervalo de tiempo entre los estados de inestabilidad y estabilidad varía según los materiales involucrados y los factores que afectan dicha inestabilidad. En algunos casos, es posible identificar los movimientos en la superficie del terreno natural,

especialmente si los rasgos morfológicos de la ladera no han sido erosionados. Sin embargo, en ocasiones resulta difícil detectar áreas que han experimentado inestabilidad previamente. Una vez que ha ocurrido un movimiento de ladera en un lugar determinado, siempre existe la posibilidad de que este se reactive (Alcántara-Ayala et al., 1996).

La **reactivación de procesos** en una ladera indica que una ladera inactiva no debe ser descartada como una zona potencialmente peligrosa, ya que siempre existe la posibilidad de que los factores internos y externos que inicialmente provocaron la inestabilidad se vuelvan a presentar. Muchos de los movimientos de ladera que ocurren diariamente son el resultado de la reactivación de antiguas zonas inestables. Como parte de la dinámica natural de la superficie terrestre, las laderas tienden a desmoronarse y formar grandes depósitos. Con el tiempo, estos depósitos se consolidan, lo que puede dar la impresión de que la superficie es nuevamente estable. Sin embargo, frecuentemente, comunidades enteras se asientan sobre estos depósitos, y cualquier factor externo, como lluvias intensas y prolongadas o la construcción de infraestructuras en terrenos inadecuados, puede provocar la reactivación de los movimientos de ladera. En tales casos, las consecuencias pueden ser desastrosas, especialmente cuando se ven involucrados asentamientos humanos (Alcántara-Ayala et al., 1996).

1.6.3 Componentes del riesgo

La existencia de riesgo, y sus características particulares, se explica por la presencia de determinados factores los cuales influyen en que sus consecuencias sean mayores o menores.

El riesgo de deslizamientos o movimientos en masa surge de la interacción de diversos factores que determinan la magnitud y las posibles consecuencias de estos eventos. La presencia de factores geológicos, geomorfológicos, meteorológicos y humanos influye directamente en la probabilidad de que ocurran estos fenómenos y en la severidad de sus impactos. En este sentido, las características particulares del riesgo dependen de la exposición de las comunidades, la

vulnerabilidad de las infraestructuras y los ecosistemas, así como de las intervenciones humanas que pueden intensificar la inestabilidad de las pendientes (Lavell, 2001).

1.6.3.1 Amenaza

La amenaza de deslizamientos se refiere a procesos geológicos y geomorfológicos que resultan en la inestabilidad de las laderas, lo que puede causar daños significativos a comunidades, infraestructuras y el medio ambiente. Estos fenómenos pueden ser desencadenados por procesos naturales, como precipitaciones intensas o sismicidad, pero también pueden ser el resultado de prácticas humanas inadecuadas, lo que los convierte en amenazas socionaturales (Cardona Arboleda et al., 2020; Alcántara-Ayala, 2023).

Los deslizamientos, cuando son estrictamente de origen natural, se deben a factores como la saturación del suelo por lluvias prolongadas, lo que incrementa la presión intersticial y reduce la cohesión de los materiales en las laderas, haciéndolas más propensas al colapso. Sin embargo, en muchos casos, los deslizamientos están influenciados por actividades humanas como la deforestación, la construcción de infraestructuras inadecuadas, la minería no regulada, y la falta de planificación en sistemas de agua y alcantarillado. Estas intervenciones en el ambiente natural incrementan la vulnerabilidad de las laderas y exacerban los riesgos asociados (Cardona Arboleda et al., 2020).

El cambio climático también es un factor que amplifica la amenaza de deslizamientos, ya que el aumento de la frecuencia y magnitud de precipitaciones intensas, derivadas del calentamiento global, incrementa el riesgo de estos eventos. Este fenómeno aumenta la presión sobre los ecosistemas montañosos y agrava la inestabilidad de las laderas (Cardona Arboleda et al., 2020).

1.6.3.2 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad se refiere a las características y condiciones de las personas, grupos o sistemas que afectan su capacidad para anticipar, resistir, afrontar y recuperarse de los impactos

de un peligro, ya sea natural o antrópico. Esta vulnerabilidad no es homogénea, sino que varía en función de factores socioeconómicos, culturales, políticos y ambientales. Entre los factores que influyen en la vulnerabilidad se encuentran la clase social, la ocupación, el nivel de riqueza, el género, la etnia, la edad, la salud y el estatus migratorio (Blaikie et al., 2014).

Un aspecto central de la vulnerabilidad es el control de los medios de vida, es decir, los recursos económicos, sociales y físicos que un individuo o grupo tiene para satisfacer sus necesidades. Los medios de vida abarcan desde recursos materiales como la tierra o herramientas hasta redes sociales, conocimiento cultural y derechos legales (Blaikie et al., 2014).

La vulnerabilidad física ante movimientos en masa está determinada principalmente por las condiciones que hacen que los bienes y elementos expuestos, como viviendas, infraestructuras y servicios públicos, sean más susceptibles a sufrir daños en caso de un evento. Este tipo de vulnerabilidad es mayor cuando los elementos que están situados en áreas de riesgo tienen una construcción deficiente o están ubicados en zonas con problemas de tenencia de tierras. Además, en regiones donde los asentamientos humanos crecen informalmente y sin planificación adecuada, como áreas marginales, el riesgo se agrava por la ausencia de gobernanza, falta de control urbano y una baja resiliencia de las comunidades (Alcántara-Ayala, 2023).

1.6.3.3 Exposición

La exposición se refiere a la ubicación física de personas, infraestructuras y recursos en áreas que están potencialmente en riesgo frente a amenazas naturales. Este concepto es esencial para entender la vulnerabilidad de una comunidad o sistema frente a desastres, ya que determina qué y quiénes están en peligro directo ante un evento peligroso. Cuando las personas o bienes se encuentran situados en lugares propensos a fenómenos naturales como deslizamientos, huracanes o inundaciones, el riesgo aumenta significativamente (Alcántara-Ayala, 2023).

La exposición está directamente relacionada con la geografía y la infraestructura. En muchas ocasiones, los asentamientos humanos se establecen en áreas de riesgo, como laderas

inestables, zonas cercanas a ríos o en regiones propensas a huracanes y tormentas. Esto, sumado a una infraestructura vulnerable, mal diseñada o construida sin tener en cuenta las características del terreno, incrementa las probabilidades de daños graves. Además, los recursos productivos y naturales, como cultivos o redes de transporte, que se encuentran en estas áreas, también están expuestos a perderse o deteriorarse significativamente ante desastres (Cardona Arboleda et al., 2020).

El contexto socioeconómico también juega un papel determinante en la exposición. Las comunidades de bajos ingresos suelen asentarse en áreas más vulnerables debido a la falta de alternativas y recursos, lo que aumenta su exposición. Estas comunidades carecen de acceso a infraestructuras resistentes o a planes de mitigación, lo que incrementa la probabilidad de sufrir pérdidas graves en caso de desastres (Cardona Arboleda et al., 2020).

1.6.3.4 Riesgo

El riesgo de desastres se caracteriza por su relación directa con tres elementos clave: amenaza, vulnerabilidad y exposición. Las amenazas pueden ser de diversos orígenes (naturales, como deslizamientos, inundaciones, o terremotos; o inducidas por el hombre). La vulnerabilidad está determinada por las características socioeconómicas y físicas de los elementos expuestos, como las debilidades estructurales o las condiciones sociales de marginación. Por su parte, la exposición se refiere a la ubicación de personas, bienes e infraestructuras en áreas propensas a amenazas (Blaikie et al., 2014; Alcántara-Ayala, 2023).

El riesgo también puede cuantificarse en función de la probabilidad de ocurrencia de la amenaza y la magnitud de sus consecuencias. En este sentido, la gestión del riesgo incluye evaluar y mitigar estos factores mediante la implementación de políticas de prevención y reducción del riesgo, como la mejora de la infraestructura, la planificación territorial adecuada y el fortalecimiento de las capacidades de respuesta de las comunidades (Caleca et al., 2022).

1.6.4 Riesgo de desastre por deslizamientos

El riesgo de movimientos en masa se define como la probabilidad de que ocurra un deslizamiento de tierra o algún otro fenómeno de movimiento de masa, así como la severidad de sus efectos sobre la salud, los bienes materiales y el medio ambiente. Este tipo de riesgo está influenciado por factores geológicos, geomorfológicos, meteorológicos y humanos, que varían según el contexto territorial. La gestión del riesgo de movimientos en masa implica analizar y evaluar estos factores tanto a escala regional como en sitios específicos, lo que permite identificar áreas vulnerables y desarrollar políticas y estrategias de mitigación adecuadas (Alcántara-Ayala, 2024).

La evaluación del riesgo es fundamental para la gestión de desastres y la reducción de daños, ya que ofrece información crucial para la planificación territorial y la toma de decisiones. Además, estos riesgos son afectados por procesos socioambientales que pueden aumentar la vulnerabilidad y exposición de las comunidades. Por lo tanto, una adecuada gestión del riesgo debe considerar tanto las causas naturales del fenómeno como las intervenciones humanas que puedan exacerbar la inestabilidad de las pendientes (Marín et al., 2020; Alcántara-Ayala, 2024).

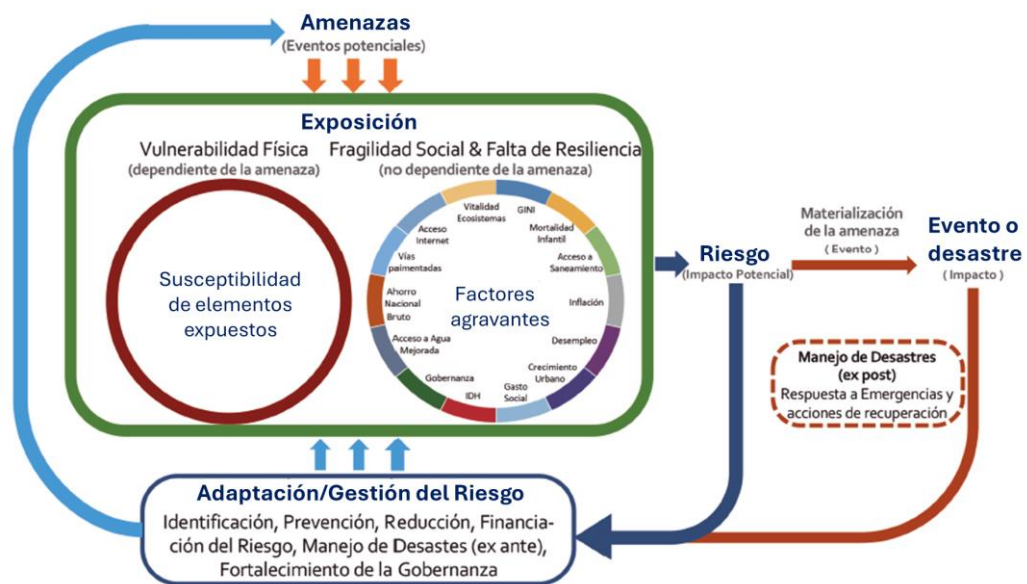
1.6.5 Gestión del Riesgo

La gestión del riesgo se refiere al proceso mediante el cual una sociedad o sus subgrupos influyen en los niveles de riesgo que enfrentan, con el objetivo de reducir su vulnerabilidad frente a posibles desastres. Este enfoque abarca tanto la identificación y evaluación de riesgos como el desarrollo de estrategias adecuadas para su mitigación, integrándose en la planificación del desarrollo territorial y ambiental. La gestión de la reducción del riesgo es un componente clave de esta visión, que busca no solo responder a desastres, sino prevenirlos mediante la incorporación del análisis de riesgo en todas las fases de planificación de proyectos (Figura 5).

De esta manera, la gestión del riesgo debe ser entendida como un pilar esencial en el desarrollo sostenible, al mismo nivel que los enfoques sobre el impacto ambiental o la equidad de

género. Es crucial adoptar una visión proactiva que incluya tanto medidas estructurales (como la estabilización de laderas en zonas propensas a deslizamientos) como no estructurales (por ejemplo, la planificación del uso del suelo o sistemas de alerta temprana), con el fin de minimizar tanto la probabilidad de desastres como las consecuencias que estos puedan acarrear (Lavell, 2001; Lacasse & Nadim, 2009).

Figura 5 Acciones tanto preventivas como reactivas sobre adaptación/gestión del riesgo



Nota. El identificar cada componente del riesgo permite generar una buena gestión del riesgo lo que implica llevar a cabo medidas que lo reduzcan y tener una respuesta eficiente.

Modificado de Cardona Arboleda et al. (2020).

1.6.6 Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos se pueden clasificar en dos grandes categorías: métodos pasivos y métodos activos. Los métodos pasivos, también denominados de **potencial natural**, se basan en la medición de los campos físicos generados de manera natural por la Tierra, sin la necesidad de introducir energía externa en el medio. Estos campos, como el gravitacional o el magnético, son consecuencia de las propiedades intrínsecas del planeta. Ejemplos destacados incluyen la gravimetría, que mide variaciones en el campo gravitacional causadas por cambios en la densidad

de los materiales subsuperficiales, y el geomagnetismo, que registra las anomalías en el campo magnético terrestre debido a la presencia de distintos tipos de rocas. Por otro lado, los **métodos activos o inducidos** requieren la inyección de energía al medio geológico para luego medir su respuesta. En este caso, la energía externa puede ser de naturaleza sísmica, eléctrica o electromagnética. Un ejemplo es la sísmica de reflexión o refracción, donde se generan ondas sísmicas y se registran las reflexiones y refracciones que ocurren en las interfaces entre diferentes capas geológicas. Otro ejemplo es la geoelectrica, como la ERT, en la que se inyecta corriente en el subsuelo y se mide la distribución de resistividades en función de la respuesta del terreno a la corriente aplicada (Scivetti, N., 2021).

1.6.6.1 Tomografías Eléctricas

La ERT es una técnica geofísica que utiliza la medida de resistividades de los materiales geológicos del subsuelo para obtener información detallada sobre su geometría y estructura. Se basa en la inyección de corriente eléctrica en el suelo a través de un conjunto de electrodos dispuestos a lo largo de una línea. Estos electrodos se configuran de diferentes maneras (como las configuraciones Wenner, Schlumberger o dipolo–dipolo), dependiendo de los objetivos del estudio y la profundidad a investigar (Barzaga et al., 2022; Scivetti, N., 2021).

El espaciado entre los electrodos es clave para el alcance y la resolución de la investigación. Cuando los electrodos están próximos, se obtienen mediciones más superficiales y de mayor resolución, lo que permite detectar pequeños detalles en las capas superiores. Por otro lado, cuando los electrodos se colocan más separados, se investiga a mayores profundidades, pero con menor resolución. Esto genera un perfil bidimensional o, en configuraciones avanzadas, una imagen tridimensional de los valores de resistividad, que representa variaciones en las propiedades del subsuelo, como la composición, humedad, o presencia de agua subterránea (Barzaga et al., 2022).

Los datos de resistividad obtenidos son interpretados mediante un software específico que utiliza un proceso iterativo de inversión. Este proceso consiste en ajustar un modelo teórico del

subsuelo a las mediciones reales, refinándolo en cada iteración hasta que los valores calculados se asemejan a los valores medidos. De esta manera, se logra determinar no solo la resistividad de las capas geológicas, sino también la profundidad y el espesor de estas (Barzaga et al., 2022).

1.6.7 Propiedades geotécnicas del suelo

En el marco de los estudios geotécnicos, la **granulometría** se utiliza para analizar la distribución de tamaños de partículas en un suelo. Esta propiedad es esencial para comprender la composición del suelo, evaluando la proporción de gravas, arenas, limos y arcillas. El análisis granulométrico se realiza comúnmente mediante dos métodos: el tamizado en seco, utilizado para partículas mayores a 0.075 mm, y el método de sedimentación, aplicado para partículas más pequeñas. Estos resultados son fundamentales para evaluar el comportamiento del suelo en términos de su capacidad de drenaje, compactación y su susceptibilidad a la erosión (Gonzalez De Vallejo et al., 2002).

Los **límites de Atterberg** son parámetros críticos que definen el comportamiento de suelos finos, como arcillas y limos, en función de su contenido de humedad. Los tres límites principales son el límite líquido (LL), el límite plástico (LP) y el límite de contracción. Estos límites determinan las transiciones entre los estados líquido, plástico y semisólido del suelo, y proporcionan información esencial sobre su plasticidad, la cual es clave para predecir su comportamiento bajo cargas. El límite líquido se determina utilizando la cuchara de Casagrande, mientras que el límite plástico se obtiene manipulando el suelo hasta que comienza a agrietarse. Estos parámetros son fundamentales para la clasificación de suelos y la evaluación de su capacidad para deformarse sin fracturarse bajo presión (Gonzalez De Vallejo et al., 2002).

El **ensayo de corte directo** es otra herramienta clave en la caracterización geotécnica, diseñada para medir la resistencia al corte del suelo. Este ensayo proporciona información esencial sobre la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo, parámetros críticos para evaluar la estabilidad de taludes y el diseño de cimentaciones. Durante el ensayo, el suelo se somete a un

esfuerzo tangencial bajo distintas tensiones normales, lo que permite determinar la capacidad del suelo para resistir esfuerzos cortantes sin experimentar un fallo estructural (Gonzalez De Vallejo et al., 2002).

La **permeabilidad** de un suelo, representada por el coeficiente k , mide la facilidad con la que el agua puede fluir a través de él y depende de características claves del terreno. En suelos granulares como las arenas, las partículas grandes generan poros amplios, lo que facilita el flujo de agua y minimiza las pérdidas de carga. Por el contrario, los suelos finos como las arcillas, con partículas diminutas y poros pequeños, ofrecen mayor resistencia al flujo, resultando en pérdidas de cargas significativas. Factores como la granulometría, la densidad del suelo y la forma y orientación de las partículas influyen en k , haciendo que este varíe ampliamente según el tipo de suelo, desde valores altos en arenas hasta extremadamente bajos en arcillas.

1.6.8 Factor de seguridad (FS)

El FS en ingeniería geotécnica es una medida clave para evaluar la estabilidad de un talud, comparando la resistencia al corte del suelo con los esfuerzos críticos que podrían causar su falla. Este parámetro, inicialmente planteado por Fellenius en 1922, se basa en el análisis de equilibrio límite, considerando fuerzas actuantes y resistentes a lo largo de una superficie de posible falla. Métodos adicionales, como probabilísticos, empíricos o el análisis por tajadas, permiten una evaluación más detallada, dividiendo el talud en segmentos para examinar su equilibrio individual y conjunto. Así, se determina si las condiciones del terreno son seguras frente a posibles deslizamientos (Suarez, 2009).

1.6.9 Talud infinito

El análisis de talud infinito es un método ampliamente utilizado para evaluar la estabilidad de pendientes largas donde las fallas suelen ocurrir paralelas a la superficie del terreno, típicamente en capas superficiales de suelo, detritos o roca. Este enfoque asume que cualquier columna de material representa el comportamiento general del talud, simplificando el cálculo del FS. Es

especialmente útil para estudios regionales de susceptibilidad a deslizamientos provocados por lluvias intensas o sismos, ya que permite identificar áreas de riesgo incluso cuando los datos geotécnicos son limitados. Su integración con sistemas de información geográfica (SIG) facilita la zonificación del peligro, convirtiéndolo en una herramienta esencial para la planificación de medidas preventivas en regiones vulnerables (Jibson et al., 2000).

1.6.10 Sistema de Alerta temprana (SAT)

Los deslizamientos representan una amenaza constante para las personas que habitan en lugares con pendientes pronunciadas, al incrementar la urbanización la cantidad de personas expuestas a sufrir algún tipo de daño a causa del desastre es cada vez mayor. Debido a esto, en la actualidad se está dando mayor preocupación a la gestión del riesgo, una de las formas de estar preparado e intentar minimizar los elementos afectados es la implementación del SAT (Carballo & Carazo, 2012).

Los SAT permiten obtener y procesar información de algún evento natural, comunicarla de forma oportuna y eficiente a la comunidad y gobernantes para que puedan tomar decisiones que disminuyan la cantidad de pérdidas (Carballo & Carazo, 2012). Para que un SAT sea efectivo debe estar integrado por cuatro componentes (Figura 6).

Figura 6 Componentes de un SAT



Nota. Tomado de Municipio de El Seibo - Municipio de Miches (2020).

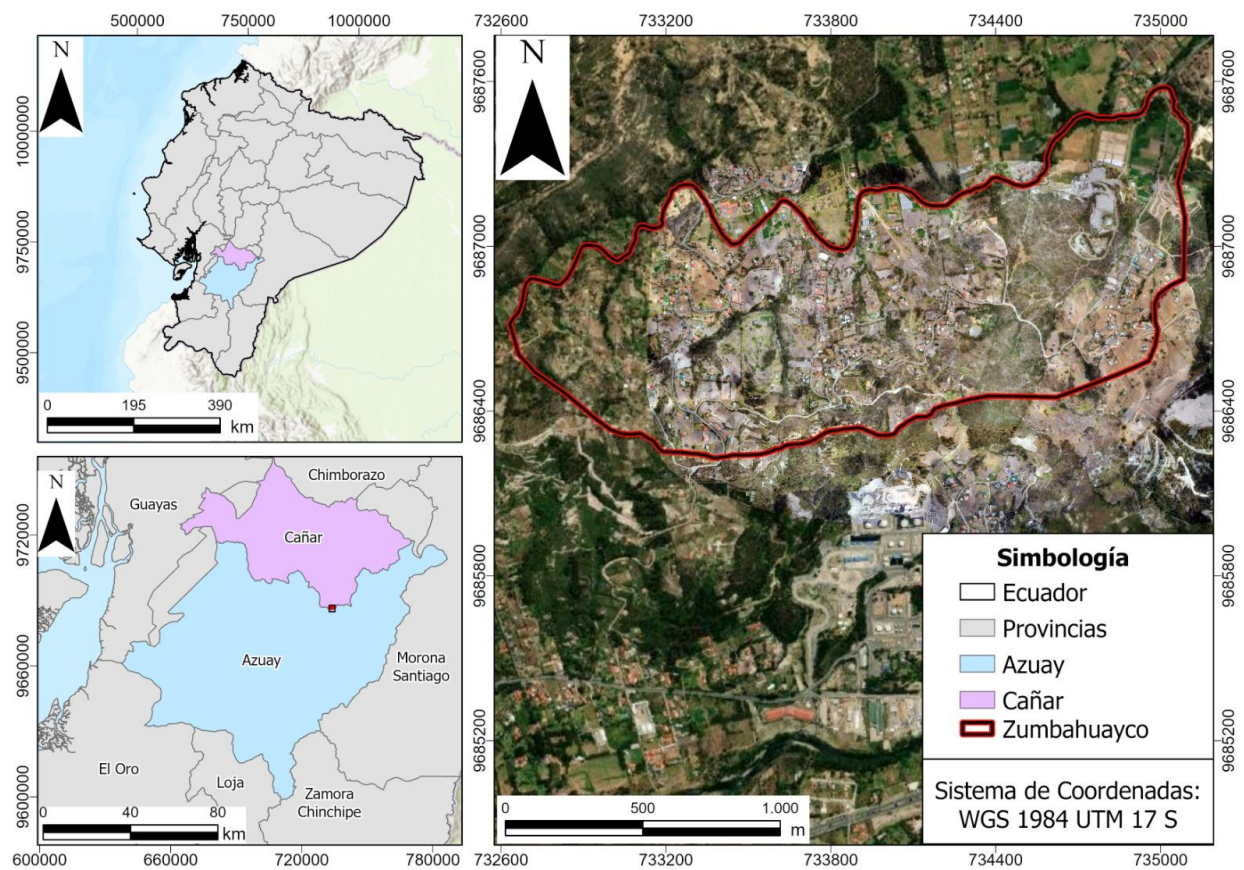
Capítulo 2

2.1 Zona de Estudio

2.1.1 Ubicación

La comunidad Zumbahuayco se encuentra ubicada al sur de la provincia de Cañar, en la frontera entre las provincias de Cañar y Azuay, dentro del cantón Azogues, específicamente en la parroquia Javier Loyola. Esta comunidad incluye sectores como Pedregal Alto–Bajo, El Portete y Rayoloma (Figura 7).

Figura 7 Mapa de ubicación



2.1.2 Datos históricos

La comunidad de Zumbahuayco, fue originalmente una gran hacienda que pertenecía a tres propietarios: Carlos Ordoñez, Miguel Ordoñez y Manuel Ordoñez, durante la presidencia de José María Velasco Ibarra en Ecuador. En sus inicios, hacia 1935, la comunidad era conocida como Anejo del Portete, y su primer presidente fue Manuel Jesús Zumba Naula, conocido en la región como taita Prado, quien desempeñó el cargo durante una década. Posteriormente, en 1943, la

comunidad adoptó el nombre de Zumbahuayco. En ese momento, la población estaba compuesta por 41 familias, que sumaban un total de 125 personas. La comunidad se organizó en cuatro sectores principales: El Portete, La Unión, Sector El Pedregal, y Sector Rayoloma (Maldonado, 2013).

2.1.3 Aspectos socioeconómicos

La comunidad inició con un total de 125 personas y en la actualidad cuenta con 1025 habitantes según el censo tomado por el INEC en el 2022. Presenta una ligera mayoría de mujeres con 524 sobre los hombres con 501. La mayoría de la población sabe leer y escribir con 484 personas, aunque se registran 61 personas en condición de analfabetismo. En cuanto a ocupación, una parte significativa de los trabajadores se dedica a labores agrícolas, ganadería o pesca, siendo estas actividades principalmente para el consumo del hogar. En términos de categoría de empleo, predominan los jornaleros o peones y trabajadores por cuenta propia. La distribución por edad muestra una mayoría en el rango de 15 a 64 años con 655 personas, seguido del grupo de menores de 14 años con 273 personas. La principal actividad económica es la agricultura, con un sector minoritario involucrado en otras actividades como comercio, construcción y educación (INEC, 2024).

2.1.4 Clima

El clima predominante en el cantón Azogues es el Ecuatorial Mesotérmico Semihúmedo, aunque en las zonas más elevadas se manifiesta un clima Ecuatorial de Alta Montaña. Las temperaturas promedio anuales varían entre 10°C y 16°C, y la precipitación anual fluctúa entre 500 mm y 3000 mm, dependiendo de la altitud y otros factores geográficos (MAGAP, 2014).

Para la comunidad de Zumbahuayco, la temperatura varía aproximadamente entre 11°C y 14°C y la precipitación fluctúa entre 500 mm y 1000 mm (Romero, 2015).

2.1.5 Hidrografía

El cantón Azogues, por su ubicación geográfica, forma parte de la vertiente hidrográfica del río Amazonas, la cual desemboca en el océano Atlántico. Específicamente, este cantón pertenece a la cuenca alta del río Paute, que a su vez es parte de la vertiente atlántica. Dentro del cantón, la subcuenca más significativa es la del río Burgay, que abarca una gran parte de la zona urbanizada (Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP), 2022).

De acuerdo con la división hidrográfica realizada por la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) en 2017, el área de estudio que comprende la comunidad de Zumbahuayco está clasificada dentro de dos unidades hidrográficas de nivel 6, correspondientes a la cuenca del río Paute y a la unidad hidrográfica 499829. Los drenajes principales de la zona de estudio están controlados predominantemente por la litología y los elementos estructurales, siguiendo una orientación preferente de este a oeste (E–O). Por otro lado, los drenajes secundarios y sus tributarios presentan una dirección preferencial de norte a sur (N–S). Estos sistemas menores confluyen en los drenajes principales y finalmente desembocan en el río Tomebamba, lo que refleja un sistema de drenaje jerarquizado y controlado por las variaciones estructurales del terreno (IIGE, 2024).

2.1.6 Geomorfología

En el cantón Azogues, dentro de la región Sierra, se identifican cuatro dominios fisiográficos bien diferenciados, cada uno con características geológicas y geomorfológicas particulares (IIGE, 2024):

- Cimas frías de las Cordilleras Occidental y Real: Este dominio abarca el 35,2% del territorio del cantón, principalmente en la zona central. Está compuesto por paisajes de páramo que presentan un modelado peri-glaciar y huellas glaciares poco definidas, además de relieves que marcan los bordes de estas cimas frías. Estas geoformas corresponden a

áreas de alta montaña donde predominan temperaturas bajas y paisajes moldeados por antiguos procesos glaciares.

- Vertientes y relieves de Cuencas Interandinas: Este dominio, el más extenso, cubre el 48,4% del área total del cantón, ubicándose principalmente en la zona nororiental. Está caracterizado por pendientes pronunciadas y relieves elevados, típicos de las cuencas interandinas. Estas geoformas corresponden a terrenos inclinados que se extienden entre las principales cordilleras andinas, representando el perfil montañoso de esta región.
- Relieves de fondo de Cuencas Interandinas: Este dominio se extiende por áreas casi planas o con suaves inclinaciones. Estas superficies, que forman parte del corredor interandino, se caracterizan por un modelado superficial uniforme, entre plano y ligeramente ondulado. Representa las zonas más bajas de las cuencas interandinas, con depósitos de sedimentos y suelos fértiles.
- Medio aluvial de Sierra: Con una extensión mucho menor, de solo 23 km², este dominio se asocia con las formas fluviales y los depósitos sedimentarios de los ríos actuales. El medio aluvial está compuesto por valles y planicies formadas por la acción de los ríos, cuyos drenajes se orientan principalmente hacia la cuenca amazónica, actuando como canales de transporte de sedimentos y agua en la región.

Estas geoformas reflejan la diversidad topográfica y climática del cantón Azogues, influenciada por su posición dentro de la región andina.

2.1.7 Cobertura y uso del suelo

En la parte norte y noroeste del cantón Azogues existe zonas de páramo, ocupando la zona más alta con cobertura de herbácea, frecuentemente saturada de agua; en el piso más bajo, la vegetación natural es de tipo matorral y en el piso superior se tiene cobertura herbácea (GAD Azogues, 2020).

La información recolectada del uso y cobertura de suelo fue tomada del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) emitida en el año 2020, separándolos en vegetación herbácea, zona antrópica, tierra forestal, tierra agropecuaria y tierra sin cobertura vegetal (MAGAP, 2014).

Esta zona se ha categorizada en base a tres niveles, detallados en la Tabla 2

Tabla 2 Cobertura y uso de la tierra y Sistemas productivos agropecuarios del Ecuador continental

Uso de suelo	Uso específico	Descripción
Vegetación herbácea		Áreas constituidas por especies herbáceas nativas con un crecimiento espontáneo, que no reciben cuidados especiales y son utilizadas con fines de pastoreo esporádico, vida silvestre o protección.
	Tierra arbustiva y herbácea	Áreas con un componente substancial de especies leñosas nativas no arbóreas. Incluye áreas degradadas en transición a una cobertura densa del dosel.
Zona antrópica	Infraestructura	Espacios contruidos o creados por el hombre que generan un servicio y que incluyen obras de infraestructura física.
Tierra forestal	Plantación forestal	Superficie arbolada que se obtiene de forma artificial por plantación de especies nativas o exóticas, que tienen

		los mismos años de vida y presentan una separación homogénea. Su objetivo es la obtención de productos madereros y no madereros.
	Pastizal	Vegetación herbácea dominada por especies de gramíneas y leguminosas introducidas, utilizadas con fines pecuarios, que, para su establecimiento y conservación, requieren de labores de cultivo y manejo.
Tierra agropecuaria		Son agrupaciones de especies cultivadas que se encuentran mezcladas entre sí y
	Mosaico agropecuario	que no pueden ser individualizadas; y excepcionalmente pueden estar asociadas con vegetación natural.
Tierra sin cobertura vegetal	Área erosionada	Áreas generalmente desprovistas de vegetación, que, por sus limitaciones edáficas, climáticas, topográficas o antrópicas, no son aprovechadas para uso agropecuario o forestal, sin embargo, pueden tener otros usos.

Nota. Tomado del mapa del MAGAP (2014).

2.2 Marco Geológico

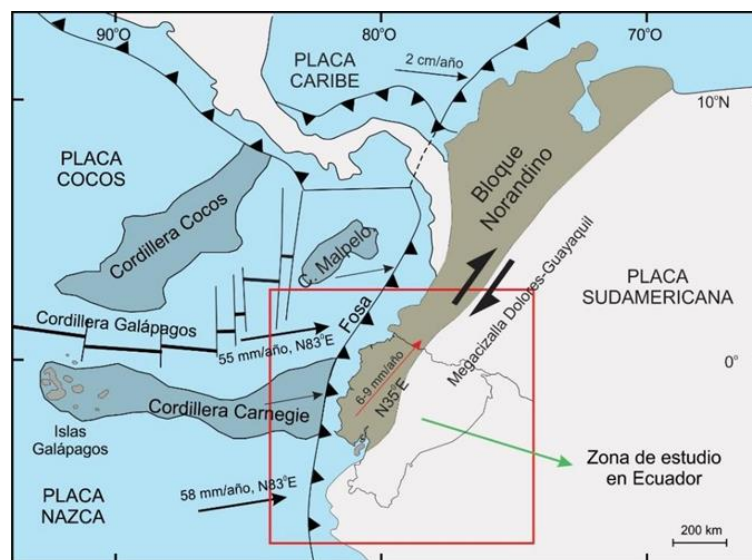
2.2.1 Contexto tectónico regional

El margen occidental de Ecuador está marcado por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, formando una trinchera oceánica. Este proceso es responsable del arco volcánico activo en el país (Tamay Granda, 2018). La placa de Nazca converge hacia Ecuador a una velocidad de entre 55 y 58 mm/año en dirección N83°E (Figura 8) (Nocquet et al., 2009).

La Cordillera Carnegie, formada hace 20–23 Ma por el paso de la placa de Nazca sobre el punto caliente de las Galápagos, subduce bajo el continente y podría extenderse hasta 500 km tierra adentro. Este fenómeno, que comenzó hace 1.8 Ma, ha incrementado la actividad sísmica y volcánica en la región (Gutscher et al., 1999; Collot et al., 2009; Egbue & Kellogg, 2010).

El movimiento del Bloque Norandino, relacionado con la subducción de la Cordillera Carnegie, genera un desplazamiento de 6 a 9 mm/año, afectando la subsidencia del Golfo de Guayaquil y atravesando fallas como la Pallatanga y la Chingual–La Sofía (Gutscher et al., 1999; Nocquet et al., 2009; Segovia et al., 2009).

Figura 8 Esquema tectónico regional simplificado del margen de Ecuador



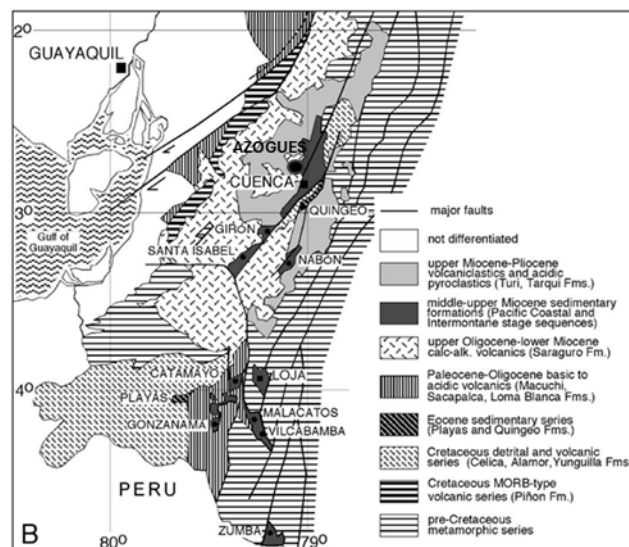
Nota. Tomado de Tamay Granda (2018).

2.2.3 Geología Regional

El área de estudio se encuentra en la región morfotectónica de cuencas intramontañas. Esta región experimentó dos fases de desarrollo. La primera, Mioceno Medio, se caracterizó por subsidencia extensional en la región interandina, lo que permitió la formación de la “Secuencia Pacific Coast”, vinculada a una sedimentación marina. La segunda fase, en el Mioceno Tardío, se asocia a compresión e inversión tectónica, lo que dio lugar a la “Secuencia Intramontañosa”, caracterizada por una sedimentación clástica continental (Figura 10) (Hungerbuhler et al., 2002).

La comunidad de Zumbahuayco se ubica dentro de la cuenca sedimentaria de Cuenca, limitada al norte por la Cordillera Occidental, al este por la Cordillera Real, al sur por la Cuenca Girón–Santa Isabel y al oeste por la región costera (IIGE, 2024).

Figura 10 Mapa geológico del sur del Ecuador



Nota. Mapa en el que se ubican las cuencas terciarias del sur del país. Modificado de Hungerbuhler et al. (2002).

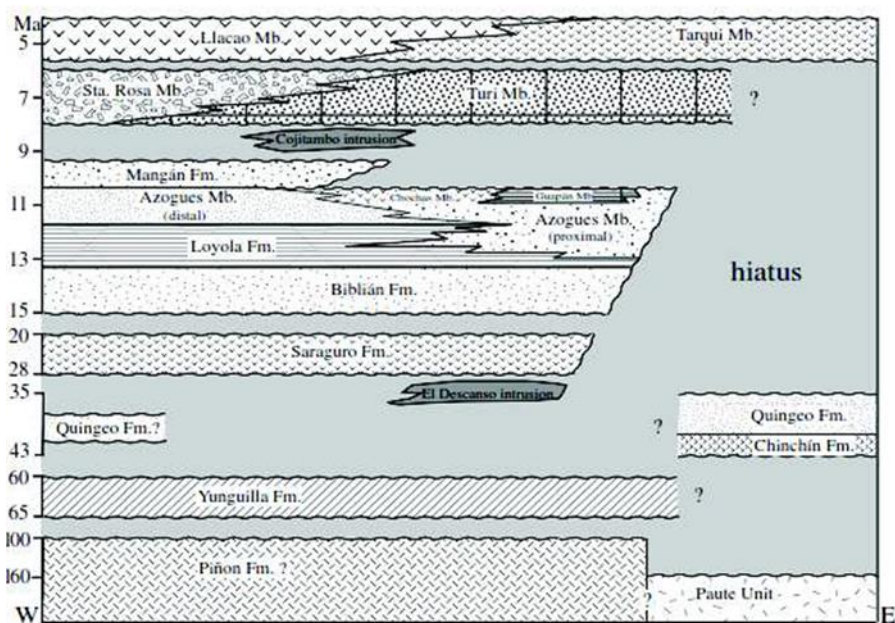
2.2.3.1 Cuencas intramontañas

El relleno de la cuenca de Cuenca se desarrolló durante el terciario superior en donde ocurrió una potente sedimentación continental en varias cuencas intramontañas de los Andes. Esta cuenca en específico es una depresión de forma alargada de unos 100 km de largo sobre unos

20 km de ancho, ubicada entre las cordilleras Occidental y Real a 2500 msnm, el relleno de esta cuenca está formado por sedimentos continentales intercalados con depósitos volcánicos (Lavenu & Noblet, 1990).

La secuencia sedimentaria–volcánica que rellena las cuencas de Cuenca y Cañar–Azogues, está constituida por las Formaciones Biblián del Mioceno inferior, que descansa en discordancia angular sobre la Formación (Fm.) Saraguro. La sedimentación sigue con los depósitos de las Formaciones Loyola y grupo Azogues del Mioceno superior a Plioceno (Figura 11) (Lavenu & Noblet, 1990; IIGE, 2024).

Figura 11 Columna estratigráfica de la cuenca de Cuenca



Nota. Tomado de Hungerbuhler et al. (2002).

2.2.3.1.1 Formación Biblián

Se localiza en la cuenca de Cuenca, toma su nombre de la localidad de Biblián en la provincia de Cañar (UTM: 734 750E; 9 699 635N). Sus principales afloramientos se encuentran en el centro del anticlinal de Biblián y a lo largo de la vía Azogues–Cuenca (Solís Alulima et al., 2022).

Litología: Está compuesta por alternancias de arcillas de colores púrpura, rojo y verde, que suelen estar erosionadas. Además, incluye estratos de areniscas de grano fino a medio (Hungerbuhler et al., 2002). En la base de la Fm se encuentran lentes de conglomerados finos con clastos de líticos, metamórficos y cuarzo de vetas. También se observan vetillas de yeso y sulfuros, posiblemente derivados de la reducción de sedimentos ricos en materia orgánica (Steinmann, 1997). Asimismo, se han identificado macrofósiles como fragmentos de caparazones de tortuga y huesos de toxodontes, además de foraminíferos bentónicos (Gonzaga Garzón, 2018).

Ambiente de depositación: Se depositó en un ambiente de llanuras de inundación, dominado por un sistema fluvial, aunque ocasionalmente se encuentran evidencias de canales de meandros (Steinmann, 1997). Este sistema fluvial indica un transporte de sedimentos predominantemente de sur a norte en trenzas y conos aluviales (Lavenu & Noblet, 1990).

Espesor: El espesor original se estimó entre 1200 y 1500 m (Noblet et al., 1988). Sin embargo, Steinmann en 1997 redujo esta cifra a menos de 300 m debido a una mejor discriminación de las unidades, diferenciando la Fm. Biblián de la Fm. Quingeo del Eoceno.

Relación estratigráfica: Se encuentra en contacto discordante sobre la Fm. Saraguro y en contacto concordante con la Fm. Loyola (Hungerbuhler et al., 2002).

Edad: Se ubicó en el Mioceno superior, basándose en el estudio de fósiles (Bristow, 1973). Estudios posteriores con dataciones de trazas de fisión (ZFT) establecieron un rango de edades entre 14,7 y 12,3 Ma (Hungerbuhler et al., 2002). Dataciones más recientes con U–Pb en circones por determinaron edades entre $15,7 \pm 0,5$ y $13,6 \pm 0,9$ Ma (George, 2019; Pilatasig Guamán, 2020).

2.2.3.1.2 Formación Loyola

Está ubicada en la cuenca de Cuenca y toma su nombre de la localidad de Loyola (Chuquipata), situada a unos 7 km al SSO de Azogues. Sus afloramientos principales se encuentran en los flancos del anticlinal de Biblián, con espesor reducido hacia el este del sinclinal de Azogues

(Bristow & Hoffstetter, 1977). La localidad tipo fue establecida en el trayecto Biblián–El Descanso, con afloramientos significativos en el sector de Sageo (Gonzaga Garzón, 2018).

Litología: Está compuesta por lutitas estratificadas de color pardo y gris claro, con abundantes óxidos de hierro y vetillas de yeso que le dan una coloración naranja en afloramientos. En su estado fresco, las lutitas son de color negro. También presenta intercalaciones de areniscas finas (al norte) y más gruesas (al sur), junto con conglomerados polimícticos cementados con calcita hacia el este de la cuenca (Gonzaga Garzón, 2018).

Fauna: contiene fósiles de moluscos, gastrópodos, esqueletos de peces, camarones y ostrácodos. Inicialmente, estos fósiles fueron considerados de origen marino (Hungerbuhler et al., 2002) aunque se sugiere que algunos de ellos podrían haber sido transportados desde la Fm. Yunguilla, lo que indicaría un entorno más continental (Verdezoto Villacis, 2006).

Ambiente de deposición: Los sedimentos se depositaron en un ambiente de baja energía que combina facies de abanicos marinos o salobres, junto con facies fluviales y lacustres (Hungerbuhler et al., 2002). Este entorno de prodelta se localizó en una plataforma marina, aunque se propone un ambiente continental–lacustre basado en análisis de isótopos de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) (Verdezoto Villacis, 2006).

Espesor: El espesor se estima en 450 m (Steinmann, 1997; Verdezoto Villacis, 2006).

Relación estratigráfica: Estratigráficamente, la Fm. Loyola tiene un contacto generalmente concordante con la Fm. Biblián, aunque se han observado discordancias de bajo ángulo con la Fm. Yunguilla en ciertas áreas, como la región de Santa Ana. Además, se evidencia un contacto gradacional con la sobreyacente Fm. Azogues (Steinmann, 1997).

Edad: Las dataciones en trazas de fisión han determinado edades entre $13,9 \pm 1,4$ Ma y $11,1 \pm 1,0$ Ma, correspondientes al Mioceno (Serravaliano–Tortoniano) (Steinmann, 1997; Hungerbuhler et al., 2002).

2.2.3.1.3 Formación Mangán

La Fm. Mangán pertenece a la cuenca de Cuenca y toma su nombre del sector de Mangán, ubicado al oeste de Nazón. Aunque los afloramientos en esta área corresponden a la Fm. Turi–Miembro Santa Rosa, la Fm. Mangán se depositó en el margen occidental de la cuenca, entre Cañar y Cuenca. Los mejores afloramientos se encuentran entre Ayancay (UTM: 733 500E; 9 688 800N) y Déleg (UTM: 731 250E; 9 693 135N), siendo esta última la localidad tipo (UTM: 731 162E; 9 691 229N) (Gonzaga Garzón, 2018; Solís Alulima et al., 2022).

Litología: Muestra una tendencia granocreciente con niveles de ceniza volcánica. La parte inferior se compone de alternancias de lutitas grises, verdes y rojas, junto con areniscas con estratificación cruzada. Hacia la parte superior, los sedimentos se vuelven más gruesos con la presencia de areniscas canalizadas y conglomerados que muestran subciclos. Los conglomerados tienen un origen metamórfico, con menor aporte volcánico. Además, se observan dos capas blancas de sílice, de 1 m a 2 m de espesor, usadas como marcadores, y se reporta la presencia de fauna continental, principalmente bivalvos y gastrópodos, junto con fauna marina en menor proporción (ostrácodos). También se encuentran macrofósiles, como taxodontes y perezosos (Gonzaga Garzón, 2018). En el oeste de la cuenca, se han identificado dos dominios de carbón, de un espesor promedio de 3 m, explotados artesanalmente (Solís Alulima et al., 2022).

Ambiente de depositación: Se depositó en un ambiente fluvial, caracterizado por llanuras, lagunas y zonas de tahuampas, que permanecen inundadas durante todo el año. Las condiciones tropicales interpretadas a partir del polen refuerzan esta hipótesis, mientras que los ostrácodos sugieren un ambiente de agua salobre. Otros estudios también indican la presencia de un sistema deltaico costero. El carbón presenta altos niveles de azufre (hasta un 6% en peso), lo que sugiere una deposición en un entorno de llanura costera (Hungerbuhler et al., 2002; Solís Alulima et al., 2022).

Espesor: El espesor estimado varía entre 1000 m y 1200 m, concentrado principalmente en el centro de la cuenca (Solís Alulima et al., 2022).

Relación estratigráfica: Está superpuesta discordantemente a la Fm. Azogues en la parte central y a la Fm. Loyola en el norte, donde la Fm. Azogues no aflora. Hacia la parte superior, presenta una discordancia angular pronunciada (60°) con la sobreyacente Fm. Turi, indicando un evento de deformación previo a su depositación (Solís Alulima et al., 2022).

Edad: Las dataciones realizadas por el método ZFT indican una edad entre $9,9 \pm 1,2$ y $9,5 \pm 1,0$ Ma, correspondiente al Mioceno (Hungerbuhler et al., 2002). Otros estudios, sugieren una edad de $11,5 \pm 0,3$ Ma (Verdezoto Villacis, 2006), mientras que el método U–Pb en circones detríticos y determinó una edad de $10,8 \pm 0,2$ Ma (Pilatasig Guamán, 2020). Estas edades sugieren una rápida sedimentación, particularmente en la parte inferior, asociada con ambientes deltaicos y fluviales costeros (Solís Alulima et al., 2022).

2.2.3.1.4 Formación Llacao

Aflora principalmente en la zona centro–occidental de la cuenca de Cuenca, donde conforma la planicie de la Loma Cochamama, localizada al suroeste de Azogues (UTM: 729 750E; 9 687 435N) (Solís Alulima et al., 2022).

Litología: Constituida mayormente por depósitos piroclásticos y volcanoclásticos, con predominancia de tobas de cristales. Se observan depósitos retrabajados de origen volcánico y aglomerados. En varios niveles, se presentan canales decamétricos con fragmentos líticos y pumíticos. En estos depósitos volcánicos, se encuentran cuerpos de arena y conglomerados que limitan lateralmente, donde los componentes son angulares y superan los 20 cm de diámetro (Solís Alulima et al., 2022).

Ambiente de depositación: Incluye abanicos aluviales, procesos de retrabajamiento aluvial y flujos de masa. Los sedimentos de origen volcánico se desplazan desde una fuente situada al

oeste, posiblemente en la Cordillera Occidental, y se dirigen hacia el este, lo que evidencia la influencia de una dinámica aluvial y volcánica (Solís Alulima et al., 2022).

Espesor: El espesor estimado es de aproximadamente 250 m, según los estudios realizados por Steinmann (1997).

Relación estratigráfica: Se superpone de manera discordante sobre las formaciones Mangán y Loyola, presentando una discordancia angular pronunciada de aproximadamente 60°. Además, tiene contacto interdigitado con el Miembro Chaparro, mientras que, hacia la parte superior, se cubre por depósitos cuaternarios no consolidados (Solís Alulima et al., 2022).

Edad: Las dataciones realizadas por el método de ZFT han asignado una edad de aproximadamente $5,1 \pm 0,6$ Ma (Plioceno, Zancleano) (Hungerbuhler et al., 2002). Otros estudios han proporcionado diferentes rangos de edad, como los análisis $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, que sugieren un rango de $10,77 \pm 1,30$ Ma a $7,81 \pm 0,16$ Ma (Verdezoto Villacis, 2006), mientras que un estudio más moderno indica una edad de $7,2 \pm 2,1$ Ma con el método de U–Pb (George, 2019).

2.2.3.1.5 Formación Azogues

La Formación Azogues pertenece a la cuenca de Cuenca, tomando su nombre de la ciudad de Azogues, ubicada en la provincia de Cañar. Los afloramientos más representativos del Miembro (Mb.) Azogues se encuentran a lo largo de la vía Cuenca–Azogues. Los afloramientos del Mb. Guapán se localizan al sur y en las inmediaciones de Azogues, mientras que el Mb. Cochas se manifiesta en afloramientos dispersos al este de Cuenca (UTM: 734 520E; 9 683 635N). Sin embargo, los últimos dos miembros tienen relevancia principalmente local (Solís Alulima et al., 2022).

Litología: El Mb. Azogues presenta dos facies principales. La facies proximal está formada por areniscas grises masivas de grano grueso, lutitas y limolitas con una tendencia regional hacia el noroeste. También se observan conglomerados masivos de canal en el sur, intercalados con limolitas, areniscas finas, paleosuelos y niveles de carbón. Se reportan fragmentos de madera e

impresiones de hojas en algunos estratos. En la facies distal, hacia el noroeste, se encuentran areniscas de color café, limolitas y lutitas con características turbidíticas. Además, se observan deformaciones sinsedimentarias, como slumps y diapiros de gran escala. El Mb. Guapán está compuesto por lutitas laminadas de colores oscuros (café y negro), areniscas tufáceas, diatomitas blancas y capas de arcilla, con remanentes fósiles de plantas, gasterópodos, moluscos y camarones. El Mb. Cochas incluye depósitos volcánicos primarios con niveles de tufitas grises a verdes, pumitas y conglomerados finos, evidenciando retrabajamiento de material volcánico (Solís Alulima et al., 2022).

Ambiente de depositación: El Mb. Azogues se depositó inicialmente en un sistema fluvial y aluvial, que posteriormente evolucionó hacia un sistema deltaico dominado por progradación hacia el noroeste. En cambio, el Mb. Guapán refleja un ambiente lacustre, posiblemente asociado a la progradación del delta fluvial del Mb. Azogues. El Mb. Cochas se formó en un ambiente de llanura aluvial.

Espesor: El Mb. Azogues alcanza un espesor de entre 400 m y 500 m. El Mb. Guapán llega a un espesor de hasta 200 m, mientras que el Mb. Cochas alcanza un máximo de 100 m (Lavenue & Noblet, 1990).

Relación estratigráfica: El contacto entre la Fm. Loyola y el Mb. Azogues es gradual, con interdigitaciones en ciertos lugares. Entre el Mb. Azogues y el Mb. Guapán existe un contacto transicional. La Fm. Mangán, se superpone al Mb. Azogues con una discordancia progresiva, indicando un evento tectónico previo a su deposición. El Mb. Azogues está atravesado por el intrusivo del Descanso.

Edad: Las dataciones radiométricas mediante ZFT realizadas por Steinmann (1997) para el Mb. Azogues indican edades entre $13,0 \pm 1,0$ y $11,9 \pm 1,2$ Ma. El Mb. Guapán tiene una edad de $11,5 \pm 1,4$ Ma, mientras que el Mb. Cochas presenta edades entre $11,0 \pm 1,0$ y $10,2 \pm 1,2$ Ma.

Estudios recientes de George en 2019 y Pilatasig en 2020 sugieren una edad de $13,0 \pm 0,8$ Ma para el Mb. Azogues mediante dataciones U–Pb en circones.

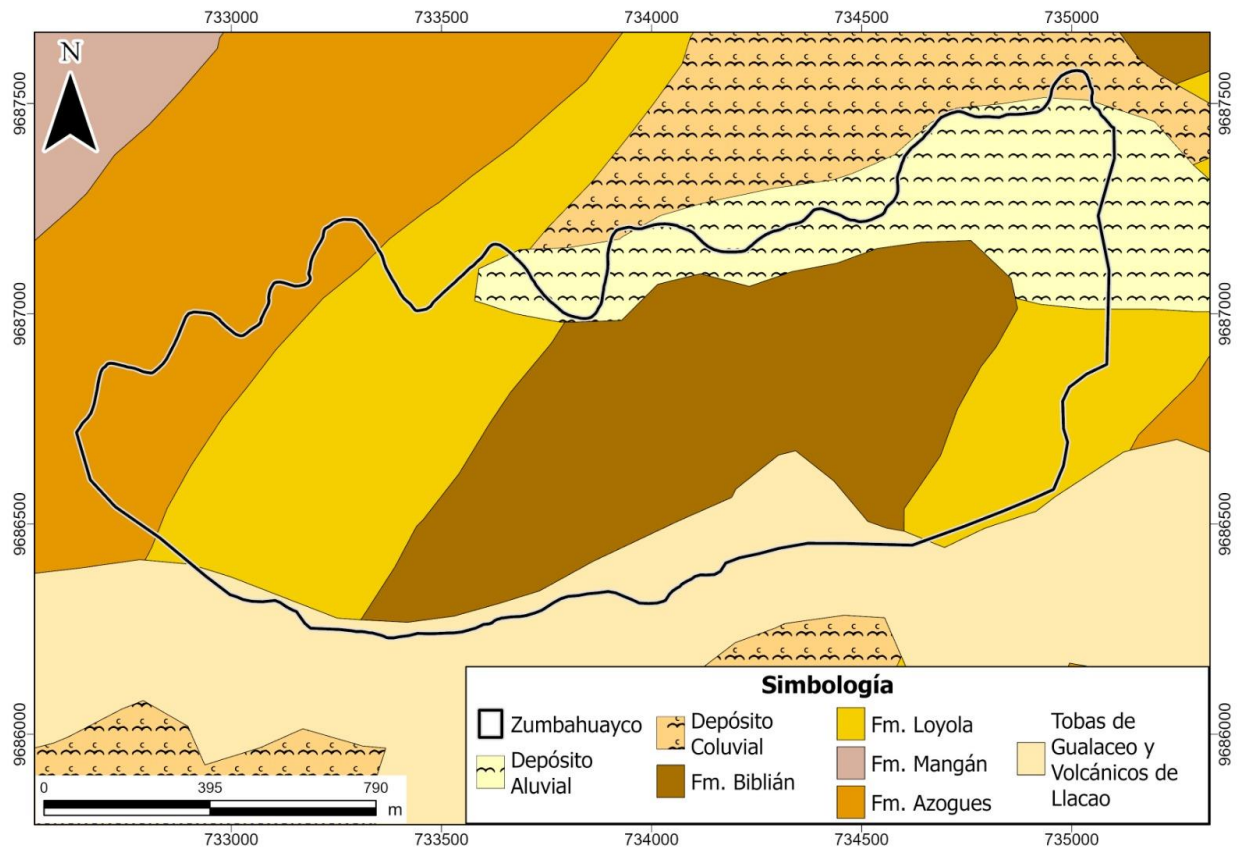
2.2.3.2 Depósitos cuaternarios

2.2.3.2.1 Depósitos Aluviales

Los depósitos aluviales y las terrazas correspondientes consisten en sedimentos poco o no consolidados, formados principalmente durante el Holoceno, y están estrechamente vinculados a la dinámica fluvial de esa época. Estos depósitos presentan un aporte clástico poligenético, es decir, una mezcla de diversos tipos de rocas y minerales, entre los que se incluyen andesitas, dacitas, tobas, brechas, tobas líticas, ignimbritas, lutitas, conglomerados, limolitas, areniscas, cuarzo, filitas y cuarcitas (IIGE, 2024).

Estos depósitos se desarrollan en las llanuras de inundación, donde el transporte fluvial genera una mezcla heterogénea de bloques, gravas y arenas limosas, que varían en proporción y composición. La morfología de los sedimentos oscila entre formas redondeadas y subangulares, dependiendo de la energía y dinámica del curso fluvial. En cuanto a su estabilidad geotécnica, los depósitos aluviales muestran una susceptibilidad moderada a procesos erosivos, especialmente en los márgenes fluviales. Los taludes naturales que se forman sobre estos sedimentos tienden a ser estables debido a las bajas pendientes de las llanuras aluviales, aunque los márgenes son propensos a la erosión fluvial, lo que puede generar inestabilidad localizada en ciertas áreas. Esta combinación de factores hace que, aunque estos depósitos sean generalmente estables, deban ser monitoreados en zonas donde la erosión fluvial sea más activa (GAD Parroquial Javier Loyola, 2015).

Estas Fm. se pueden observar en el mapa geológico con las Fm. obtenidas del MAGAP del 2019 (Figura 12).

Figura 12 Mapa geológico

Nota. Información geológica tomada del MAGAP (2019).

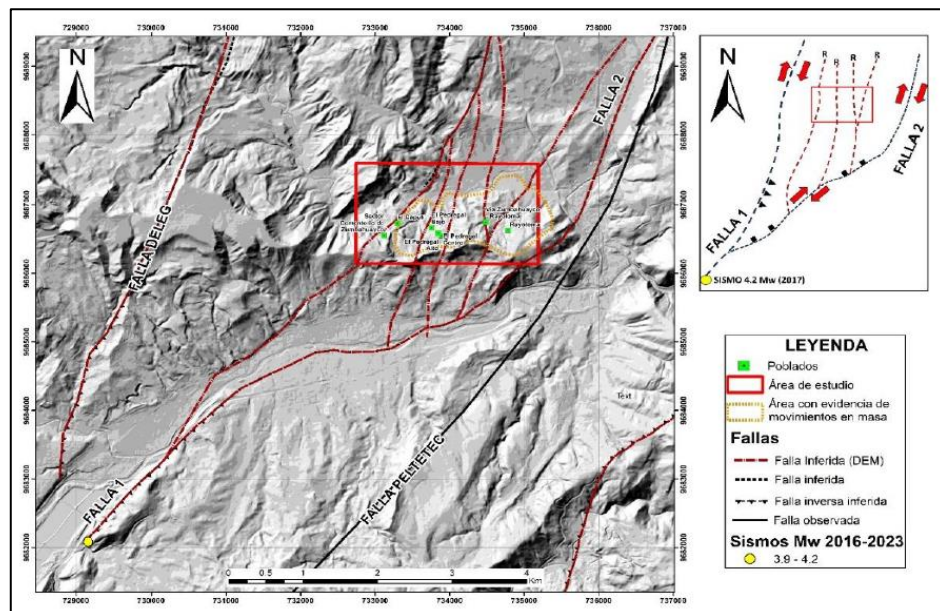
2.2.4 Geología Estructural

El área de estudio se sitúa en una zona de complejidad estructural significativa, delimitada por importantes sistemas de fallas. Al oeste se encuentra la falla Deleg, al este la falla Peltetec, y al norte la falla Toray (Figura 13). Entre las fallas Deleg y Peltetec, se han identificado dos lineamientos con orientación NNE–SSE, denominados como falla 1 y falla 2, respectivamente. Estas estructuras han sido interpretadas, indicando que la falla 1 presenta una cinemática inversa–dextral, mientras que la falla 2 es de carácter dextral. Adicionalmente, entre estas dos fallas se han identificado nuevos lineamientos a través de ortofotografías y modelos digitales de elevación, los cuales se asocian como fallas sintéticas de las fallas 1 y 2 (Figura 13) (IIGE, 2024).

Un aspecto clave en la dinámica tectónica de la zona es la recopilación de información sísmica entre los años 2016 y 2023 en el cantón de Azogues. En la Figura 13 se muestra la

localización de un evento sísmico de magnitud 4.2 registrado en 2017, situado en el extremo suroccidental de la falla 1. Este sismo podría haber actuado como un desencadenante para la reactivación de fallas regionales, afectando especialmente el sector de Zumbahuayco. Es relevante señalar que las deformaciones observadas en la zona de estudio parecen haber comenzado a manifestarse a partir de este evento sísmico en 2017, lo que sugiere una relación directa entre la actividad sísmica y los procesos de deformación tectónica en la región (IIGE, 2024).

Figura 13 Mapa Sismo–Estructural Regional asociado al sector de Zumbahuayco



Nota. Área marcada de la ubicación de la comunidad Zumbahuayco. Tomado de IIGE (2024).

Capítulo 3

3.1 Selección metodológica

A través del tiempo se han desarrollado diversas metodologías (Tabla 3) para lograr predecir el comportamiento de los diversos fenómenos naturales y sus posibles consecuencias y elementos expuestos en el área. Con estas metodologías se busca obtener un mapa en el que se detallen las zonas que están propensas a mayor peligro y así el gobierno responsable pueda tomar medidas de adaptación o gestión del riesgo antes de que suceda la amenaza (Bernabeu Garcia & Diaz Torres, 2014).

El uso de una metodología en específico para el análisis de la amenaza depende de las características y la extensión del lugar, el tipo de datos que se tengan como geológicos, hidrogeológicos y geofísicos (Hervás et al., 2002).

Para la evaluación del riesgo por deslizamientos se tiene la clasificación de métodos más aceptada que es la del Subcomité de Gestión de Riesgo de deslizamiento de la Sociedad Australiana de Geomecánica, basada en la cuantificación del riesgo: métodos cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos (Westen et al., 2006).

Al combinar un método de análisis de amenazas con otro de evaluación de riesgos, se obtienen diferentes niveles de utilidad. Estas combinaciones se categorizan en un rango que va desde el nivel cero hasta el nivel tres (Hervás et al., 2002):

0: El método de la amenaza no es adecuado para el método de riesgo.

1: La combinación es medianamente útil.

2: El método de la amenaza es el mejor para el método de riesgo, si se cuentan con los datos.

3: La mejor combinación de métodos.

En la Tabla 3 se observan las posibles combinaciones de metodologías con las calificaciones de cero a tres.

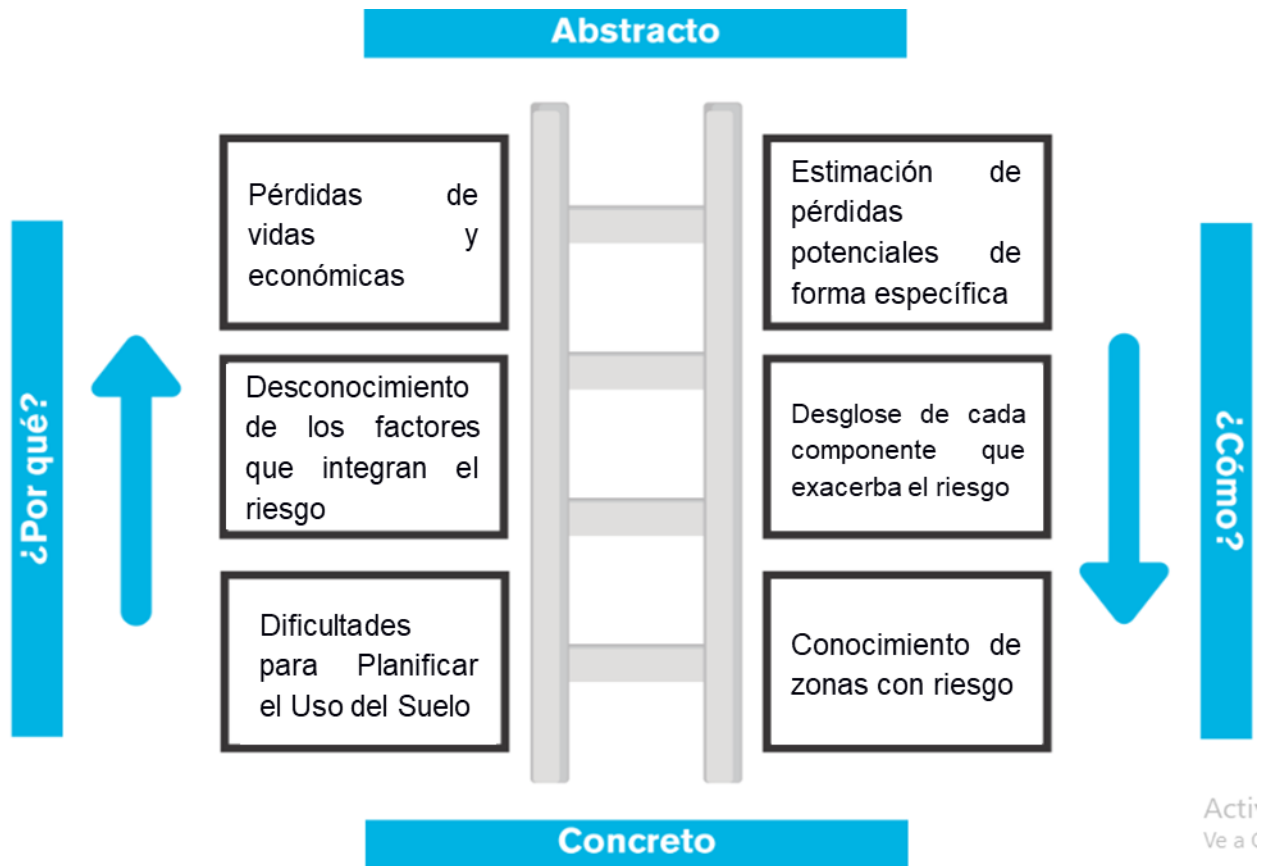
Tabla 3 Posibles combinaciones para calcular la amenaza y el riesgo de deslizamiento

Riesgo Amenaza	Cualitativo	Semicuantitativo	Cuantitativo
Geomorfológico	2	2	2
Heurístico	3	3	0
Estadístico	3	2	2
Determinista	0	1	3

Nota. Tomado de Hervás et al. (2002).

Conforme a las metodologías revisadas acorde a la extensión del lugar, los datos disponibles y los que se obtuvieron en campo se optó por escoger el método **determinístico** para el análisis de la amenaza y el método **cuantitativo** para la evaluación del riesgo, los cuales resultan en la mejor combinación de métodos.

Para elegir esta metodología se busca el por qué es aplicable en el lugar y el cómo esto podría ayudar a solucionar el problema existente en la comunidad (Figura 14).

Figura 14 *Escalera de Abstracción*

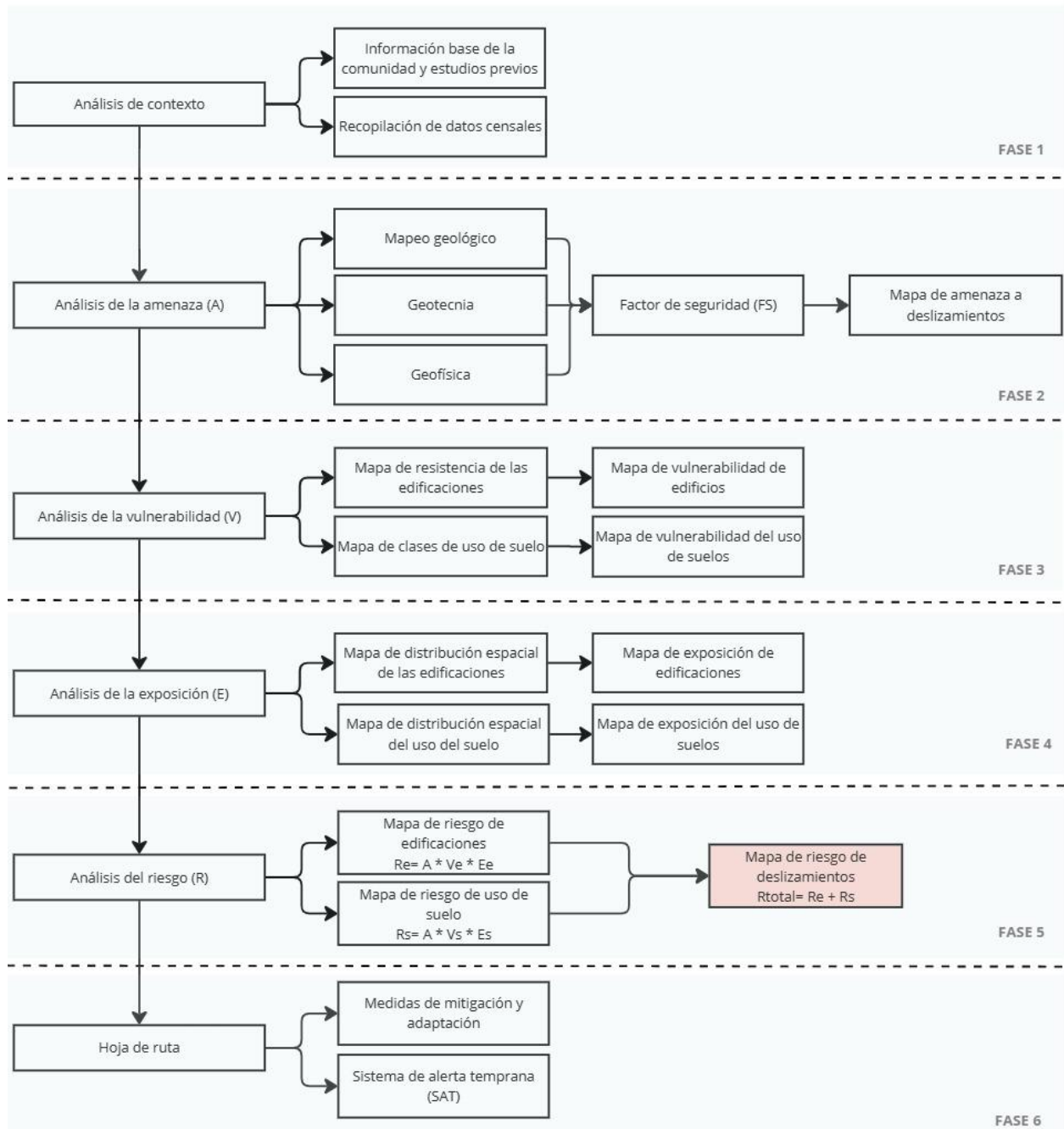
Nota. Herramienta de desing thinking para entender las causas y el cómo el uso de la metodología cuantitativa aporta al problema de deslizamiento que enfrenta la comunidad de Zumbahuayco. Diseño tomado de Vijayakumar et al. (2021).

3.2 Metodología

La metodología para la evaluación del riesgo frente a deslizamientos utilizada en este estudio toma de referencia el Análisis Cuantitativo de Riesgos (ACR), propuesta por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS) en 1997, y como ejemplo la publicación de Caleca et al. del 2022 con el título “A methodological approach of QRA for slow–moving landslides at a regional scale” el cual se adapta específicamente para evaluar y mitigar el riesgo de deslizamientos en la cuenca del río Arno en Italia central. La ACR permite cuantificar la probabilidad de ocurrencia de eventos y su potencial impacto en edificaciones, infraestructura y usos del suelo.

Esta metodología fue acoplada a este proyecto, para lo cual se divide en cinco fases principales que son: análisis de contexto, amenaza, vulnerabilidad, exposición y riesgo (Figura 15).

Figura 15 Diagrama de flujo de la metodología



3.2.1 Fase 1: Análisis de contexto

En esta primera fase, se recopiló información básica de la comunidad de Zumbahuayco y sus alrededores, junto con estudios previos relevantes. La información se obtuvo mediante:

Recopilación de datos censales: Para obtener una comprensión de la población, características socioeconómicas y distribución espacial de los habitantes, se extrajeron datos del censo del 2022 realizados por el INEC, para esto se usó el software REDATAM7 versión 3, en el cual se encuentra la comunidad dividida en 4 sectores censales.

Estudios previos: Se revisaron estudios históricos, geológicos y ambientales que permitan contextualizar las condiciones actuales de la comunidad. Para esto se buscó información de la región, provincia, cantón, parroquia y la comunidad. Los principales estudios que se usaron durante la ejecución del proyecto son:

- Análisis de las deformaciones en el terreno, en la comunidad de Zumbahuayco, cantón Azogues, provincia de Cañar, mediante el levantamiento de información topográfica y geológica (IIGE, 2024).
- Atlas del Cantón Azogues (Romero, 2015).
- Transformaciones urbanas y sociales en la parroquia rural Javier Loyola a partir de la construcción del equipamiento UNAE (Universidad Nacional De La Educación) (Reyes Rodas, 2022).

3.2.2 Fase 2: Análisis de la amenaza

La amenaza de deslizamientos se evaluó mediante un conjunto de estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos, cuyos resultados se integraron para generar el mapa de amenaza considerando la metodología de Gonzalez De Vallejo et al. (2002) (Tabla 4).

Tabla 4 *Investigación de deslizamientos*

Ámbito,			
Métodos y	Fases	Métodos y técnicas	Finalidad
técnicas			
Investigación de áreas inestables	Estudios preliminares	Revisión de información y cartografías existentes.	Identificación de los procesos y tipos de
		Interpretación de fotos aéreas y teledetección.	movimiento. Identificación de los factores condicionantes.
	Reconocimientos Generales	Observaciones de campo. Cartografía de los procesos. Cartografía de los factores.	Evaluación general de la estabilidad de la zona.
	Estudio de los procesos y de los factores que los causan	Reconocimientos de campo. Investigación preliminar del subsuelo: geofísica.	Descripción y clasificación de los procesos y de los materiales. Análisis de la susceptibilidad en base a la presencia de procesos y conurrencia de factores condicionantes.
Investigación		Observaciones y medidas en afloramientos.	Descripción y clasificación de los movimientos. Datos

de deslizamientos particulares	Investigaciones de detalle	Sondeos, geofísica, ensayos de campo y toma de muestras. Ensayos de laboratorio.	morfológicos, geológicos, hidrogeológicos y geomecánicas.
	Instrumentación	Inclinómetros, extensómetros, tiltímetros, piezómetros.	Datos de velocidad, dirección, situación de planos de rotura, presiones de agua.
	Análisis de la estabilidad	Equilibrio limite. Modelos matemáticos tenso- deformacionales.	Definición de los modelos y mecanismos de rotura. Evaluación de la estabilidad. Diseño de medidas correctoras.

Nota. Tomado de Gonzalez De Vallejo et al. (2002).

3.2.2.1 Mapeo Geológico

Se realizó un mapeo geológico detallado del área de estudio para identificar características geomorfológicas y estructurales asociadas con la inestabilidad de taludes. Se mapearon:

- **Grietas y escarpes:** Identificación de fracturas en el terreno que puedan indicar zonas de tensión o desplazamiento. Se tomó la ubicación y medidas como el tamaño (longitud, apertura) y el rumbo usando un GPS y brújula Brunton (Figura 16).

- **Litología:** Al recorrer la zona se identificaron tres cambios en la litología, por lo que se tomaron esos puntos de contacto para posteriormente plasmarlos en un mapa litológico (Figura 16).

Figura 16 *Mapeo geológico*



3.2.2.2 Visita de campo

- **Viviendas afectadas:** Se plantearon transectas por toda la comunidad identificando las viviendas que han sido afectadas en su estructura, tomando datos estructurales, como uso de la vivienda, número de pisos y estado de afectación, además de su ubicación y toma de fotos como evidencia (Figura 17).

Figura 17 *Cuarteo en la estructura de viviendas*



- **Vuelo de dron:** Se realizó un vuelo con un dron Phantom 4 Pro sobre una sección de la comunidad para generar una ortofoto de alta resolución de la zona. Además, se obtuvo un

Modelo Digital de Elevación (DEM) con una precisión vertical de 0.3 m, proporcionando detalles topográficos esenciales para el análisis del terreno (Figura 18).

Figura 18 *Vuelo de dron*



3.2.2.3 Geofísica

Se realizaron varios ensayos geofísicos utilizando ERT para identificar el nivel freático, la distribución de humedad en el suelo y el espesor de las capas, factores críticos para la estabilidad del terreno (Figura 25). Primero, se seleccionaron cuidadosamente las áreas de estudio donde se observó en campo la mayor susceptibilidad, considerando pendientes pronunciadas, zonas con antecedentes de inestabilidad, presencia de grietas o puntos de agua y cambios en la litología (Tabla 5).

Se desplegó una serie de electrodos a intervalos regulares a lo largo de cada línea de estudio, lo que permitió obtener perfiles detallados de la resistividad del subsuelo. Estos electrodos se conectaron a un cable multielectrodo compatible con el equipo Terrameter LS2, encargado de inyectar corrientes eléctricas en el terreno utilizando una batería como fuente de energía (Figura 19). Para la adquisición de datos, se emplearon dos configuraciones geofísicas: gradiente debido a que permite una alta cobertura lateral en el subsuelo y dipolo-dipolo porque proporciona una mayor sensibilidad a las variaciones locales de resistividad adecuado para identificar detalles como fallas, fracturas o cambios litológicos discretos (Infante Pacheco, 2020).

Figura 19 Equipos ETR

La resistividad del suelo fue medida y registrada, ya que los cambios en los valores de resistividad reflejan variaciones en la composición y contenido de agua en el suelo. Los datos obtenidos se procesaron en el software Res2dinv versión 3.55.32 para generar imágenes en secciones transversales del suelo, mostrando áreas de alta y baja resistividad. Se usó el modelo refinado de inversión, después de haber eliminado los puntos que generan ruido en los datos.

Tabla 5 Ubicación de las ERT

ERT	Coordenadas		Lugar
	x	y	
T01	733353	9686868	Portete Bajo
T02	734236	9686657	Pedregal Alto
T03	733225	9686540	Portete Alto
T04	734950	9686883	Rayoloma
T05	733811	9686597	Pedregal Alto

3.2.2.4 Geotecnia

Se tomaron un total de 11 muestras, en 7 calicatas construidas (Figura 20) en lugares donde se evidenció movimiento en el suelo, casas afectadas y cambios en la litología (Figura 25). Estas muestras fueron transportadas hasta el laboratorio de geotecnia y construcción de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) y Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT) en donde se realizaron los respectivos ensayos enfocados en caracterizar el tipo de suelo y sus propiedades físicas (Tabla 6).

Tabla 6 *Ubicación de las calicatas y muestras*

Calicata	Coordenadas		Muestra	Profundidad (m)
	x	y		
C01	733359	9686841	Z-01-13	2.3
			Z-02-13	3
C02	733486	9686861	Z-03-13	3
C03	733252	9686751	Z-04-13	3
C04	733231	9686603	Z-05-13	3.1
			Z-06-13	0.7
C05	733203	9686670	Z-07-13	1
			Z-08-13	2.7
C06	733760	9686644	Z-09-13	2.8
			Z-10-13	1.1
C07	734949	9686951	Z-11-14	1.5

Figura 20 *Calicatas para la toma de muestras*



Para esto, se realizarán los siguientes ensayos:

➤ **Ensayo de Granulometría**

El ensayo de granulometría se realizó para determinar la distribución de tamaños de partículas en la muestra de suelo. Primero, la muestra fue secada en un horno a 105–110 °C para eliminar toda la humedad y luego pesada para obtener su masa seca. Posteriormente, la muestra seca pasó por un proceso de lavado manual en el tamiz #200 para eliminar la arcilla y despegar cada grano de suelo, esta parte tomó aproximadamente 30 minutos por muestra. El material retenido sobre el tamiz #200 se pesó y envió al horno a secar para luego colocarla en una serie de tamices organizados en orden descendente por tamaño (# 4, 10, 16, 30, 50, 100 y 200), cada muestra se sometió a un proceso de tamizado mecánico durante 2 minutos en la tamizadora (Figura 21).

Una vez completado el proceso, se pesó el material retenido en cada tamiz, y se calculó el porcentaje acumulado que pasa por cada uno de ellos. Finalmente, se generó una curva granulométrica para analizar la distribución de los tamaños de partículas, lo que permitió

obtener datos clave como el tamaño medio de partícula, los coeficientes de uniformidad y curvatura, necesarios para clasificar el tipo de suelo y entender su comportamiento mecánico.

Figura 21 *Ensayo de granulometría*



➤ Límites de Atterberg

El ensayo de límites de Atterberg se realizó para determinar las propiedades de plasticidad del suelo. Primero, se llevó a cabo el ensayo de **límite líquido**, en el cual la muestra de suelo fue mezclada con agua hasta formar una pasta homogénea. Esta pasta fue colocada en el instrumento de medición, cuchara de casagrande, donde se realizó el proceso de corte y cierre de la ranura, registrando el número de golpes necesarios para cerrar la ranura de una longitud específica. A partir de varias pruebas, se estableció la cantidad de agua necesaria para que el suelo alcanzara su límite líquido, donde empieza a comportarse como un fluido (Figura 22).

Luego, se determinó el **límite plástico** moldeando la muestra de suelo en pequeños cilindros y reduciendo su grosor mediante un rodado sobre una superficie hasta que se agrietara a un diámetro de 3 mm. La cantidad de agua en esta condición fue registrada para obtener el límite plástico, el punto donde el suelo pasa de ser plástico a semisólido.

Por último, se calculó el **índice de plasticidad** como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, permitiendo clasificar la plasticidad y la cohesión del suelo en función de su contenido de humedad.

Figura 22 *Ensayo de límites de Atterberg*



➤ **Ensayo de Corte Directo**

El ensayo de corte directo se realizó para determinar la resistencia al corte del suelo bajo condiciones controladas. Primero, la muestra de suelo fue preparada y colocada en una caja de corte dividida horizontalmente en dos secciones. La muestra fue compactada a la densidad especificada y luego se aplicó una carga normal constante para simular las condiciones de presión que el suelo experimentaría en el terreno.

Durante el ensayo, se aplicó una carga horizontal en la parte superior de la muestra, incrementando de forma continua la fuerza hasta que el suelo comenzó a ceder o romperse. La fuerza aplicada y el desplazamiento horizontal fueron registrados a lo largo del proceso, y el valor máximo de la fuerza permitió calcular la resistencia al corte. Este ensayo se repitió con dos cargas normales para obtener la envolvente de falla y determinar los parámetros de resistencia al corte, como la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo, esenciales para evaluar su estabilidad en pendientes y otras aplicaciones geotécnicas (Figura 23). Tres

muestras fueron sometidas a este ensayo, cada una proveniente de litologías diferentes (Tabla 7).

Tabla 7 *Tiempo de ejecución de corte directo*

Muestra	Duración de ensayo
Z-01-13	4 días
Z-08-13	4 días
Z-11-14	4 días

Nota. Tiempo de consolidación: un día por punto, tiempo de corte: un día por punto.

Figura 23 *Ensayo de corte directo*



➤ **Permeabilidad**

El ensayo de permeabilidad de carga variable se realizó para determinar el coeficiente de permeabilidad. Primero, se tomó una muestra la cual se compactó dentro del molde lo que permitió contenerla sin que se deforme, se asegura que esté bien sellada para evitar fugas y se procedió a conectarla a un depósito de agua, saturando la muestra por carga hidráulica. Una vez saturada se conectó a un tubo piezométrico para medir los cambios en el nivel del agua.

Se estableció una carga hidráulica inicial y una final, siendo una altura conocida en el tubo piezométrico, se tomó el tiempo que tarda en descender el agua; el proceso se repitió varias veces para obtener datos confiables (Tabla 8) (Figura 24).

Para el ensayo de carga constante se realiza la misma preparación de la muestra, para la toma de resultados se toma el tiempo que tarda en salir una determinada masa de agua a una altura preestablecida (Tabla 8) (Figura 24).

Tabla 8 *Tipo de ensayo de permeabilidad*

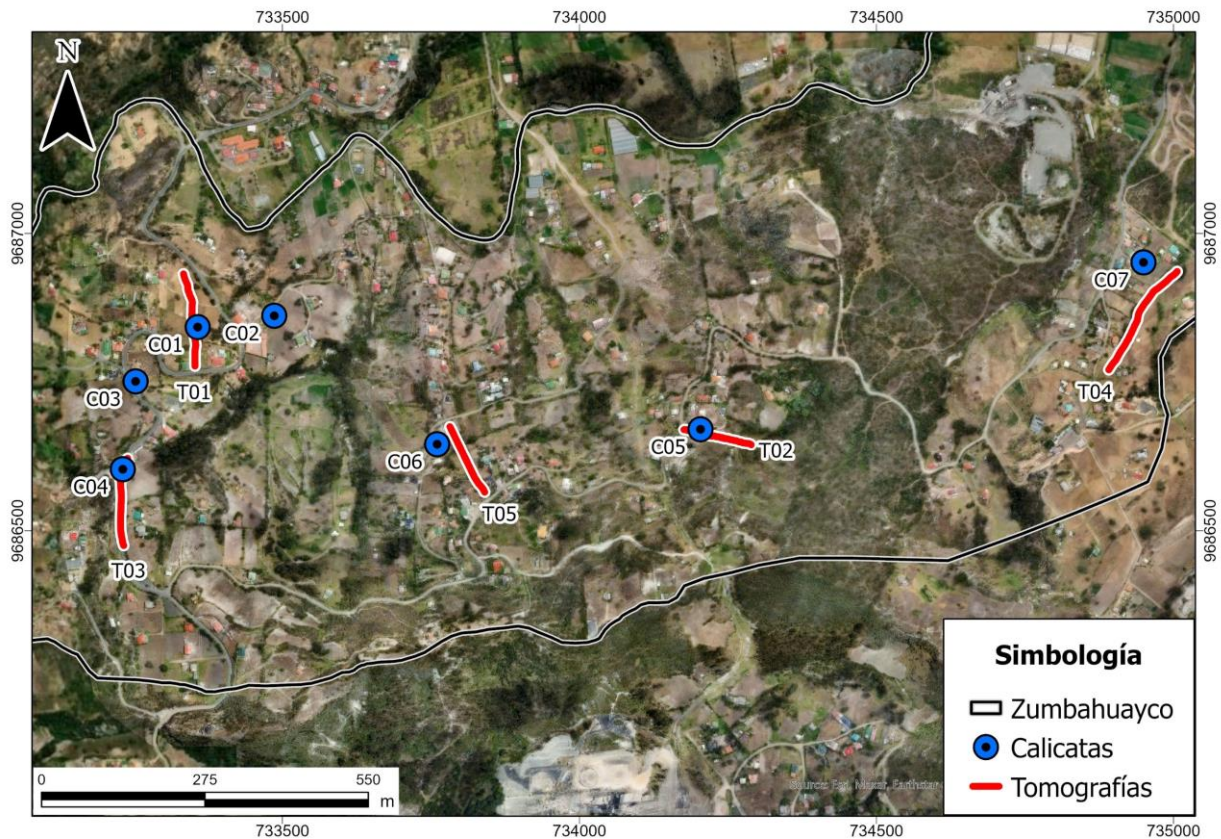
Muestra	Tipo de ensayo	Duración de ensayo
Z-01-13	Carga variable	3 días
Z-08-13	Carga constante	1 día
Z-11-14	Carga constante	3 días

Nota. Tiempo de saturación

Figura 24 *Ensayo de permeabilidad*



Figura 25 Mapa de ubicación de las ERT y calicatas



Los datos obtenidos de estos ensayos se utilizaron posteriormente para calcular el FS.

3.2.2.5 Cálculo del FS

El cálculo del FS se realizó utilizando el software de SagaGis versión 9.6.1, con el objetivo de analizar la estabilidad de los taludes en el área de estudio. Para esto, se usó la herramienta de Safety Factor, la cual calcula un ráster de la estabilidad de talud a través del FS usando el modelo de talud infinito explicado por Selby en 1993. Este modelo permite realizar un análisis global, como si toda el área tuviera las mismas características litológicas o un análisis específico por litología, en este caso se escogió la segunda opción con el fin de tener datos más específicos.

Primero, se dividió la zona de estudio en 3 litologías diferentes, de estas litologías se escogió una muestra de cada una a las que se les realizó los ensayos de laboratorio. Se integraron los datos geotécnicos, incluyendo los resultados de los ensayos de granulometría, límites de Atterberg y corte directo, proporcionando información sobre la resistencia al corte y las

características mecánicas de cada suelo. Estos parámetros tales como saturación, densidad, ángulo de fricción y cohesión fueron esenciales para modelar con precisión el comportamiento del terreno bajo condiciones de carga.

Adicionalmente, se incorporaron los resultados de la ERT, que identificó el nivel freático, las zonas con mayor saturación de agua y el espesor de las capas, lo cual es posible al analizar deslizamientos superficiales. Estos datos se integraron en el modelo Safety Factor (Tabla 9) dando como resultado un ráster que representa la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas desestabilizadoras (FS) en un posible plano de corte, donde un FS menor a 1 indica inestabilidad y un FS mayor a 1 indica estabilidad. Los resultados obtenidos permitieron identificar las áreas con FS bajos, indicando zonas de mayor susceptibilidad a deslizamientos proporcionando una base cuantitativa para la evaluación del riesgo en la comunidad de Zumbahuayco.

Tabla 9 Datos necesarios para aplicar Safety factor

Parámetro	Tipo de dato	Formato (para ráster)
Mapa de pendientes	Ráster de elevación	.tif (float en radianes)
Profundidad del suelo	Constante o ráster	.tif (float en m)
Cohesión	Constante o ráster	.tif (float, en MPa)
Ángulo de fricción interna	Constante o ráster	.tif (float, en grados)
Densidad	Constante o ráster	.tif (float, en kN/m ³)
Saturación del suelo	Constante o ráster	.tif (float, entre 0 y 1)

3.2.3 Mapa de amenaza

El mapa de FS se tradujo a un mapa de amenaza en donde se les asignaron diferentes colores y símbolos a las áreas según su grado de estabilidad. Las zonas con FS menores a 1, que

indican una alta probabilidad de deslizamiento, fueron marcadas en rojo, mientras que las zonas más estables, con FS mayores a 1 (Tabla 10), fueron representadas en verde.

Tabla 10 *Valores designados*

FS	Intensidad
> 1	Alta
=1	Media
< 1	Baja

3.2.4 Fase 3: Análisis de la vulnerabilidad

El mapa de vulnerabilidad de edificaciones fue desarrollado a partir de un análisis detallado de la resistencia estructural de las viviendas en la zona de estudio. Para ello, se recopilieron datos sobre el tipo de materiales y las características de construcción de cada edificación, obtenidos a través de los datos censales del 2022 por medio de REDATAM, agregándole los datos tomados en campo permitió clasificar las viviendas en diferentes niveles de resistencia. Se identificaron las edificaciones más vulnerables, especialmente aquellas construidas con materiales ligeros (madera) o que presentan daños en su estructura. Los datos fueron georreferenciados utilizando ArcGis pro-3.0.2 con licencia brindada por la ESPOL, y a cada edificación se le asignó una categoría de vulnerabilidad, que se representó mediante una escala de colores, donde las áreas más vulnerables fueron marcadas en tonos rojos, y las más resistentes en tonos azules y verdes (Tabla 11).

Para la obtención del mapa de vulnerabilidad de edificaciones se empleó la herramienta kriging de ArcGis Pro, que permitió generar una superficie continua de interpolación basada en los datos georreferenciados. Este método estadístico considera la dependencia espacial de los puntos de datos y estima valores en ubicaciones intermedias, proporcionando un modelo preciso y representativo de la distribución espacial de la vulnerabilidad estructural en toda el área de estudio (Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2024).

Tabla 11 *Parámetros de resistencia y sus valores*

Factor de resistencia	Tipología	Valor
Tipo de estructura (ϵ_{sty})	Residencial con estructura liviana	0.2
	Residencial con paredes de ladrillo	0.8
	Hormigón armado residencial	1.5
Estado de mantenimiento (ϵ_{smn})	Residencial en muy mal estado	0.1
	Residencial en estado medio	0.6
	Residencial en buen estado	1.2
	Residencial en muy buen estado	1.5
Número de pisos (sht)	Residencial de una sola planta	0.1
	Residencial de dos plantas	0.4
	Residencial de tres plantas	0.9
	Número de plantas ≥ 4	1.5

Nota. Modificado de Caleca et al. (2022).

Se utilizó la ecuación (3.1) para determinar la resistencia de cada vivienda:

$$R_{str} = (\epsilon_{sty} \cdot \epsilon_{smn} \cdot \epsilon_{sht})^{-1/3} \quad (3.1)$$

Por otro lado, el mapa de **vulnerabilidad del uso de suelo** fue creado a partir del análisis del tipo de uso de la tierra en la comunidad de Zumbahuayco. Para ello, se identificaron y clasificaron las áreas según su uso: residencial, agrícola, ganadero, entre otros. Se analizó la susceptibilidad de cada tipo de uso del suelo a los daños causados por deslizamientos. Las áreas de uso agrícola y ganadero, especialmente aquellas situadas en laderas o cercanas a taludes inestables, fueron consideradas como más vulnerables debido al impacto que un deslizamiento podría tener sobre la producción y la seguridad de las personas. En ArcGis pro, estas zonas fueron representadas mediante colores que indicaban su nivel de vulnerabilidad (Tabla 12), lo que

permitió visualizar con claridad las áreas más expuestas y priorizar las acciones de protección o reubicación de actividades.

Tabla 12 *Valores de vulnerabilidad*

Uso de suelo	Vulnerabilidad
Tierra sin cobertura vegetal	1
Zona antrópica	0.8
Tierra agropecuaria	0.6
Vegetación herbácea	0.4
Tierra forestal	0.1

Nota. Tomado de Caleca et al. (2022).

3.2.5 Fase 4: Análisis de la exposición

Para el análisis de exposición se realizaron dos mapas uno centrado en las edificaciones y otro en el uso de suelo.

El **mapa de exposición de edificaciones** fue generado mediante la georreferenciación de las ubicaciones de todas las viviendas en la comunidad. Para ello, se utilizó la división de los barrios generada por los sectores censales descargados de la página del INEC y la información de la distribución espacial de las construcciones afectadas, las cuales se mapearon en campo lo que permitió determinar la exposición de las edificaciones por barrio, obteniendo la densidad de viviendas afectadas por hectárea. En ArcGIS pro, se asignaron colores a las edificaciones según su nivel de exposición, con tonos más intensos indicando una mayor exposición al riesgo de deslizamientos.

Para el **mapa de exposición de uso de suelo**, se realizó un análisis similar, pero enfocado en las distintas actividades y tipos de uso del suelo dentro de la comunidad, tales como las áreas residenciales, agrícolas, ganaderas, vegetación herbácea, áreas forestales y sin cobertura vegetal. Se clasificaron las áreas de uso intensivo, como terrenos agrícolas y zonas de pastoreo, que, en

caso de deslizamiento, podrían experimentar pérdidas económicas significativas y afectar la subsistencia de los habitantes, además de las zonas residenciales y sin cobertura vegetal como las que están más expuestas, esto se combinó con la cantidad de viviendas para determinar la exposición por área, es decir la densidad de viviendas por hectárea en cada uso de suelo. En ArcGis pro, se creó una capa que representa estas distintas actividades, y cada tipo de uso del suelo fue categorizado y codificado en colores, tal como se había hecho con las edificaciones.

3.2.6 Fase 5: Análisis del riesgo

Como última fase de la metodología ACR, se generó un **mapa de riesgo** cuantitativo en una escala continua, en la cual los valores numéricos reflejan la probabilidad de pérdidas esperadas para los diferentes elementos en riesgo. Este enfoque permitió una evaluación cuantitativa separada para cada tipo de elemento (riesgo específico), integrando luego estos resultados en un mapa de riesgo total, generando así un panorama integral del riesgo en la comunidad.

En este trabajo, se produjeron dos mapas de riesgo específico: uno para edificios y otro para el uso del suelo. El **riesgo específico de los edificios (Re)** se calculó mediante una fórmula en la que Re representa el daño económico esperado, ecuación (3.2). Para obtener este valor, se consideraron tres variables clave: la susceptibilidad (A), que indica la probabilidad de deslizamientos en diferentes zonas según el análisis de amenaza; la vulnerabilidad de los edificios (Ve), que refleja la capacidad de resistencia de las estructuras; y la exposición de los edificios (Ee), que considera la distribución espacial de las edificaciones en las áreas de mayor amenaza. Estos factores fueron integrados en ArcGis pro, generando un mapa que muestra el nivel de riesgo específico para cada edificio de la comunidad.

$$Re = A * Ve * Ee \quad (3.2)$$

El **riesgo específico del uso del suelo (Rs)** fue calculado de manera similar, donde el Rs representa el daño esperado para los diferentes tipos de uso del suelo en caso de deslizamientos. En este caso, se utilizaron como variables la susceptibilidad (A) derivada del análisis de amenaza,

la vulnerabilidad al uso del suelo (V_s), que refleja cómo cada tipo de actividad (residencial, agrícola, ganadera) responde ante el riesgo de deslizamientos, y la exposición al uso del suelo (E_e), que muestra la distribución de estas actividades dentro de las áreas de mayor susceptibilidad, ecuación (3.3). Los datos obtenidos fueron procesados en ArcGis pro, generando un mapa que destaca los niveles de riesgo específico en función del uso de suelo, permitiendo identificar las actividades económicas y áreas más vulnerables.

$$R_s = A * V_s * E_s \quad (3.3)$$

Finalmente, ambos mapas específicos, fueron integrados en un **mapa de riesgo total** en ArcGis pro, en donde mediante el álgebra de mapas se sumaron el R_e y R_s , ecuación (3.4) dando como resultado una visión integrada del riesgo frente a deslizamientos.

$$R_{total} = R_e + R_s \quad (3.4)$$

3.2.7 Fase 6: Hoja de ruta

La elaboración de la hoja de ruta para la gestión del riesgo por deslizamientos en la comunidad se desarrolló a partir del análisis previo del riesgo realizado en el presente estudio. Este análisis incluyó la evaluación detallada de la amenaza y la vulnerabilidad, lo cual permitió identificar las áreas críticas y la población más expuesta. Con esta base, se propusieron las acciones necesarias para mitigar los efectos de futuros deslizamientos y establecer un sistema de alerta temprana adecuado para la comunidad.

Inicialmente, se definieron los objetivos de la hoja de ruta, priorizando medidas de mitigación y estrategias para la implementación del sistema de alerta temprana. A continuación, se realizó una revisión de la información obtenida en el análisis de riesgo, enfocándose en la identificación de las zonas más propensas a deslizamientos y en las características de las edificaciones, infraestructura y condiciones sociales de la población afectada.

Posteriormente, se propusieron acciones específicas de mitigación, estas incluyeron obras de estabilización en las zonas más críticas, estrategias de reforestación y la planificación de rutas

de evacuación. Para el sistema de alerta temprana, se diseñaron protocolos de monitoreo de parámetros clave, como precipitaciones y desplazamientos del terreno, con un enfoque en el uso de recursos locales y la capacitación de la población.

Las acciones propuestas se priorizaron considerando su urgencia, impacto y viabilidad, definiendo un cronograma de implementación que las organizó en fases a corto, mediano y largo plazo. Además, se identificaron los recursos técnicos, financieros y humanos necesarios para su ejecución, así como los actores responsables de cada tarea, involucrando a la comunidad, el GAD Municipal y otras instituciones pertinentes.

Finalmente, se plantearon mecanismos de monitoreo y evaluación continua, diseñando indicadores para medir el avance de las acciones implementadas y la efectividad del sistema de alerta temprana. Este proceso garantizó un enfoque participativo y sostenible, alineado con las características específicas de la comunidad y los resultados del análisis de riesgo previamente realizado.

Capítulo 4

4.1 Resultados

4.1.1 Cálculo de la amenaza

Con la visita en campo, se obtuvo una lista de 544 viviendas en la comunidad (Figura 26), de las cuales 63 casas tienen afectación entre media a muy mala. En la Tabla 13 se pueden observar una muestra con las características de resistencia, mantenimiento y número de pisos de las viviendas afectadas.

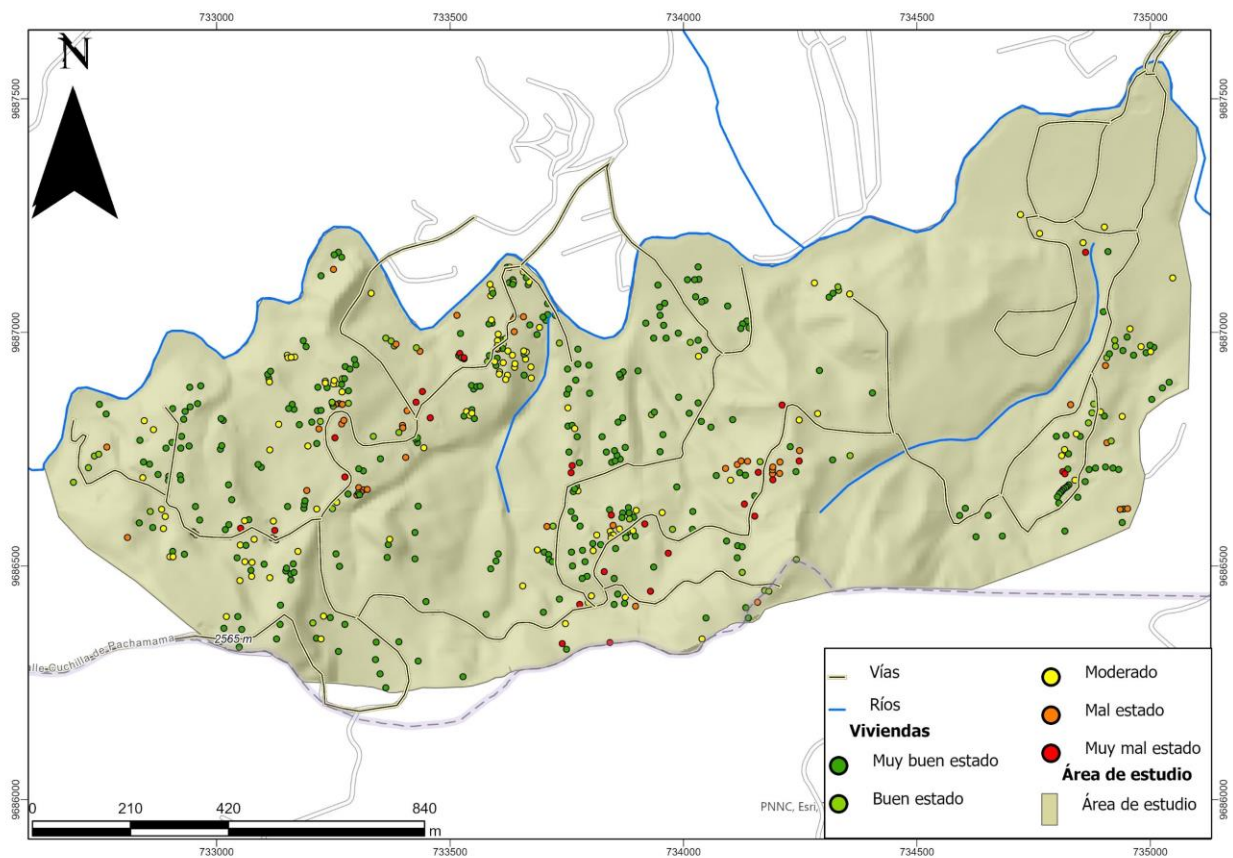
Tabla 13 Resistencia de las viviendas afectadas

# Casa	Tipo de residencia	Estado de mantenimiento	# plantas	Coordenadas	
				x	y
1	Liviana	Medio	2	733847	9686583
2	Liviana	Medio	1	733868	9686583
3	Hormigón armado	Medio	2	733873	9686574
5	Hormigón armado	Medio	2	733884	9686590
6	Hormigón armado	Medio	2	733894	9686601
8	Hormigón armado	Medio	2	733896	9686568
10	Liviana	Medio	1	734033	9686574
11	Comercial/ hormigón armado	Medio	2	734133	9686623
12	Hormigón armado	Medio	3	734158	9686643
14	Hormigón armado	Medio	1	734144	9686694

15	Liviana	Medio	2	734168	9686726
17	Hormigón armado	Medio	1	734225	9686839
20	Hormigón armado	Medio	1	734423	9686961
23	Hormigón armado	Medio	2	734247	9687106
25	Hormigón armado	Medio	1	733758	9686681
26	Hormigón armado	Muy Mal Estado	2	733736	9686600
27	Hormigón armado	Muy Mal Estado	2	733800	9686428
28	Liviana	Medio	1	733240	9686635
31	Liviana	Medio	2	733295	9686691
32	Hormigón armado	Medio	1	733229	9686789
33	Hormigón armado	Medio	2	733232	9686815
34	Hormigón armado	Medio	1	733250	9686827
35	Hormigón armado	Muy Mal Estado	2	733249	9686829
36	Hormigón armado	Medio	3	733267	9686842
37	Hormigón armado	Muy mal estado	1	734191	9686682
38	Hormigón armado	Medio	1	734191	9686842
39	Hormigón armado	Muy mal estado	2	734204	9686722

41	Hormigón armado	Medio	2	734903	9686927
42	Hormigón armado	Medio	2	733121	9686576
43	Hormigón armado	Muy mal estado	1	734129	9686633
44	Comercial/ Hormigón armado	Medio	1	733425	9686842
45	Comercial/ Hormigón armado	Medio	1	733438	9686870
46	Liviana	Muy mal estado	3	733267	968642

Figura 26 Mapa de ubicación de las viviendas



4.1.1.1 Mapeo geológico

En la zona de Pedregal Alto, en el lugar donde se realizó la ERT T02 (Figura 25) se logró identificar la presencia de grietas de una apertura promedio de 10 cm y profundidad de 30 cm en dirección norte-sur. Las vías más afectadas con grietas se encuentran el trayecto de Pedregal a Rayoloma y en la vía principal de Rayoloma (Figura 27).

La presencia de escarpes es más notoria en el barrio de Rayoloma con un espesor de 45 cm a 80 cm (Figura 27).

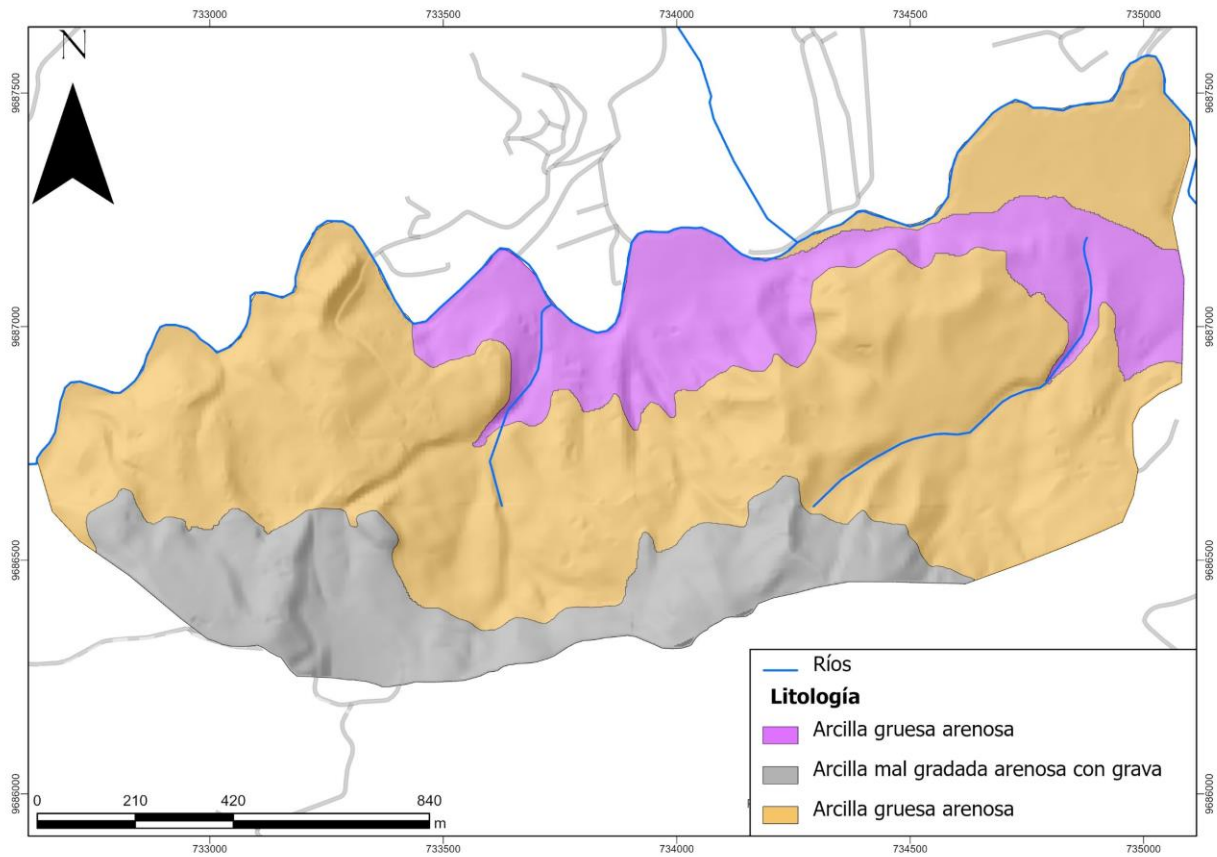
Figura 27 *Grietas y escarpes en la comunidad*



Nota. a) Vía de Rayoloma, b) Vía de Pedregal Alto, c) Escarpe en Rayoloma, d) Vía de Pedregal Alto, e) Grieta en Pedregal.

Se cartografiaron los cambios de suelo y se registraron puntos de transición para elaborar el mapa de litología, identificando tres tipos de suelos como se observa en la Figura 28.

Figura 28 Mapa de suelos



4.1.1.2 Datos de los ensayos geotécnicos

➤ Granulometría

De las 11 muestras obtenidas 10 se pudieron clasificar usando su índice de plasticidad, debido a que la muestra Z-06-11 es no plástica entrando en los suelos granulares. En la Tabla 14 se describen los valores obtenidos y el tipo del suelo al que corresponden, dando como resultado que 6 muestras son arcillas gruesas arenosas, 3 arcillas mal gradadas arenosas con grava, una es un limo arenoso y la muestra Z-06-11 arena limosa.

Tabla 14 *Clasificación SUCS de los suelos*

Cod.	%	%	%	Límite	Límite	Índice de	Clasificación
Muestra	Finos	Gruesos	Humedad	Líquido	Plástico	Plasticidad	SUCS
Z-01-13	93	0.85	12	70.38	20.99	49.39	
Z-02-13	96	0.30	8	60.32	21.84	38.47	
Z-03-13	83	3.60	13	64.82	22.74	42.08	Arcilla
Z-04-13	90	3.54	12	61.84	24.48	37.36	gruesa
Z-10-13	77	0.31	10	51.85	23.02	28.82	arenosa
Z-11-13	84	0.82	12	65.82	27.64	38.19	
Z-05-13	68	5.28	10	46.83	22.77	24.06	Arcilla mal
Z-08-13	82	0.28	7	40.30	15.82	24.49	gradada
Z-09-13	73	0.10	11	49.29	28.28	21.01	arenosa con
Z-07-13	36	10.76	9	31.96	26.50	5.46	grava
Z-06-13	38	11.38	4	—	—	—	Limo arenosa
							Arena limosa

➤ Corte directo y permeabilidad

De las 3 muestras que fueron sometidas a los ensayos de corte directo y permeabilidad (Tabla 15) se puede corroborar la información de granulometría al tener que la muestra 8 (Z-08-13) es la más arenosa, y según su ubicación y descripción en campo pertenece a un suelo gris arenoso en la cual se identificaba la presencia de grava, según estas características se

relacionan con la baja cohesión, saturación y alta permeabilidad. Al contrario, la muestra Z-01-13 y Z-11-14 son suelos mucho más arcillosos y húmedos, lo que justifica su alta cohesión y baja permeabilidad.

Tabla 15 Valores obtenidos en laboratorio de Geotecnia, FICT-ESPOL

Código muestra	Densidad (g/cm ³)	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (KPa)	Saturación (%)	Permeabilidad (cm/s)
Z-01-13	1.1601	13.71	29.95	49	6.268×10^{-7}
Z-08-13	1.6058	28.39	9.25	24	8.295×10^{-3}
Z-11-14	1.6758	21.90	24.01	54	2.953×10^{-3}

4.1.1.3 Interpretación geofísica

Con las ERT realizadas en varios puntos de la comunidad se identificó la estructura que posiblemente se deslice, el espesor de esta y la presencia de las capas saturadas.

➤ T01

Esta ERT se tomó de forma paralela a la zona de deslizamiento. En la Figura 29 y Figura 30 se identifica una capa superficial UG1 de aproximadamente 5 m. Los valores de resistividad en esta zona corresponden a resistividades entre 20–70 $\Omega \cdot m$, con tonalidades rojas que corresponden a arcilla gruesa arenosa con una humedad de 12% según la muestra Z-02-13 (Tabla 14). La UG2 se encuentra entre los valores de resistividad intermedios de 9 $\Omega \cdot m$ hasta 20 $\Omega \cdot m$ y se observan en tonalidades verdes. Esta unidad, corresponde a zonas transicionales. Por otro lado, la UG3 corresponde a los valores de resistividad más bajos entre 2 $\Omega \cdot m$ hasta 9 $\Omega \cdot m$ y se observan en tonalidades azules. Estas áreas indican la presencia de materiales de alta conductividad eléctrica, relacionado a zonas saturadas de agua. Estas se

encuentran principalmente entre 15 m y 30 m de profundidad, presentes en distintos puntos a lo largo del perfil.

Figura 29 Interpretación de la ERT (T01) empleando la configuración gradiente

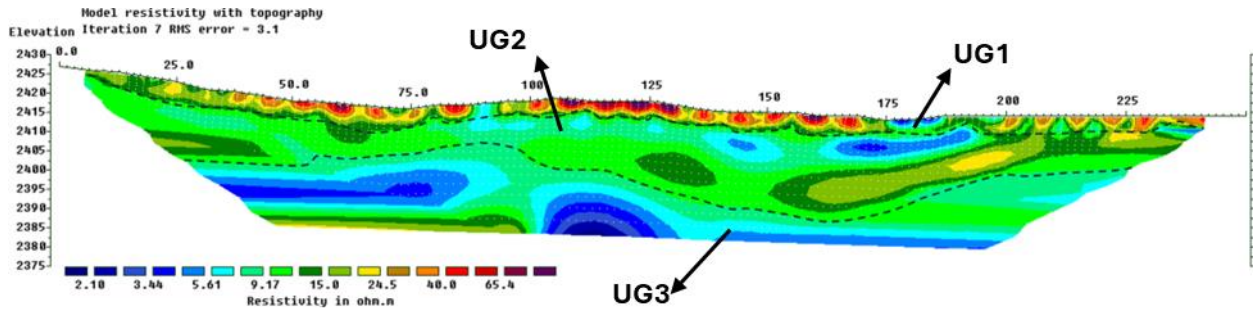
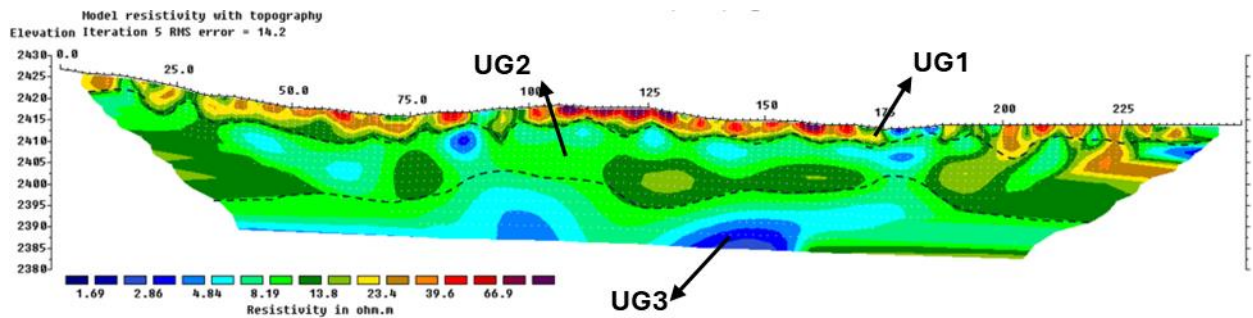


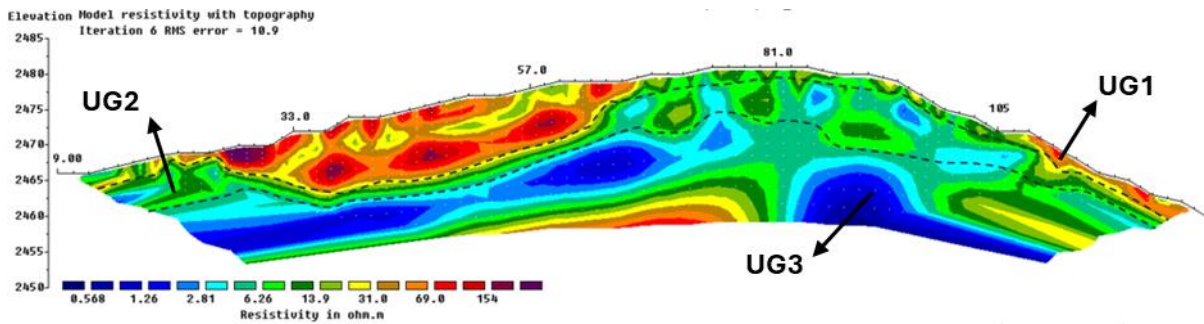
Figura 30 Interpretación de la ERT (T01) empleando la configuración dipolo-dipolo



➤ T02

En la Figura 31 se identificó una zona de falla de deslizamiento UG1 hasta una profundidad de 15 m y longitud de 45 m, este material presenta resistividades de entre 30 y 160 $\Omega \cdot m$ en colores rojizos. Entre los 15 m a 20 m de profundidad se presenta una capa de transición (UG2) con resistividades entre 30 $\Omega \cdot m$ y 10 $\Omega \cdot m$ en colores verdes claros. La UG3 corresponde a los valores de resistividad más bajos < a 10 $\Omega \cdot m$ y se observan en tonalidades azules. Estas áreas indican la presencia de materiales de alta conductividad eléctrica, relacionado a zonas saturadas de agua. En este lugar se tomaron las muestras Z-07-13 que es un suelo limo arenoso y Z-08-13 correspondiente a arcilla mal gradada, arenosa con grava.

Figura 31 Interpretación de la ERT (T02) empleando la configuración dipolo–dipolo



➤ T03

La ERT se tomó al filo de la vía de Portete–Pedregal del lado izquierdo, en donde se observan grietas en la vía. En la parte derecha se presenta una quebrada que es la dirección hacia la cual se está produciendo el movimiento del suelo. En la Figura 32 y Figura 33 se observa la capa superficial (UG1), los valores de resistividad en esta zona corresponden a los valores mayores a $30 \Omega \cdot m$ con tonalidades rojas hasta los 15 m promedio. En la UG2 la resistividad $< a 13 \Omega \cdot m$ en tonalidades azules indica la presencia de materiales de alta conductividad eléctrica, relacionado a zonas saturadas de agua. En esta zona se tomaron las muestras Z–05–13 de nombre arcilla mal gradada arenosa con grava y Z–06–13 de arena no plástica.

Figura 32 Interpretación de la ERT (T03) empleando la configuración gradiente

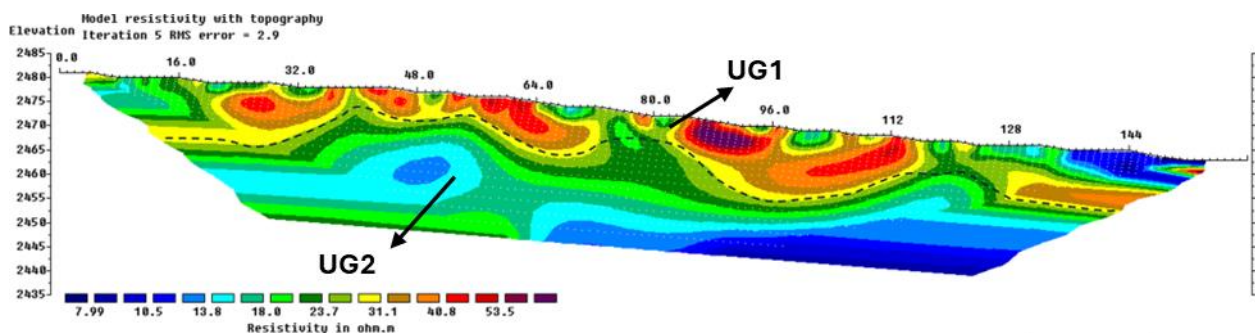
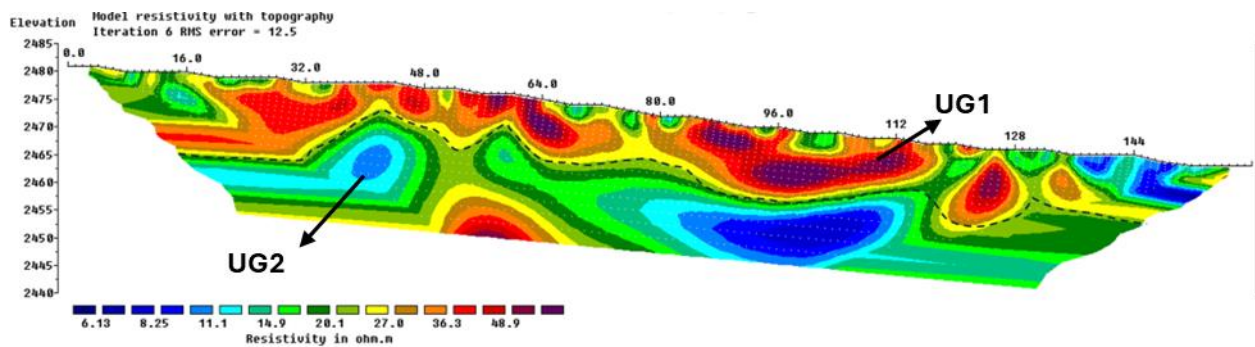


Figura 33 Interpretación de la ERT (T03) empleando la configuración dipolo–dipolo



➤ T04

La línea de la ETR se extendió a lo largo del pie de una colina, colindando con una quebrada, debido a esto se identificó en la Figura 34 y Figura 35 una capa superficial de aproximadamente 10 m de profundidad (UG1) en tonalidades rojizas con resistividades entre 9 y 17 $\Omega \cdot m$, los otros 40 m corresponden a un aluvial con resistividades menores a 5 $\Omega \cdot m$. La muestra de esta zona Z-11-14 corresponde a arcilla gruesa arenosa. La segunda capa identificada UG2 en tonos azules está totalmente saturada, con resistividades por debajo de los 5 $\Omega \cdot m$

Figura 34 Interpretación de la ERT (T04) empleando la configuración gradiente

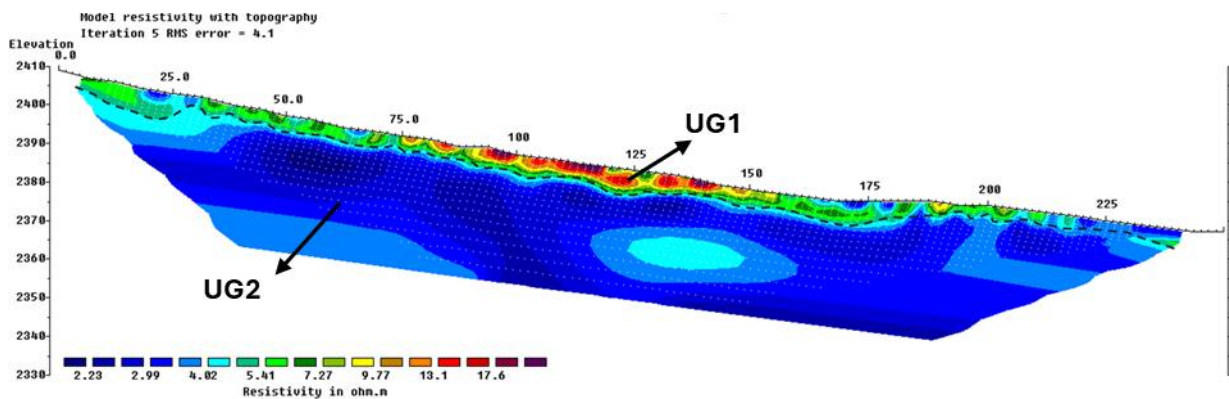
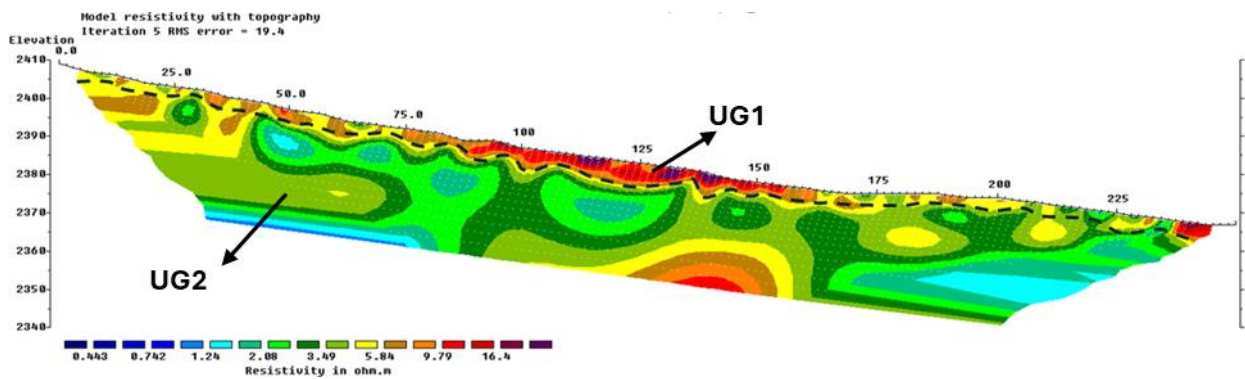


Figura 35 Interpretación de la ERT (T04) empleando la configuración dipolo–dipolo



➤ T05

En la Figura 36 y Figura 37 se identificó la capa superior (UG1), siendo una zona de deslizamiento de profundidad de 10 m la cual está ubicada en la parte superior del talud, en esta zona se encuentra una casa de 3 pisos que está fuertemente afectada con grietas en la base. La zona de deslizamiento se extiende fuera de la ETR por lo que no se logra determinar la longitud de este. La capa saturada UG2 está a una profundidad aproximada de 5 m de la superficie correspondiente a conductividades altas con tonalidades azules, con valores de resistividad menores a $5 \Omega \cdot m$. En la Figura 37 se puede identificar una tercera capa UG3 en tonos amarillos, con resistividades entre $15 \Omega \cdot m$ y $6 \Omega \cdot m$.

El suelo superficial de la zona se denominó arcilla gruesa arenosa a través de la muestra Z-10-13 y el más profundo arcilla mal gradada arenosa con grava según la muestra Z-09-13.

Figura 36 Interpretación de la ERT (T05) empleando la configuración gradiente

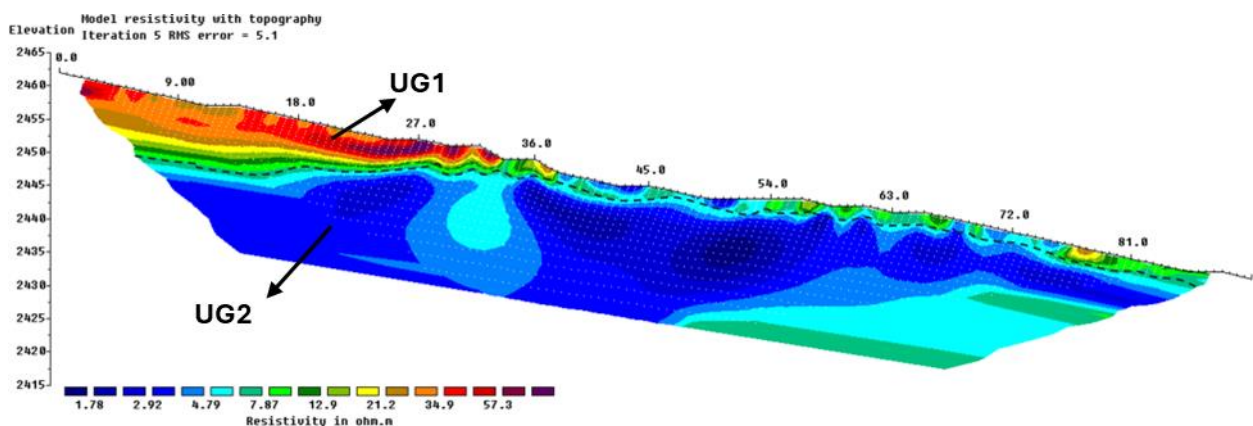
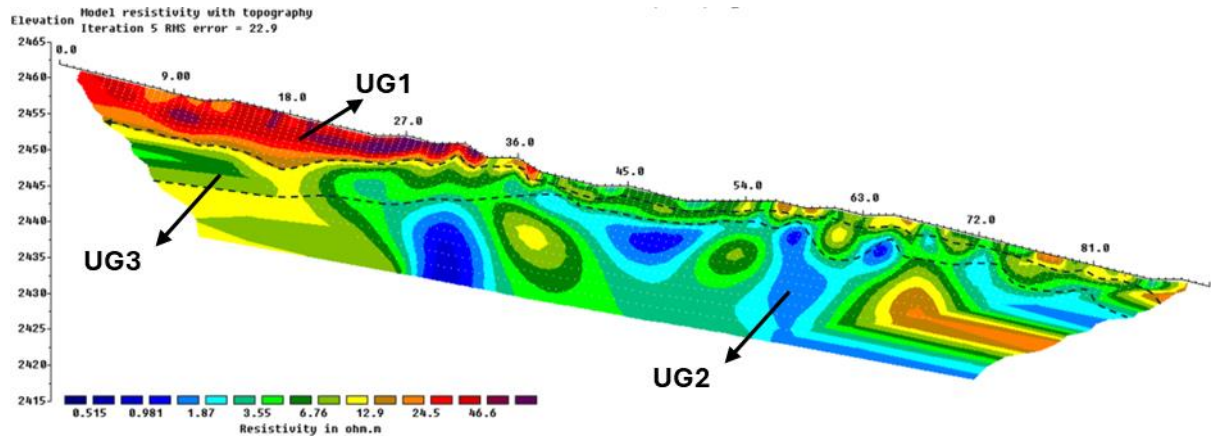


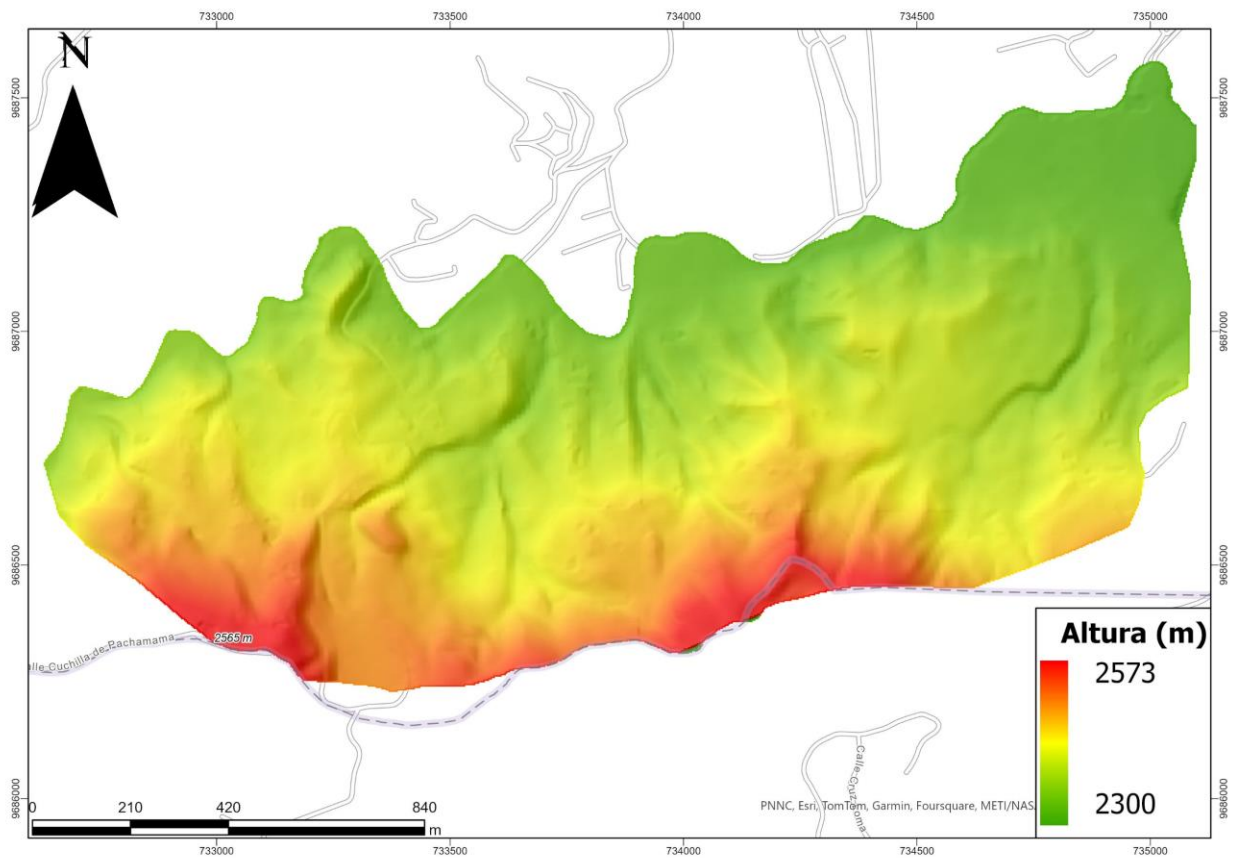
Figura 37 Interpretación de la ERT (T05) empleando la configuración dipolo–dipolo



4.1.1.4 Mapa de amenaza

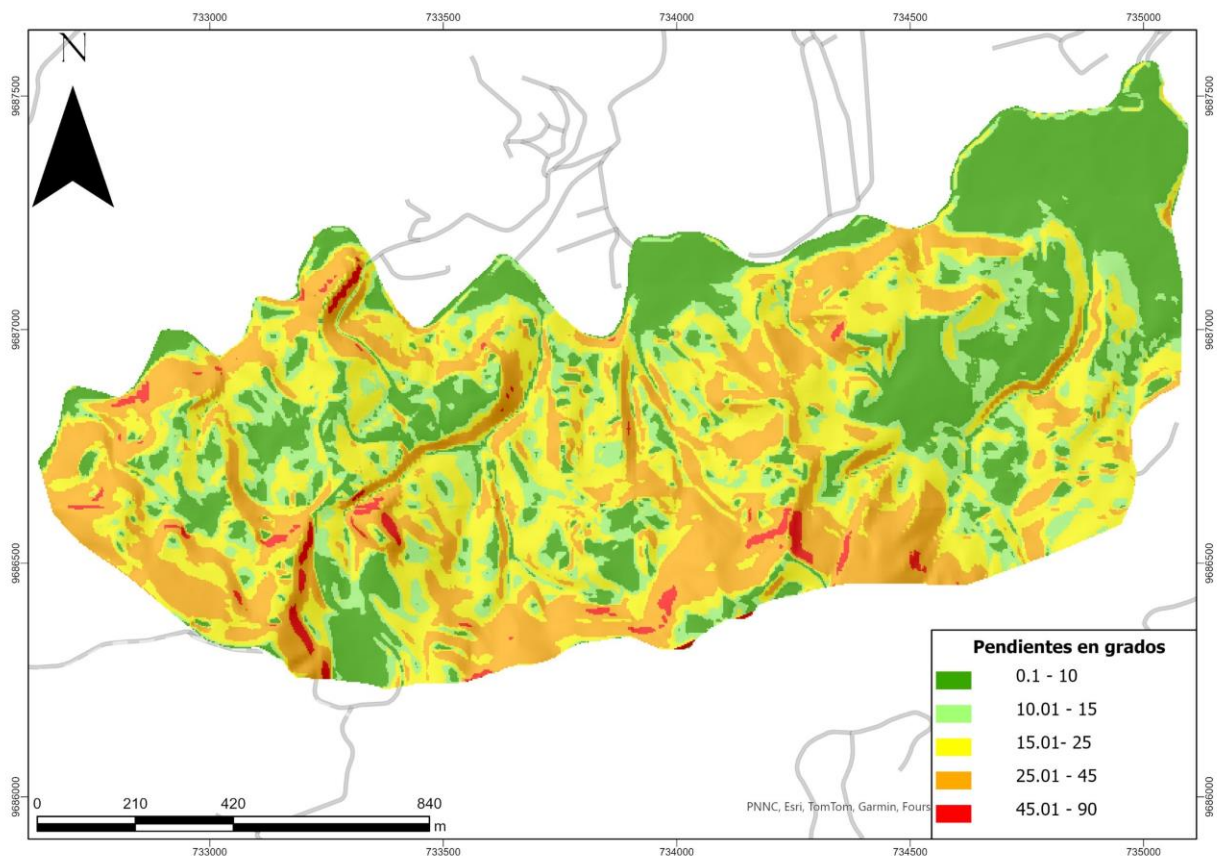
La parte sur de la comunidad esta atravesada por varias montañas mientras van disminuyendo de elevación hacia la parte norte en donde limita con una llanura aluvial, como se observa en la Figura 38 en el DEM con una resolución de 3 m x 3 m de píxel.

Figura 38 DEM de la zona de estudio



El mapa de pendientes se lo obtuvo directamente en ArcGis pro como un ráster de pendientes en grados, tomando como base el DEM destacando una predominancia en las pendientes de entre 15° a 45° (Figura 39). El mapa de pendiente en radianes que se integra al modelo Safety factor se presenta en el Apéndice B.

Figura 39 Mapa de pendientes



Al integrar cada ráster (Tabla 16) que pide el software de SagaGis, se obtuvo un mapa dividido en clases según el FS en donde se identifican las zonas menos estables en rojo y, las más estables en verde.

Tabla 16 *Rásters necesarios para Safety Factor*

Parámetro	Tipo de dato		
	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
Mapa de pendientes	Ráster de elevación		
Profundidad del suelo (m)	Ráster de profundidades de 1m, 3m, 5m, 7.5m, 10m, 15m		
Cohesión (MPa)	0.00925	0.02995	0.02401
Ángulo de fricción interna (grados)	28.33	13.71	21.90
Densidad (kN/m ³)	1.6058	1.616	1.6758
Saturación del suelo (0 y 1)	0.07	0.12	0.120

Se crearon varios escenarios para evaluar la estabilidad del terreno, simulando rupturas a diferentes profundidades y manteniendo constantes las propiedades intrínsecas del suelo. Para ello, se elaboraron mapas de FS en SAGA GIS mediante el modelo Safety Factor, que se basa en la teoría del talud infinito. El análisis consideró la litología de la zona, dividiendo el mapa en función de las formaciones geológicas presentes.

Dado que se trata de deslizamientos superficiales, se analizaron profundidades someras. En la Figura 40, se observa que, a una profundidad de 1 m (Figura 40 a), el FS comienza a disminuir de valores entre 3 y 6 a valores inferiores a 1, lo que indica inestabilidad según el modelo de Safety Factor. Esta tendencia se mantiene hasta profundidades de 3 m (Figura 40 b), coincidiendo con áreas de pendiente más pronunciada (45° a 90°) y pendientes intermedias (25° a 45°) ubicadas en la zona sur de la comunidad.

Esta área corresponde a suelos de la Formación Llacao, que presentan taludes de gran potencia y están compuestos predominantemente por suelos arenosos de baja cohesión, lo que contribuye a su inestabilidad. En contraste, las zonas más bajas, aunque también presentan

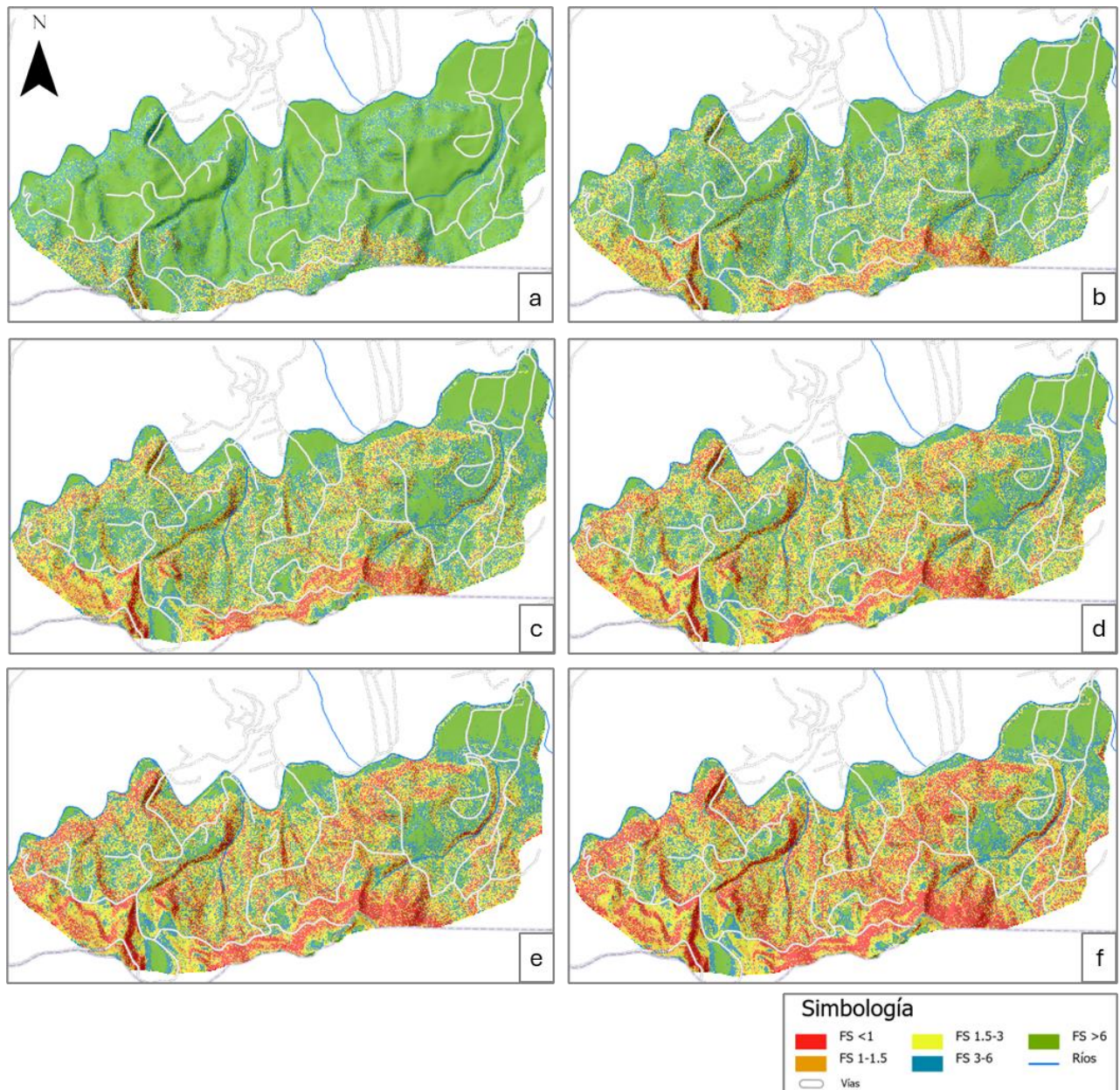
pendientes de 25° a 45°, están compuestas por suelos más arcillosos con mayores valores de cohesión, lo que les otorga una mayor resistencia frente a deslizamientos.

A partir de una profundidad de 5 m (Figura 40 c), se observa un aumento significativo de la inestabilidad en las áreas con pendientes entre 25° y 45°, especialmente en sectores atravesados por quebradas que desembocan en el río ubicado en la parte norte de la comunidad. Este comportamiento es más evidente en las profundidades de 7.5 m y 10 m (Figura 40 d, e), donde los mapas muestran escenarios de inestabilidad similares. Las áreas con menores valores de FS coinciden con las zonas identificadas en campo como afectadas por deslizamientos, lo que respalda la selección del mapa correspondiente a una profundidad de 10 m como el más representativo para definir la amenaza a deslizamientos. Este resultado es coherente con los espesores de las capas deslizantes determinados mediante los estudios de ETR.

Sin embargo, a una profundidad de 15 m (Figura 40 f), se observa un escenario en el que casi toda la comunidad presenta condiciones de amenaza por deslizamientos.

El criterio para considerar inestables los valores de FS se basa en que un FS inferior a 1 indica que las fuerzas desestabilizadoras superan a las estabilizadoras, sugiriendo que el terreno está en riesgo de colapso. Cada mapa se presenta en el Apéndice B.

Figura 40 Mapa de amenaza en base al FS con profundidad de entre 1–15 m



Nota. Imágenes de los mapas de amenaza con variación de espesor de la capa deslizante. a) FS a profundidad de 1 m, b) FS a profundidad de 3 m, c) FS a profundidad de 5 m, d) FS a profundidad de 7.5 m, e) FS a profundidad de 10 mm, f) FS a profundidad de 15 m. Mapas en

Apéndice B

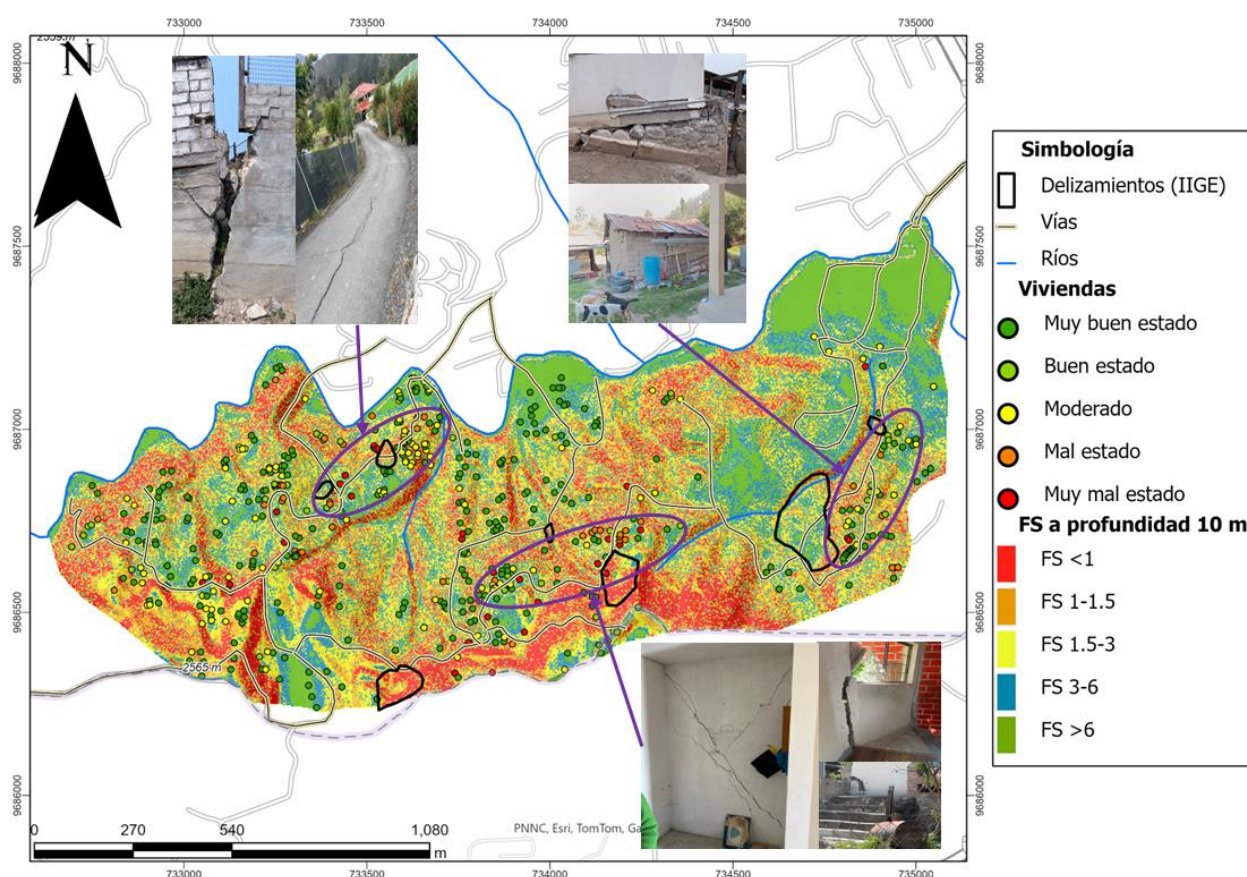
Al analizar la ubicación de las viviendas afectadas, categorizadas según su estado de mantenimiento (con valores asignados entre 0.1 para aquellas en muy mal estado y 1.5 para las

que se encontraban en muy buen estado), se observó que estas se concentraban en zonas clasificadas como estables en el mapa de amenaza, donde el FS oscilaba entre 0 y 3 (Figura 41).

Durante las inspecciones de campo se corroboró que estas áreas presentaban evidencias de movimiento del terreno, incluyendo la formación de grietas en las viviendas. Estos fenómenos podrían estar influenciados por diversos factores hidrológicos o geológicos, como fallas activas, que no son considerados en el modelo actual.

Se ubicaron deslizamientos mapeados por el IIGE en el 2024, en donde 6 de los 7 movimientos en masa están dentro de las zonas con menores FS (0-3), según el mapa de amenaza a una profundidad de 10 m.

Figura 41 Mapa de FS vs casas afectadas

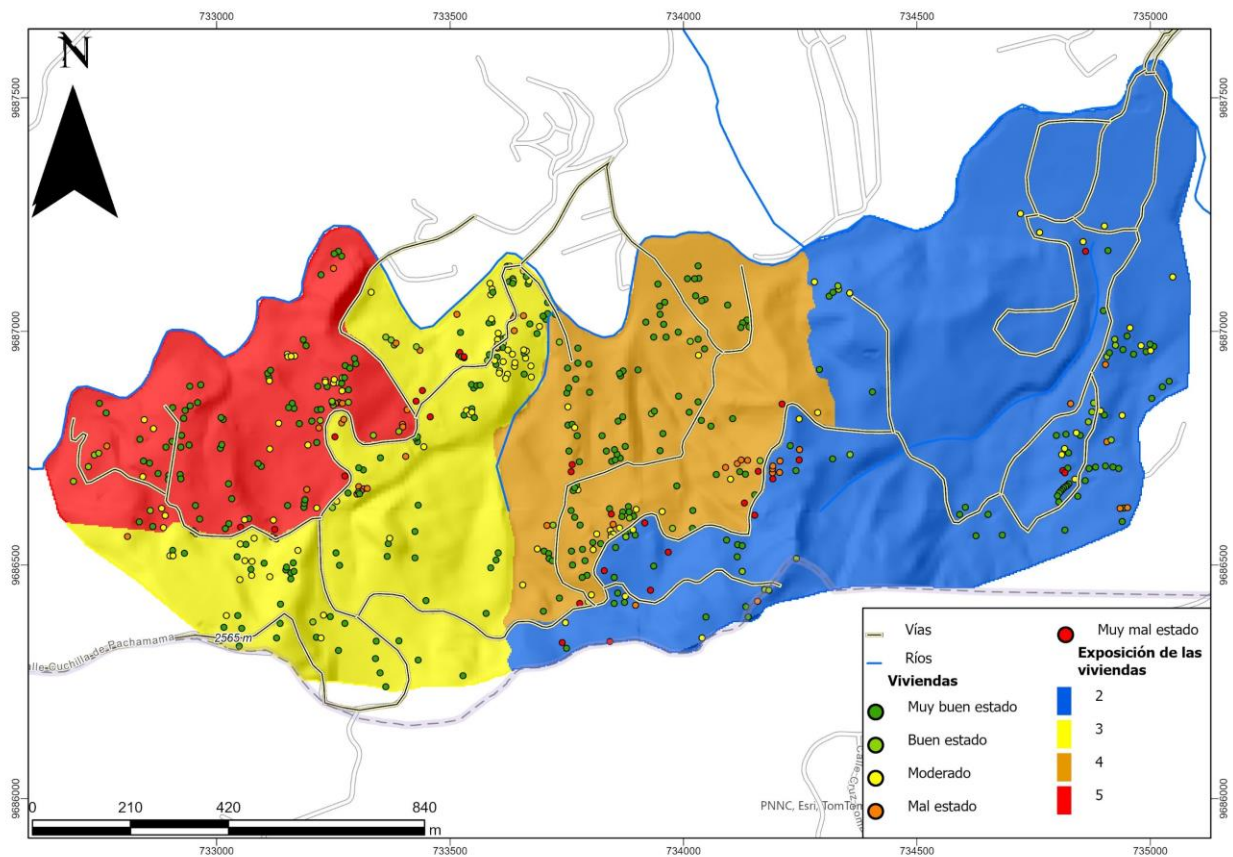


4.1.2 Cálculo de la exposición

4.1.2.1 Exposición de viviendas

De las 544 viviendas que están en la zona de estudio, se distribuyen en cada barrio de esta comunidad, en donde a mayor cantidad de viviendas afectadas se encuentran en el barrio Portete de color rojo y amarillo, Pedregal de color naranja, y por último el barrio de Rayoloma de color azul (Figura 42).

Figura 42 Mapa de exposición de las viviendas



4.1.2.2 Exposición de uso de suelo

El área de estudio posee 7 diferentes usos de suelo (Figura 43), la mayor concentración de viviendas se encuentra en las tierras agropecuarias, lo que las convierte en las zonas más susceptibles a sufrir daños en infraestructura debido a la alta densidad poblacional asentada en las mismas tierras que se utilizan para actividades agrícolas y pecuarias. En segundo lugar, se encuentran las tierras arbustivas y herbáceas, que presentan un nivel de exposición moderado. Por

último, las zonas forestales muestran la menor exposición a daños, ya que cuentan con una baja densidad de viviendas en su territorio (Figura 44).

Figura 43 *Mapa de uso de suelo*

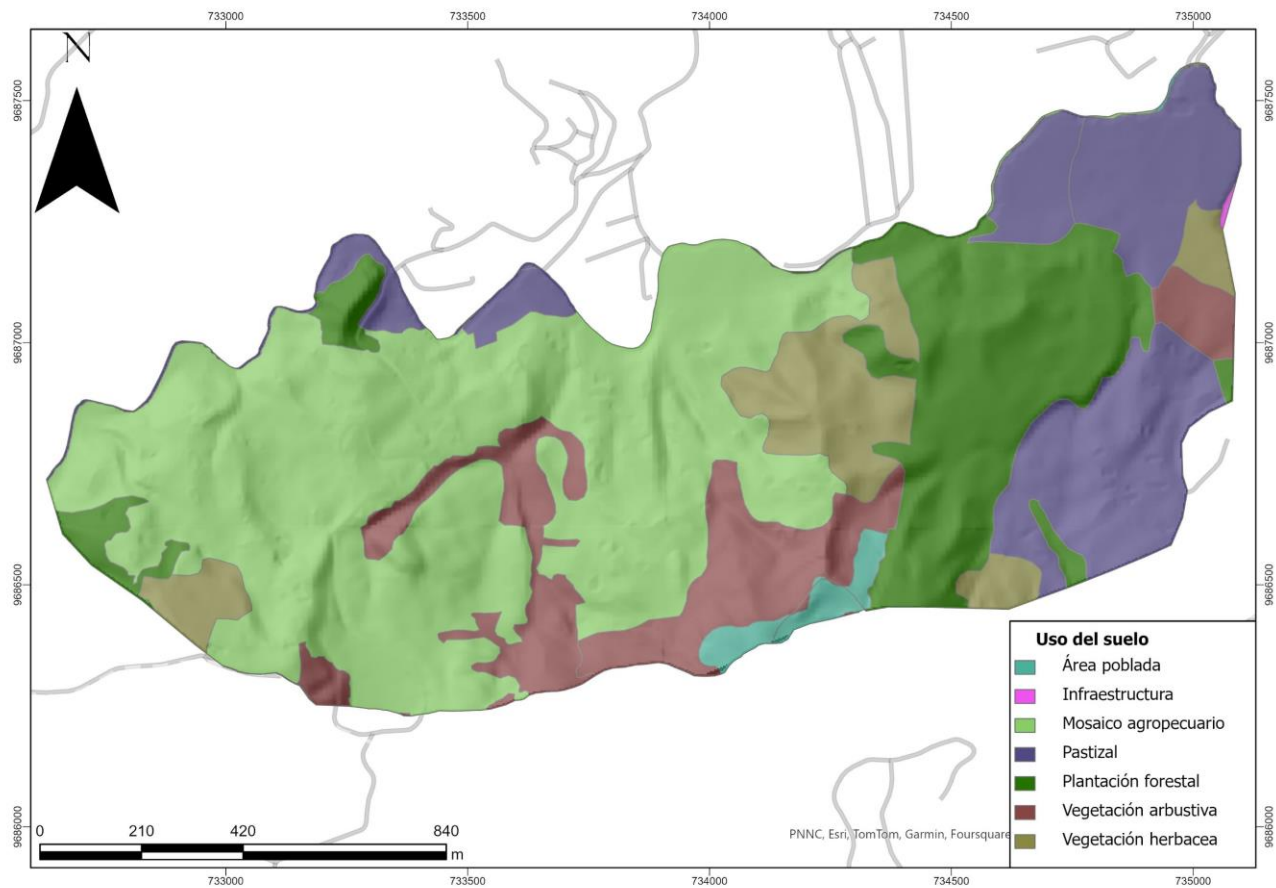
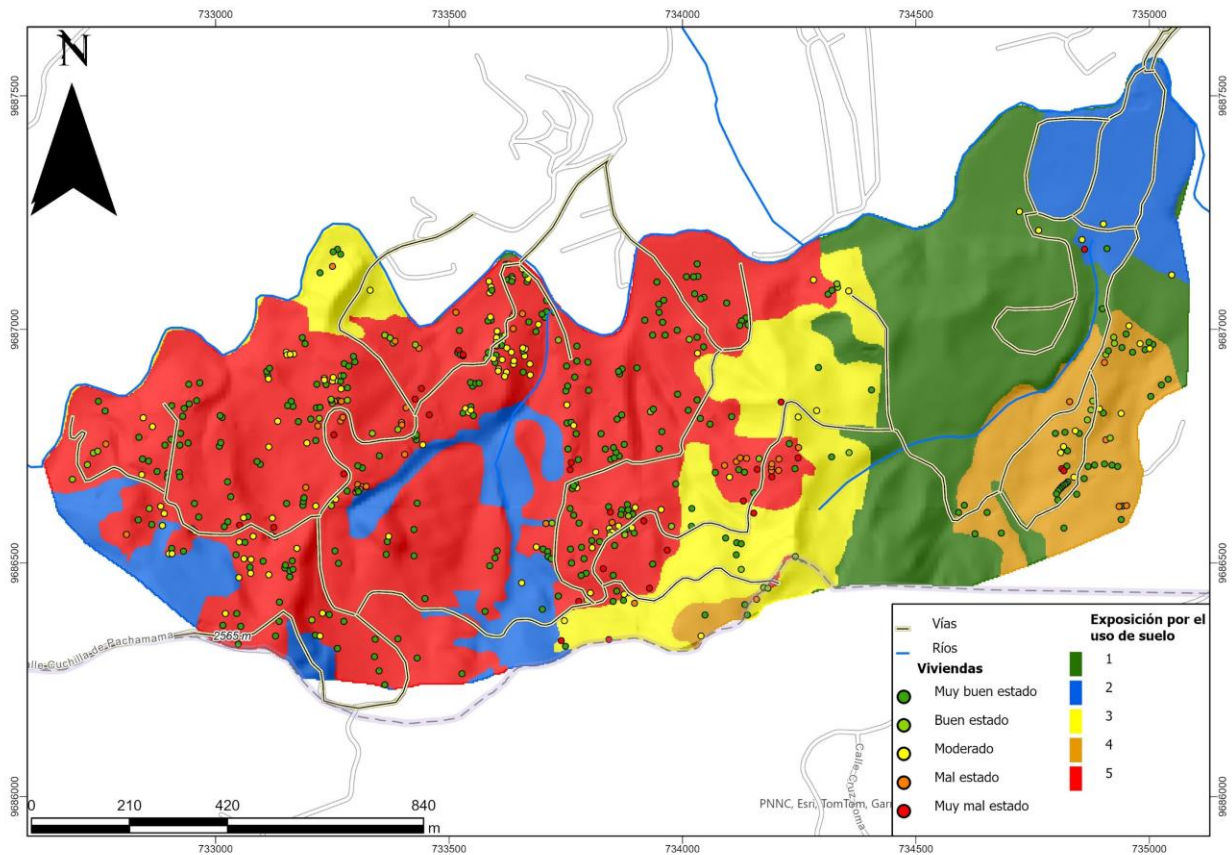


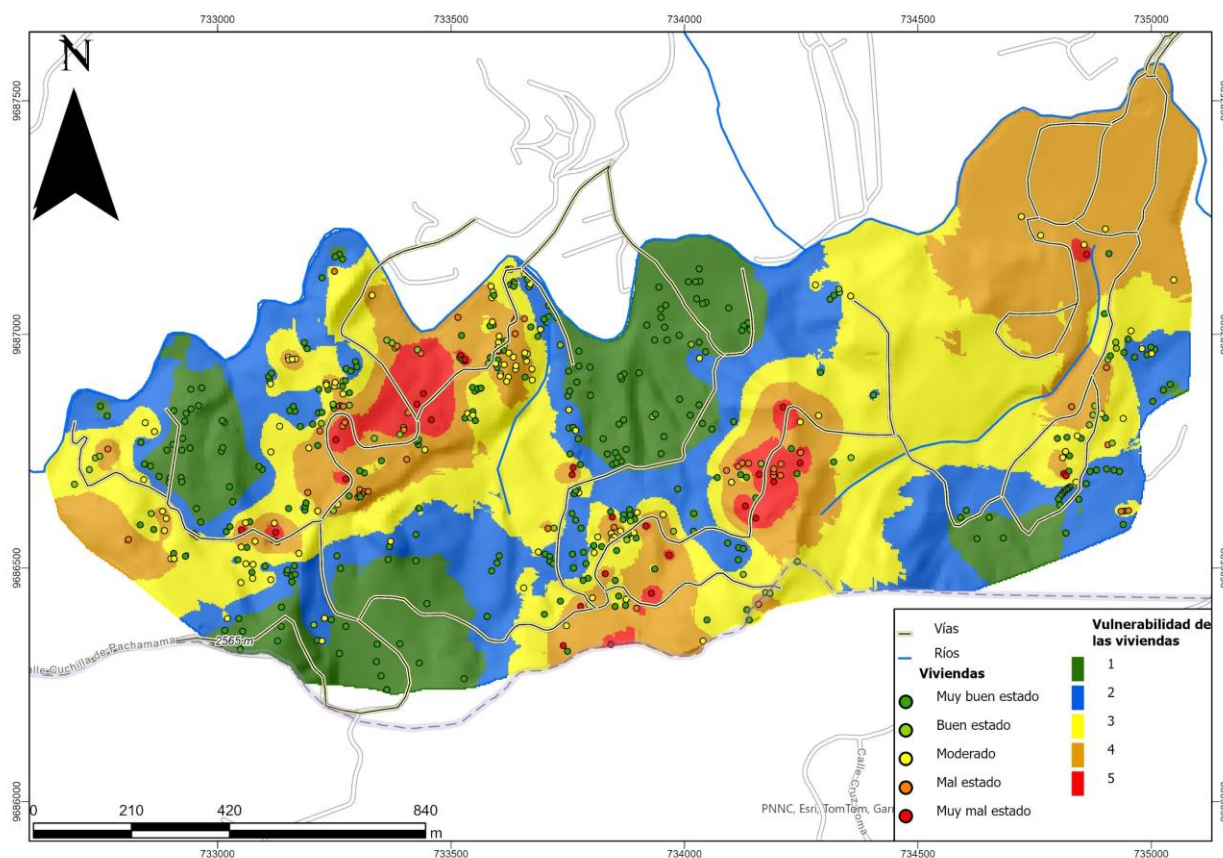
Figura 44 Mapa de exposición por uso de suelo

4.1.3 Cálculo de la vulnerabilidad

4.1.3.1 Vulnerabilidad de viviendas

La vulnerabilidad de las viviendas depende del uso de estas, si son de uso productivo, comercial y comunitario tienen a ser más vulnerables como es el caso de la escuela Cacique Tenemasa, el coliseo, la casa comunal y los dos templos religiosos. Estos al tener una mayor concurrencia de personas son áreas que generan mayor vulnerabilidad, mientras que las casas residenciales que están en buen estado construidas con hormigón armado representan casas más resistentes y por ende menos vulnerables (Figura 45).

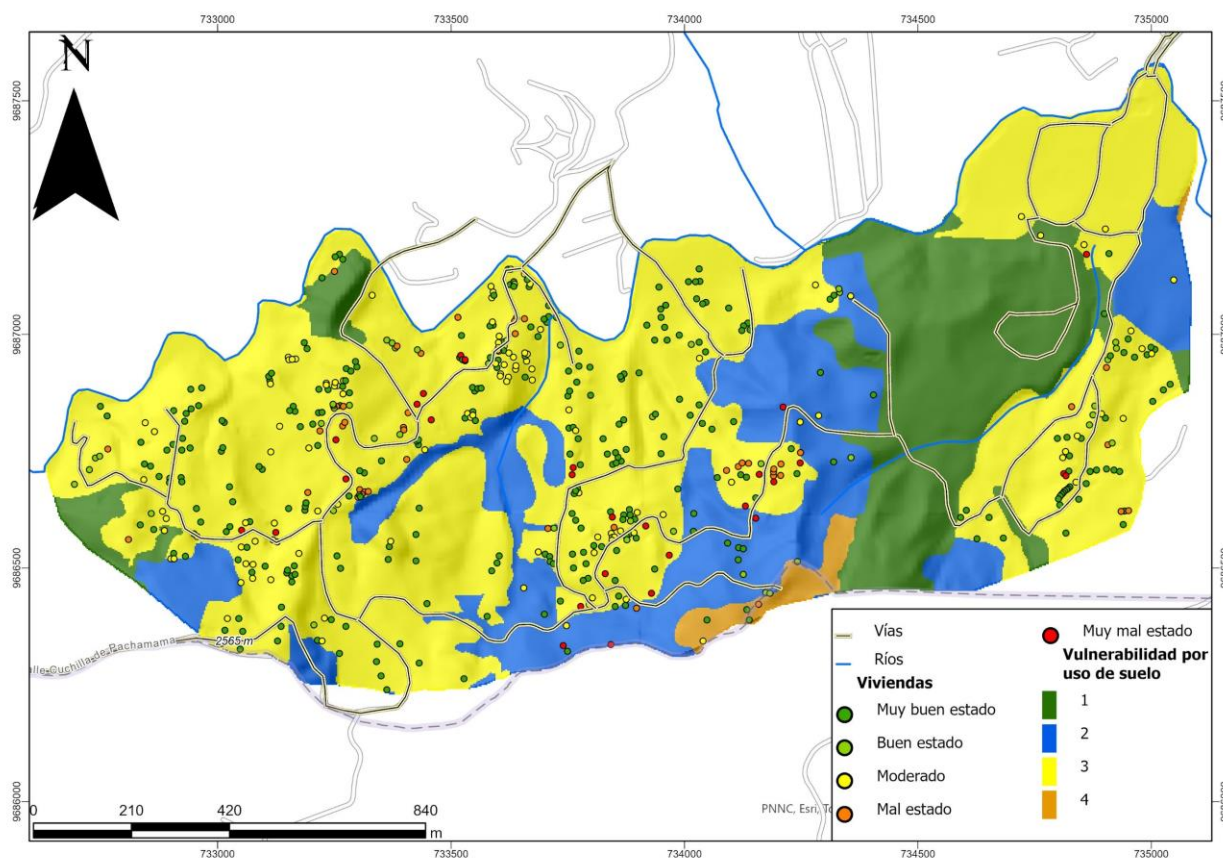
Figura 45 Mapa de vulnerabilidad de las viviendas



4.1.3.2 Vulnerabilidad de uso de suelo

El tipo de uso de suelo es un factor muy importante para la determinación de la vulnerabilidad de una zona, entre menos vegetación forestal posee es más fácil de erosionar y debido a esto genera mayor facilidad a deslizarse o caerse en bloques. Mientras que, las zonas con vegetación pequeña o los usados con fines agropecuarios y las zonas antrópicas representan el uso de suelo más vulnerable ante un deslizamiento, en el caso opuesto como son los bosques de eucalipto representan el área menos vulnerable (Figura 46).

Figura 46 Mapa de vulnerabilidad por el uso de suelo

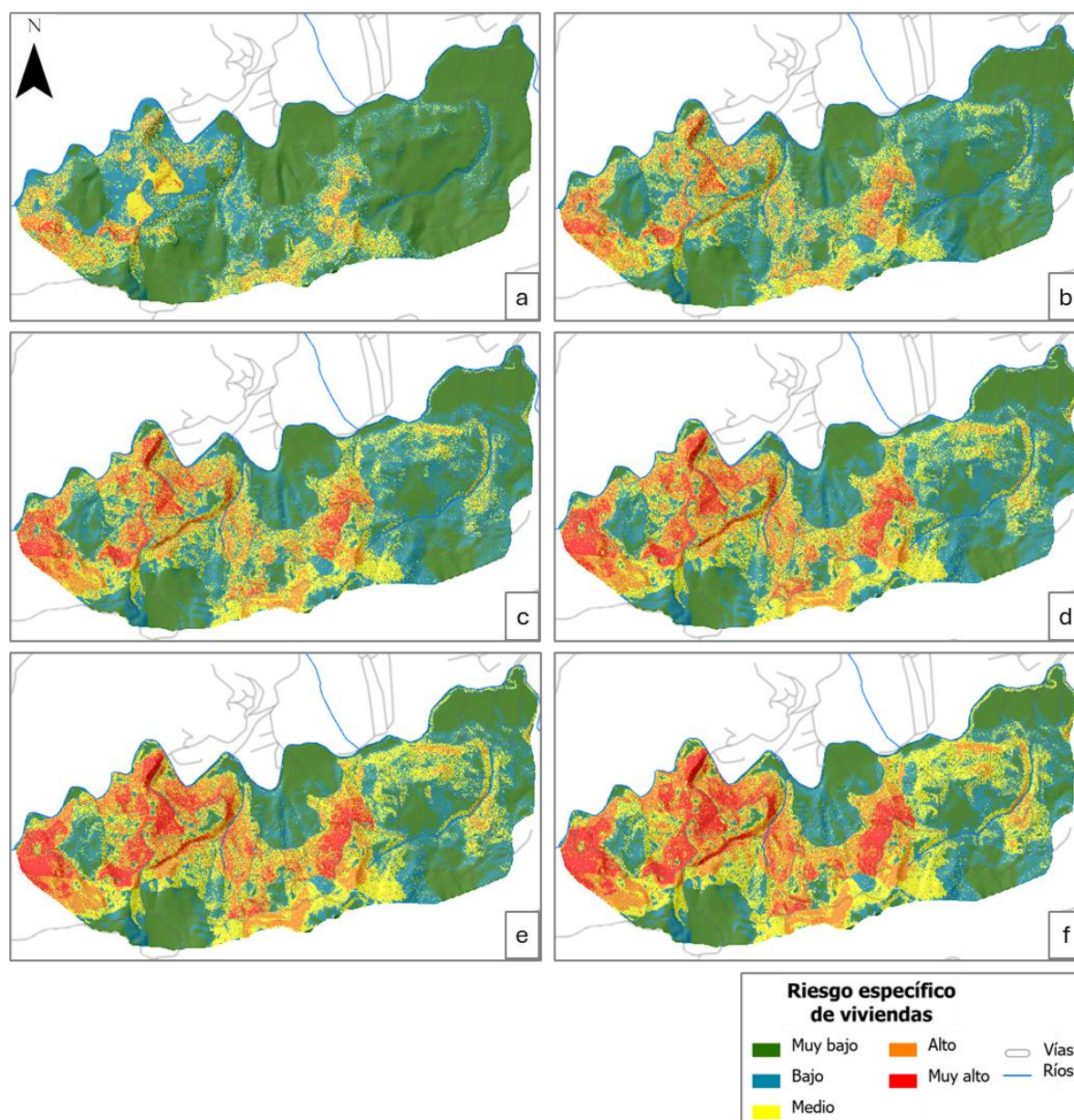


4.1.3.3 Mapa de riesgo de viviendas

Los mapas de la Figura 47 muestran cómo varía el riesgo específico de las viviendas de la comunidad en función del aumento de la profundidad de deslizamiento, evaluado a través de diferentes escenarios del FS. A profundidades menores, como 1 m (Figura 47 a), predominan las zonas con bajo riesgo (colores verde y amarillo), lo que indica que las pendientes superficiales tienen mayor estabilidad y, por tanto, menor probabilidad de afectar a las viviendas. Sin embargo, a medida que aumenta la profundidad del deslizamiento, como en los escenarios de 3 m, 5 m y 7.5 m (Figura 47 b, c y d), se observa un incremento progresivo de áreas con riesgo medio, alto y muy alto (colores amarillo, naranja y rojo), especialmente en zonas con pendientes pronunciadas o suelos más inestables. En profundidades mayores, como 10 m y 15 m (Figura 47 e y f), el riesgo elevado se intensifica y se extiende, afectando un mayor porcentaje del área de la comunidad. Este comportamiento refleja cómo el incremento de la profundidad del deslizamiento reduce el FS, lo

que aumenta significativamente el riesgo para las viviendas, destacando la necesidad de priorizar medidas de mitigación en las zonas de mayor vulnerabilidad.

Figura 47 Riesgo específico de viviendas



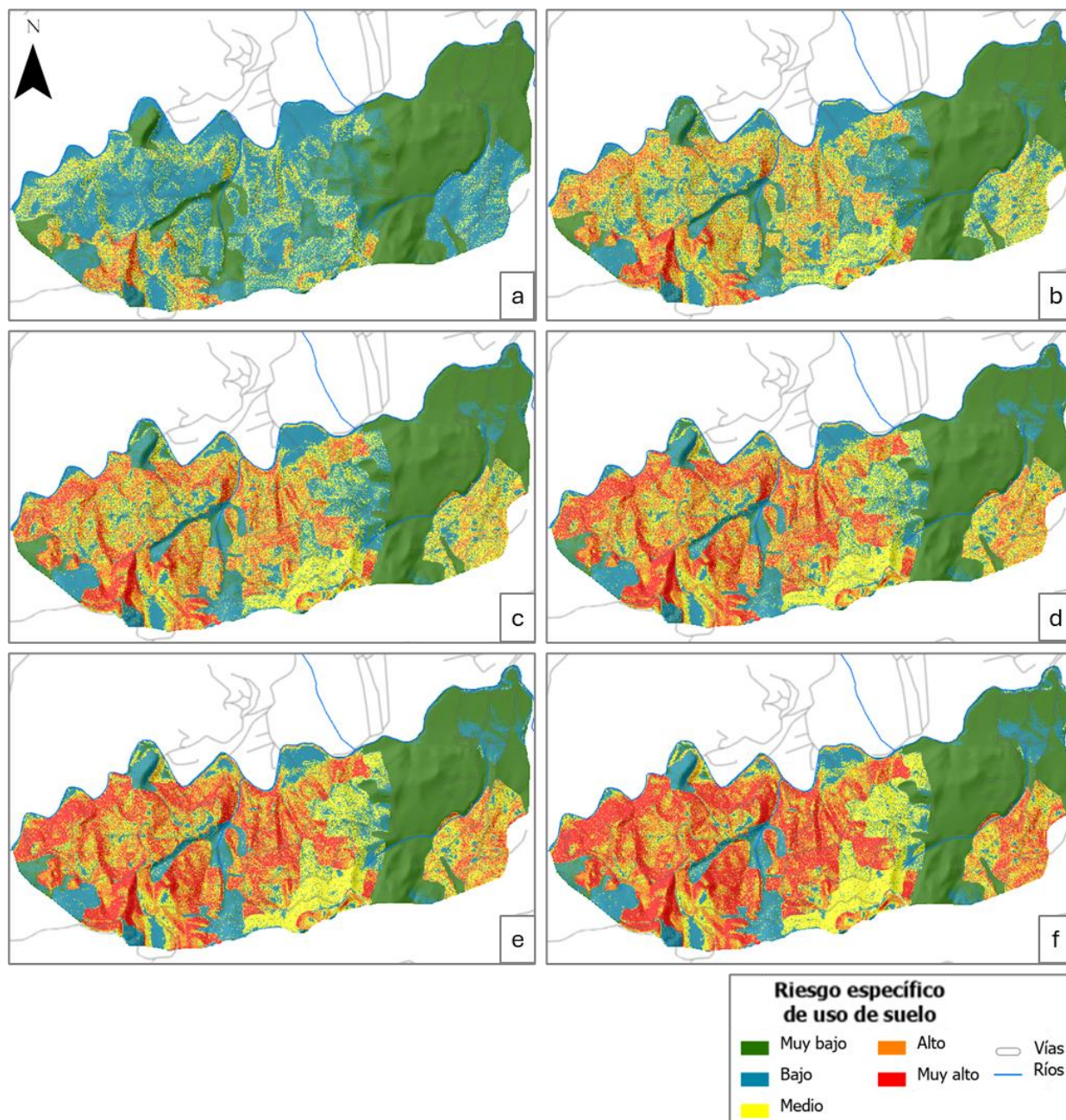
Nota. Imágenes de los mapas de riesgo específico de viviendas con variación del mapa de amenaza. a) FS a profundidad de 1 m, b) FS a profundidad de 3 m, c) FS a profundidad de 5 m, d) FS a profundidad de 7.5 m, e) FS a profundidad de 10 m, f) FS a profundidad de 15 m. Mapas en Apéndice B

4.1.3.4 Mapa de riesgo de uso de suelo

Los mapas muestran cómo el riesgo en el uso del suelo de la comunidad se modifica en respuesta a variaciones en la profundidad del deslizamiento (Figura 48). En el escenario más superficial (Figura 48 a), las áreas con cobertura forestal mantienen su estabilidad predominante, mientras que las zonas destinadas a actividades productivas presentan un menor grado de afectación. Sin embargo, a medida que la profundidad aumenta (Figura 48 b, c y d), las áreas más expuestas, como terrenos agrícolas y pastizales, comienzan a experimentar una expansión notable del riesgo, reflejando la disminución progresiva de la estabilidad del suelo. En los escenarios de mayor profundidad (Figura 48 e y f), los cambios se hacen más evidentes, ya que el riesgo abarca gran parte del territorio, afectando principalmente las áreas de uso productivo.

Este comportamiento evidencia que el uso del suelo está estrechamente ligado a la estabilidad del terreno, siendo crucial proteger las áreas forestales que actúan como zonas de menor riesgo y priorizar medidas de mitigación para las zonas productivas más vulnerables.

Figura 48 Riesgo específico de uso de suelo

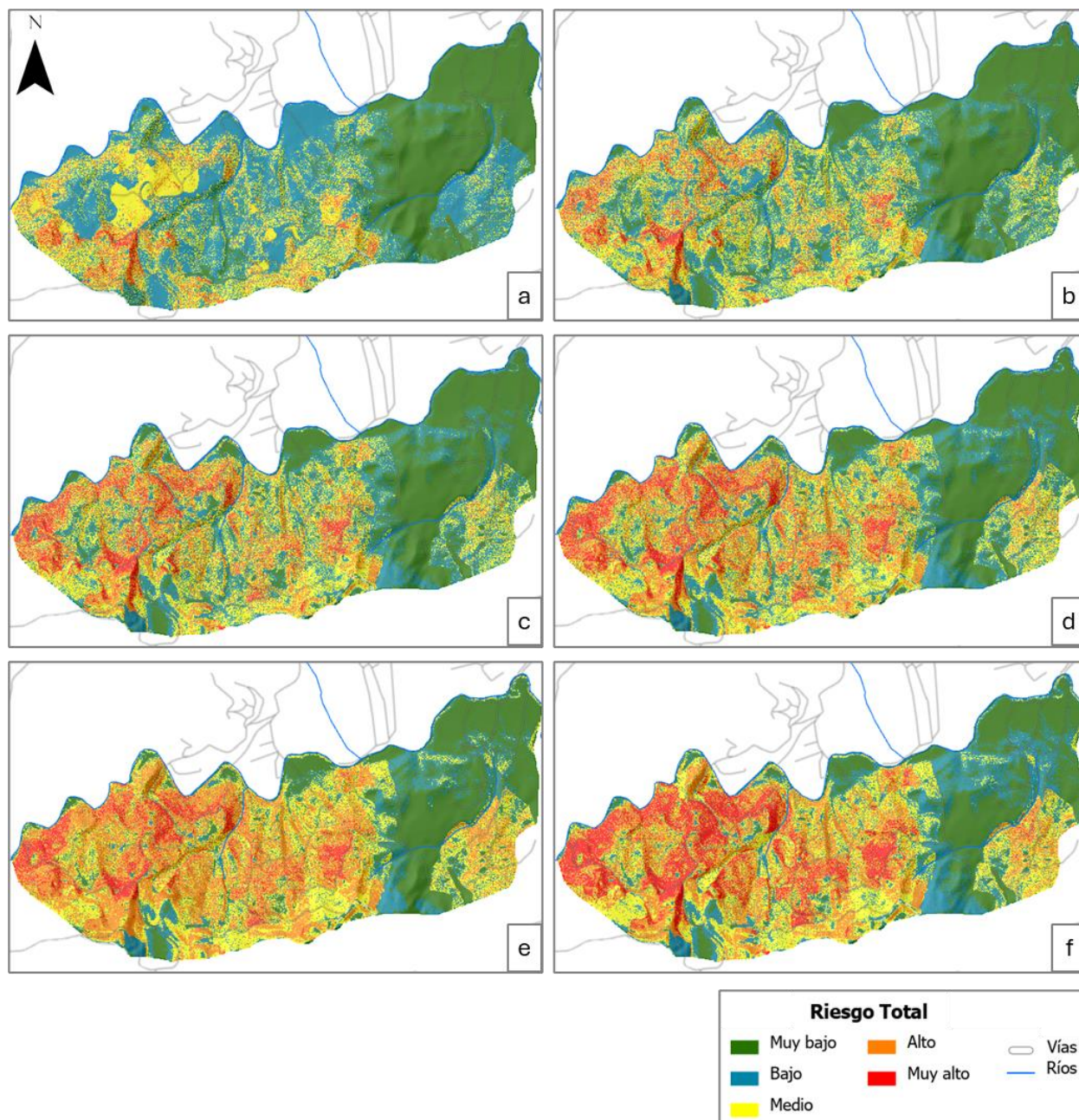


Nota. Imágenes de los mapas de riesgo específico de uso de suelo con variación del mapa de amenaza. a) FS a profundidad de 1 m, b) FS a profundidad de 3 m, c) FS a profundidad de 5 m, d) FS a profundidad de 7.5 m, e) FS a profundidad de 10 m, f) FS a profundidad de 15 m. Mapas en Apéndice B

4.1.3.5 Mapa de riesgo total

Con base en el análisis del mapa de riesgo total, que integra el riesgo de las viviendas y el uso del suelo, se observan patrones significativos de variación en los diferentes escenarios de profundidad de deslizamiento (Figura 49). En los escenarios más superficiales (Figura 49 a), las áreas con pendientes bajas ($< 25^\circ$) presentan un menor riesgo, manteniéndose relativamente estables. Sin embargo, a medida que aumenta la profundidad (Figura 49 b y c), se evidencia una expansión del riesgo hacia zonas con pendientes más pronunciadas (25° a 45°), donde los deslizamientos tienen mayor impacto debido a la inestabilidad inherente del terreno. En los escenarios de mayor profundidad (Figura 49 d, e y f), el riesgo se intensifica y abarca ampliamente las áreas de mayor inclinación, donde se combinan la susceptibilidad geológica y los efectos del uso intensivo del suelo. Este comportamiento refleja cómo las pendientes determinan la distribución espacial del riesgo, destacando la necesidad de medidas específicas de mitigación en estas áreas críticas.

Figura 49 *Riesgo total a deslizamientos*

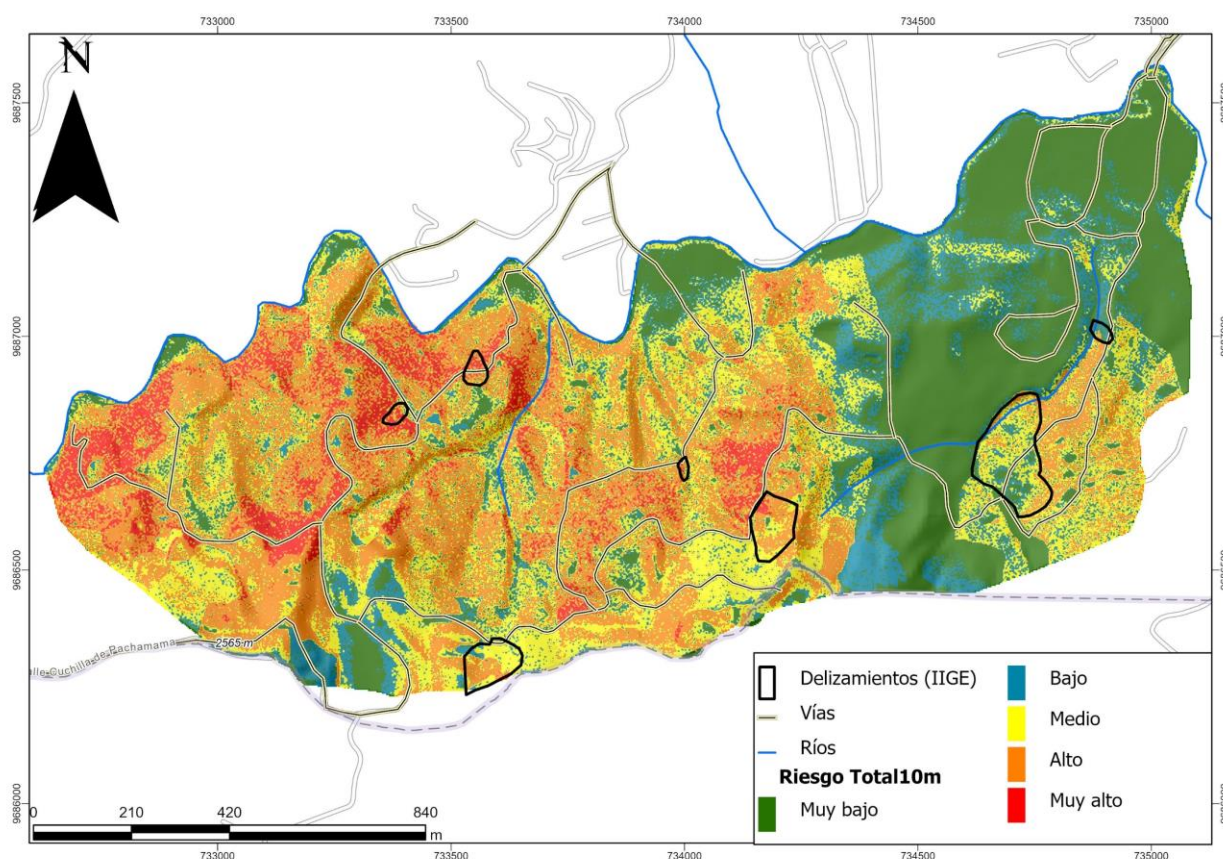


Nota. Imágenes de los mapas de riesgo total con variación del mapa de amenaza. a) FS a profundidad de 1 m, b) FS a profundidad de 3 m, c) FS a profundidad de 5 m, d) FS a profundidad de 7.5 m, e) FS a profundidad de 10 m, f) FS a profundidad de 15 m. Mapas en

Apéndice B

Considerando que el mapa de riesgo de deslizamiento con un plano de falla a una profundidad de 10 m se identifica como el más representativo, se procedió a compararlo con las zonas de deslizamiento mapeadas por el IIGE (Figura 50). El análisis revela que, de los siete movimientos en masa identificados, tres se ubican en áreas clasificadas como de muy alto a alto riesgo, tres en zonas de riesgo moderado, y uno en una zona de riesgo bajo. Estos resultados indican que el modelo utilizado en el presente estudio presenta un alto grado de confiabilidad y precisión, ya que permite correlacionar de manera efectiva los escenarios modelados con los deslizamientos observados en campo. Esto valida su aplicabilidad como herramienta para la gestión de riesgos en la comunidad analizada.

Figura 50. Mapa de riesgo vs deslizamientos mapeados por el IIGE

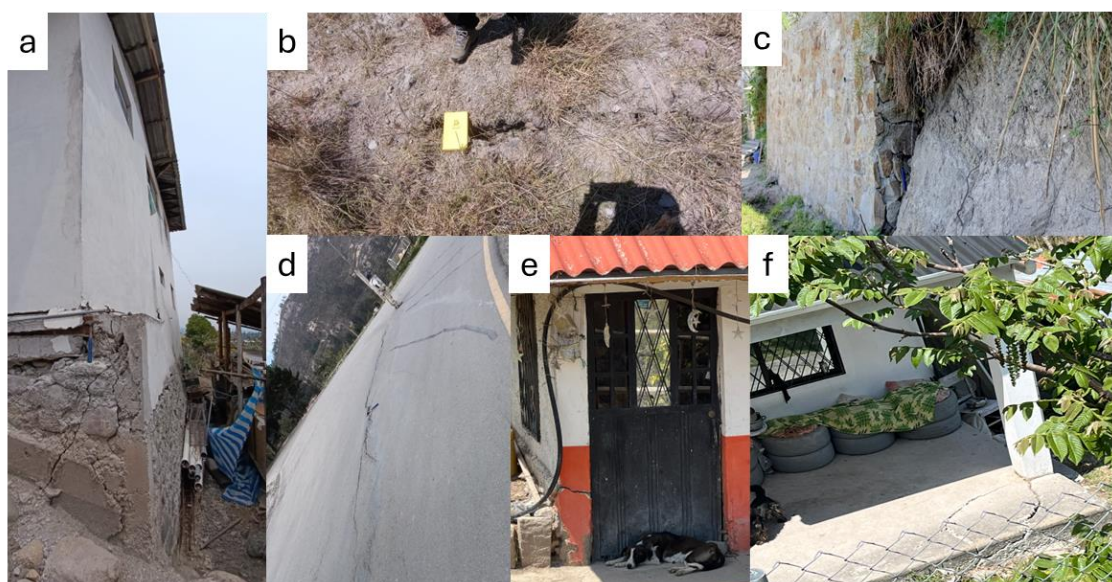


4.1.4 Hoja de ruta

4.1.4.1 Medidas de mitigación

De los 9 indicadores de inestabilidad en una ladera descritos en la Tabla 1 se pueden comprobar 6 de estos en la comunidad de Zumbahuayco (Figura 51). Debido a esto, es importante implementar medidas de prevención y mitigación que permitan estabilizar la ladera y otras acciones que ayuden a preparar a la población ante algún evento de deslizamiento.

Figura 51 *Indicadores de inestabilidad de talud en la comunidad*



Nota: a) estructura inclinada, b) grietas en el terreno, c) inclinación de muros, d) carretera hundida, e) puerta con dificultad de cerrar, f) agrietamiento de los pisos.

En las regiones montañosas de Iberoamérica, las comunidades han empleado diversas técnicas para afrontar la inestabilidad de laderas, desde la construcción de terrazas con piedra o bambú hasta sistemas de alerta comunitarios basados en radios y sirenas (Cardona Arboleda et al., 2020). Estas medidas reflejan una combinación de adaptaciones duras, como infraestructuras físicas, y blandas, centradas en la educación y la organización comunitaria. Además, enfoques más integrales, como la planificación territorial y el fortalecimiento de la resiliencia mediante soluciones basadas en ecosistemas, han demostrado ser efectivos. A continuación, se presentan

acciones clave para mitigar los riesgos asociados con la inestabilidad de laderas (Cardona Arboleda et al., 2020):

- **Evaluación específica de la amenaza y el riesgo:** Es fundamental realizar estudios técnicos exhaustivos que permitan identificar zonas de alto riesgo de deslizamientos, considerando factores geológicos, climáticos y geomorfológicos. Además de los análisis tradicionales, se recomienda llevar a cabo ensayos geofísicos de mayor profundidad para determinar las condiciones del subsuelo, así como un análisis hidrogeológico que permitan evaluar la influencia del agua subterránea en la estabilidad de los taludes. También es crucial incorporar un análisis histórico de deslizamientos para identificar patrones recurrentes y áreas previamente afectadas. Esta información se puede integrar al presente estudio en mapas de susceptibilidad y riesgo que identifiquen áreas críticas de forma mucho más específica, sirviendo como base para la planificación y toma de decisiones informadas.

Además, al implementar el dato de permeabilidad con los rásters de la Tabla 16 se puede realizar un análisis en SagaGis con el modelo Shaltab para conocer la cantidad de mm que se mueve el suelo por día, dándole un plus al presente proyecto.

- **Incorporación del riesgo en la planificación territorial:** Integrar la amenaza de deslizamientos en los planes de desarrollo urbano y en el diseño de infraestructura. Esto asegura que las construcciones futuras se ubiquen en zonas seguras y que las existentes sean adaptadas adecuadamente. *Ejemplo:* Restricción de desarrollos inmobiliarios en áreas identificadas como de alta susceptibilidad.
- **Intervenciones correctivas y preventivas en infraestructura:** Implementar medidas correctivas, como refuerzos estructurales, y prospectivas, como la planificación de nuevas obras considerando los riesgos existentes. *Ejemplo:* Construcción de muros de contención en taludes críticos, que pongan en peligro a infraestructuras (Figura 52).

Figura 52 Taludes críticos



- **Diseño y construcción de obras de estabilidad:** Aplicar técnicas de control de erosión y soluciones basadas en la naturaleza, como reforestación con especies nativas que estabilicen el suelo. *Ejemplo:* Uso de barreras vegetales en combinación con sistemas de drenaje superficial en zonas que ya se han demostrado que son inestables como lugares en donde se han observado grietas, escarpes (Figura 16) o deslizamientos antiguos (Figura 53).

Figura 53 Deslizamiento antiguo



- **Monitoreo y observación continua:** Establecer redes de monitoreo que incluyan estaciones meteorológicas y sensores de desplazamiento para obtener datos en tiempo real

sobre posibles desencadenantes de deslizamientos. *Ejemplo:* Sistemas automáticos que alerten cuando se superan umbrales críticos de lluvias.

- **Sistemas de alerta temprana y evacuación:** Diseñar sistemas de alerta locales, como sirenas y mensajes automatizados, complementados con rutas de evacuación claras. La participación comunitaria es esencial para garantizar su efectividad. *Ejemplo:* Activación de sirenas en áreas rurales ante lluvias prolongadas, combinada con simulacros comunitarios.
- **Programas educativos y de capacitación:** Promover la educación sobre riesgos mediante talleres, campañas de sensibilización y programas escolares que fortalezcan la capacidad de respuesta de la población. *Ejemplo:* Capacitación sobre cómo interpretar mapas de riesgo y señales de alerta.
- **Gestión financiera para la recuperación:** Desarrollar esquemas de seguros colectivos e instrumentos paramétricos que permitan acceder rápidamente a fondos en caso de deslizamientos. *Ejemplo:* Fondos de emergencia gestionados por gobiernos locales para apoyar a las familias afectadas.
- **Mantenimiento de infraestructura existente:** Asegurar el mantenimiento periódico de carreteras, puentes y sistemas de drenaje para garantizar su resiliencia ante eventos climáticos extremos. *Ejemplo:* Limpieza regular de cunetas y canales de desvío de agua en áreas de riesgo.

4.1.4.2 Sistema de alerta temprana

➤ Conocimiento de la amenaza

En esta etapa se realiza un análisis detallado de las áreas propensas a deslizamientos mediante la obtención de la mayor cantidad de datos geológicos, geomorfológicos y climáticos, esto incluye datos actuales como estudios históricos para obtener menor incertidumbre en los resultados.

El estudio actual toma datos propios del suelo, en el cual se identifican propiedades intrínsecas como granulometría, índice de plasticidad, cohesión, ángulo de fricción y permeabilidad. Estos parámetros son útiles para la elaboración de modelos de susceptibilidad. Sin embargo, es posible enriquecer el análisis incorporando datos adicionales.

Por ejemplo, se pueden realizar ensayos geofísicos a mayor profundidad que los alcanzados en este estudio. Además, es importante llevar a cabo un análisis hidrológico de la comunidad para conocer los drenajes de agua lluvia y los provenientes de las viviendas, ya que estos influyen significativamente en la saturación del suelo y su inestabilidad. También sería relevante medir las condiciones de precipitación para integrar este factor en el análisis.

Asimismo, se recomienda formar una base de datos de deslizamientos históricos. Esto permitirá identificar puntos críticos propensos a deslizamientos y evaluar si estos eventos se repiten en el tiempo. Finalmente, se propone establecer normas de construcción y realizar verificaciones en las viviendas existentes para identificar aquellas que no cumplen con las normativas, clasificándolas como más vulnerables.

➤ **Monitoreo**

Para la etapa de monitoreo se emplean dispositivos que pueden ser artesanales o tecnológicos para obtener datos a través del tiempo, estos pueden ser sensores de humedad, inclinómetros, piezómetros, estaciones meteorológicas, todos estos con el propósito de medir parámetro clave como el movimiento del suelo, niveles de agua subterránea y precipitaciones.

A continuación, se enumeran algunos estudios que se pueden tomar de referencia sobre métodos diversos de monitoreo de deslizamientos, los cuales pueden brindar información sobre el cómo y para qué utilizar cada uno.

- Teledetección para la detección y monitoreo de deslizamientos, referencia de Sataer et al. (2022).
- Establecimiento de una red de monitoreo GPS diferencial, referencia de Toral et al. (2022).

- Monitoreo de deslizamientos utilizando el sistema de extensómetros artesanales, referencia de López Castillo (2015).
- Uso de imágenes satelitales de radar para la identificación y monitoreo de deslizamientos, referencia de Fonseca Arroyave (2020).
- Uso de drones y sensores remotos para el monitoreo de laderas: una revisión, referencia de Gómez & Pabón (2021).
- Análisis y diseño de una red de sensores ópticos distribuidos de larga distancia basada en FBG, referencia de Bustamante Pasmíño (2020).

Con los datos obtenidos a través de los diversos métodos de monitoreo se desarrollan modelos que pueden ser matemáticos, estadísticos y geotécnicos que simulan el comportamiento del talud ante diversos escenarios, como lluvias intensas o actividad sísmica. Este modelado permite estimar el momento crítico para la activación de alertas.

➤ **Difusión**

Se establece un protocolo claro para emitir alertas a las comunidades en riesgo. Esto incluye la creación de una red de comunicación entre la misma población, pudiendo realizarse a través de varios medios:

- Sirenas y altavoces ubicados en puntos estratégicos para emitir alertas sonoras, la cual es una opción económica y fácil de implementar. Se pueden tener grabaciones con instrucciones claras de lo que está sucediendo y lo que se debe hacer, para solamente activarlas y que les brinde una guía a las personas.
- Generar una red de líderes capacitados en cada barrio que actúen como puntos de contacto para transmitir las alertas y organizar a la comunidad, siendo personas más allegadas a toda la población y con los cuales se sientan más en confianza y seguros.
- Transmisión de mensajes SMS, aunque el acceso a smartphones puede ser limitado, esta es una herramienta muy accesible, esto se puede automatizar para enviar al mismo

tiempo el mismo SMS a todos. Para los que no poseen este dispositivo, se pueden usar las notificaciones por radio para informar de manera oportuna, dándole tiempo a la población para prepararse, abastecerse de lo necesario y poder movilizarse a centros de acogida ante el riesgo a que suceda un evento de deslizamiento.

- Otro método más tradicional, se puede emplear el campanario en los templos de la comunidad, al existir dos de estos se puede llegar a mayor cantidad de área.

➤ **Capacidad de respuesta**

Esta es una fase que se aplica después de que suceda un evento peligroso, sin embargo, es una de las fases más importantes de trabajar antes de que suceda el evento, se centra en la preparación y educación de la población a enfrentar y recuperarse posteriormente. Estas actividades podrían ser:

- Localizar áreas seguras destinadas a la creación de puntos de encuentro y albergues para la comunidad. Estos espacios deben cumplir con las normativas de seguridad necesarias y contar con provisiones de alimentos, así como servicios básicos, que permitan a la población permanecer allí de manera temporal sin interrupciones en su funcionamiento.
- Generar simulacros que entrenen a la población para que puedan responder adecuadamente ante la amenaza, dándole la capacidad a la población de reaccionar de forma rápida y segura.
- Desarrollar un sistema de señalética en donde se tenga las zonas que con el conocimiento de la amenaza se le haya dado como una zona de alto, medio o bajo riesgo, y que la población disponga de esta información, además de marcar las rutas de evacuación hacia los puntos de encuentro.

- La implementación de un comité comunitario de gestión de riesgo es algo indispensable si se trata de mejorar y dar soluciones ante un evento peligroso, el capacitar a este comité y brindarle herramientas para que su trabajo se efectivo.

4.2 Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian una interacción compleja entre factores geológicos, climáticos y antrópicos que exacerban la susceptibilidad de la comunidad de Zumbahuayco frente a deslizamientos. Los sectores más críticos, como Pedregal y Rayoloma, presentan pendientes pronunciadas ($> 25^\circ$) y alta saturación de los suelos, ($> 50\%$) lo que los hace particularmente vulnerables. Los mapas de susceptibilidad generados permitieron identificar estas áreas como las más propensas a movimientos en masa, confirmando que la infiltración de agua es un desencadenante clave que reduce significativamente la resistencia al corte del terreno.

Asimismo, los factores antrópicos, como la deforestación, el uso intensivo de tierras para la agricultura y la falta de planificación en el desarrollo urbano, agravan la inestabilidad del terreno. La mayor parte de la comunidad cuenta con suelos arcillosos que retienen agua, lo cual les proporciona una humedad del 12% incluso durante la época de sequía que atravesaba el país al momento de este estudio. Esta característica hace que los suelos sean altamente aptos para uso agrícola. Sin embargo, la sobreexplotación agrícola, el riego artificial y el manejo inadecuado de las aguas residuales de las viviendas —donde, según el INEC, hasta el censo de 2020, el 73% de la población utiliza pozos sépticos para eliminar estas aguas— contribuyen a una mayor inestabilidad del talud. Además de que la zona esta atravesada por un sistema de fallas según determinó el IIGE en su informe sobre la comunidad en 2024.

A través de los 6 mapas de riesgo total generados se puede evidenciar el incremento del área en alto riesgo al aumentar la profundidad de la zona de falla de 1 m a 15 m, pasando de 3.03 a 27.12 ha, afectando 9 veces más el área de la comunidad, lo que implica tomar medidas urgentes teniendo en cuenta este escenario representando el 14.5% del área total. Al igual el área en alto

riesgo aumenta de 17.45 a 42.94 ha, lo que representa en el peor escenario un 22.9% del territorio en alto riesgo de deslizamiento (Tabla 17).

Tabla 17 Área en riesgo por escenario de la amenaza

Riesgo					
Amenaza / Área	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
(ha)					
1m	55.30	77.73	33.70	17.45	3.03
3m	69.36	48.06	42.48	21.57	5.8
5m	62.04	42.26	40.83	30.89	11.24
7.5m	52.45	39.59	41.73	37.10	16.40
10m	49.56	27.57	42.19	55.19	12.57
15m	40.24	36.42	40.53	42.94	27.12

Estos impactos se ven amplificados por el cambio climático, que ha incrementado la frecuencia y la intensidad de las precipitaciones en la región. La combinación de estas variables genera un escenario en el que 63 viviendas, junto con la infraestructura vial, han sufrido daños parciales o totales, afectando gravemente la calidad de vida y las actividades económicas locales.

La aplicación de herramientas geofísicas, como la ERT, combinada con análisis geotécnicos, permitió realizar un diagnóstico preciso de las condiciones del terreno. Este enfoque metodológico demostró ser eficaz para identificar las zonas más vulnerables, sentando las bases para implementar medidas de mitigación basadas en evidencia. Además, la participación comunitaria fortaleció la aceptación y comprensión de los riesgos, lo que resulta esencial para una gestión sostenible del territorio.

Capítulo 5

5.1 Conclusiones

- La comunidad de Zumbahuayco está compuesta principalmente por rocas sedimentarias y depósitos volcanoclásticos, con pendientes pronunciadas y suelos altamente susceptibles a la saturación. Estos factores, combinados con procesos geomorfológicos como escarpes y grietas de tracción, confirman una amenaza significativa por deslizamientos en los sectores de Pedregal y Rayoloma, cubriendo aproximadamente 121 ha.
- De las 63 viviendas afectadas, el 40% presenta daños estructurales graves, comprometiendo la seguridad de los habitantes. Las vías de acceso, esenciales para el comercio y transporte, también están severamente impactadas, lo que limita las actividades económicas de subsistencia, como la agricultura y ganadería.
- El análisis de riesgo clasifica a los sectores de Pedregal y Rayoloma como de alto riesgo, debido a la combinación de alta exposición y vulnerabilidad. Esto exige priorizar medidas correctivas, como sistemas de drenaje y reforestación, junto con estrategias de planificación territorial para restringir construcciones en áreas críticas y la pronta implementación de un SAT.

5.2 Recomendaciones

El estudio plantea varias recomendaciones a lo largo de la ejecución del proyecto en especial en la parte de la aplicación de los SAT, por lo tanto, se plantean recomendaciones más específicas sobre lo que se puede implementar a este estudio y lo que ayudaría a prevenir el riesgo a deslizamientos.

- Para mitigar los riesgos identificados, se recomienda implementar una serie de acciones integrales. En primer lugar, es fundamental fortalecer la infraestructura existente mediante la construcción de sistemas de drenaje que reduzcan la infiltración de agua y la instalación de muros de contención en áreas críticas. Estas intervenciones estructurales deben complementarse con soluciones basadas en la naturaleza, como la reforestación con

especies nativas de raíces profundas y la creación de barreras vegetales para estabilizar el suelo y prevenir la erosión.

- Implementar las normas de construcción, utilizando materiales resistentes, realizando una preparación del suelo antes de empezar a construir y darle más atención a la parte funcional y de resistencia que a la parte ornamental.
- Actualizar el plan de ordenamiento territorial, priorizando la restricción de actividades humanas en zonas de alto riesgo y estableciendo rutas de evacuación claras y accesibles. La planificación territorial debe basarse en los datos obtenidos en este estudio, lo que garantizará decisiones informadas y efectivas.
- Promover la participación de la comunidad a través de programas de educación y sensibilización sobre riesgos. Talleres participativos y simulacros regulares contribuirán a fortalecer la capacidad de respuesta de los habitantes frente a eventos adversos. Además, la implementación de un sistema de alerta temprana, con sensores que monitoreen condiciones críticas y sirenas para emitir alarmas, permitirá una respuesta rápida y coordinada en situaciones de emergencia. Estas medidas no solo garantizarán la seguridad de Zumbahuayco, sino que también servirán como modelo replicable en otras comunidades con condiciones similares.

Referencias

- Alcántara-Ayala, Irasema, A. E. L., Carlos Gutiérrez Martínez, L. D. M., & Rioja, e I. N. (1996). *Inestabilidad de laderas*.
- Alcántara-Ayala, I. (2021). *Integrated landslide disaster risk management (ILDRiM): the challenge to avoid the construction of new disaster risk*. *Environmental Hazards*, 20(3), 323–344. <https://doi.org/10.1080/17477891.2020.1810609>
- Alcántara-Ayala, I. (2023). *Erebo y las montañas movedizas* (U. N. A. de México (ed.)). <https://doi.org/https://doi.org/10.14350/sc.11>
- Alcántara-Ayala, I. (2024). *Landslide Disaster Risk: Refreshing Notions and Terminology in the Context of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction*. 117–123. https://doi.org/10.1007/978-3-031-64884-7_16
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J.-M., Lagreulet, S., Segovia, M., Font, Y., Lamarque, G., Yepes, H., Mothes, P., Rolandone, F., & others. (2014). *Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity*. *Tectonics*, 33(2), 67–83.
- Barzaga, M. P., Hernández, O. R. C., & Concepción, C. B. (2022). *Aplicación de los métodos geofísicos georradar y tomografía eléctrica, en el estudio de taludes. Casos de estudio: Zona Especial de Desarrollo Mariel y Castillo de Santo Domingo de Atarés, Cuba*. 5, 11.
- Beltrán, J. (2023). *Dos factores que se suman a las lluvias y provocan deslaves en Ecuador*. *Primicias*. <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/lluvias-deslaves-ecuador-alausi-huigra-alerta/>
- Bernabeu Garcia, M., & Diaz Torres, J. A. (2014). *Methodologies for risk analysis in slope instability; Metodologías de análisis de riesgos en inestabilidad de laderas (Estado del arte)*. *Ingeniería Civil* (Madrid), 175.
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., & Wisner, B. (2014). *At risk: natural hazards, people's*

vulnerability and disasters. Routledge.

Bristow, C. R. (1973). *Guide to the geology of the Cuenca Basin, southern Ecuador*. Ecuadorian Geological and Geophysical Society.

Bristow, C. R., & Hoffstetter, R. (1977). *Lexique stratigraphique international: Amérique Latine. Ecuador:(incl. Galapagos)*. Centre National de la Recherche Scientifique.

Buestán, C. A., & Saldaña, J. C. (2023). *Estudios Definitivos Para El Puente Ubicado Sobre El Río Déleg En El Tramo Que Conecta A Las Comunidades De Ayancay Y Zumbahuayco, Javier Loyola-Azogues-Cañar*. Universidad del Azuay.

Bustamante Pasmiño, J. J. (2020). *Diseño de una red de fibra óptica para el monitoreo de deslizamientos de tierra por medio de un sistema de detección FBG para la v\i)a LojaZamora*.

Cabrera, P. E. (2022). *Estudio de necesidades de transporte comercial mixto para la comunidad de Zumbahuayco*. Universidad Católica de Cuenca.

Caleca, F., Tofani, V., Segoni, S., Raspini, F., Rosi, A., Natali, M., Catani, F., & Casagli, N. (2022). *A methodological approach of QRA for slow-moving landslides at a regional scale*. *Landslides*, 19(7), 1539–1561. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01875-x>

Carballo, D. A. C., & Carazo, R. E. (2012). *Sistemas de alerta temprana para monitoreo de deslizamientos*. *Infraestructura Vial*, 25, 14–19.

Cardona Arboleda, O. D., Tibaduiza, M. L. C., Arraiol, K. C. M., Alcantara-Ayala, I., & Saito, S. M. (2020). *Inestabilidad de laderas - deslizamientos*. In *Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos – Informe RIOCCADAPT* (pp. 419–458). McGraw-Hill, Ed.

Cardona, O. D. (2013). *The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: a necessary review and criticism for effective risk management*. In *Mapping vulnerability* (pp. 37–51). Routledge.

- Collot, J.-Y., Michaud, F., Alvarado, A., Marcaillou, B., Sosson, M., Ratzov, G., Migeon, S., Calahorrano, A., & Pazmino, A. (2009). *Visión general de la morfología submarina del margen convergente de Ecuador-Sur de Colombia: implicaciones sobre la transferencia de masa y la edad de la subducción de la Cordillera de Carnegie*. *Geología y Geofísica Marina y Terrestre Del Ecuador: Desde La Costa Continental Hasta Las Islas Galápagos*, 47–74.
- Egbue, O., & Kellogg, J. (2010). *Pleistocene to present North Andean “escape.”* *Tectonophysics*, 489(1–4), 248–257.
- El Telégrafo. (2023). *Alausí: nuevo balance del deslizamiento de tierra*.
<https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/nacionales/44/alausi-nuevo-balance-del-deslizamiento-de-tierra>
- El universo. (2024). *Tres muertos y un herido por deslizamiento de magnitud en Baños*.
<https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/tres-desaparecidos-y-un-herido-por-deslizamiento-de-magnitud-en-banos-nota/>
- ESRI. (2024). *Kriging (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro | Documentación*.
<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/kriging.htm>
- Fellenius, W. (1922). *Statens jarnjvagnars geotekniska commission*. Stockholm Sweden.
- Fonseca Arroyave, D. A. (2020). *Uso de imágenes satelitales de radar para la identificación y monitoreo de deslizamientos en Antioquia*.
- GAD Parroquial Javier Loyola. (2015). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Javier Loyola*.
- Ganadería, M. de A. y. (2019). *Catálogo de Datos - Metadatos*.
<http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/0a26e971-5722-4a10-8a5e-d04298b0f017>
- George, S. W. M. (2019). *Basin evolution, deformation, and magmatism during variable tectonic regimes in the region linking the central and northern Andes*.

- Gómez, L. F. A., & Pabón, S. B. C. (2021). *Uso de drones y sensores remotos para el monitoreo de laderas: una revisión*. Ingenierías USBMed, 12(2), 65–73.
- Gonzaga Garzón, M. A. (2018). *Evolución tectono-sedimentaria de la cuenca miocénica de Cuenca*. Quito, 2018.
- Gonzalez De Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica* (P. Educacion (ed.)).
- Gualaceo, G. (2024). *Desastre la Josefina*. <https://gualaceo.gob.ec/desastre-de-la-josefina/>
- Gutscher, M.-A., Malavieille, J., Lallemand, S., & Collot, J.-Y. (1999). *Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision*. Earth and Planetary Science Letters, 168(3–4), 255–270.
- Hervás, J., Barredo Cano, J. I., & Lomoschitz, A. (2002). *Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante SIG, teledetección y métodos de evaluación multicriterio: aplicación a la depresión de Tirajana (Gran Canaria)*.
- Hughes, R. A., & Pilatasig, L. F. (2002). *Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador*. Tectonophysics, 345(1–4), 29–48.
- Hungerbuhler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egüez, A., Peterson, D., Helg, U., & Hammer, C. (2002). *Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador*. Earth-Science Reviews, 57, 75–124. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00071-X)
- IIGE. (2024). *Análisis de las deformaciones en el terreno, en la comunidad de Zumbahuayco, cantón Azogues, provincia de Cañar, mediante el levantamiento de información topográfica y geológica*.
- INEC. (2024). *Inicio - Censo Ecuador*. <https://www.censoecuador.gob.ec/>
- Infante Pacheco, V. E. (2020). *Caracterización litológica, petrofísica y estructural en un sitio de estudio del noreste de México a través de datos de sísmica de refracción y de resistividad eléctrica*. Universidad Autónoma de Nuevo León.

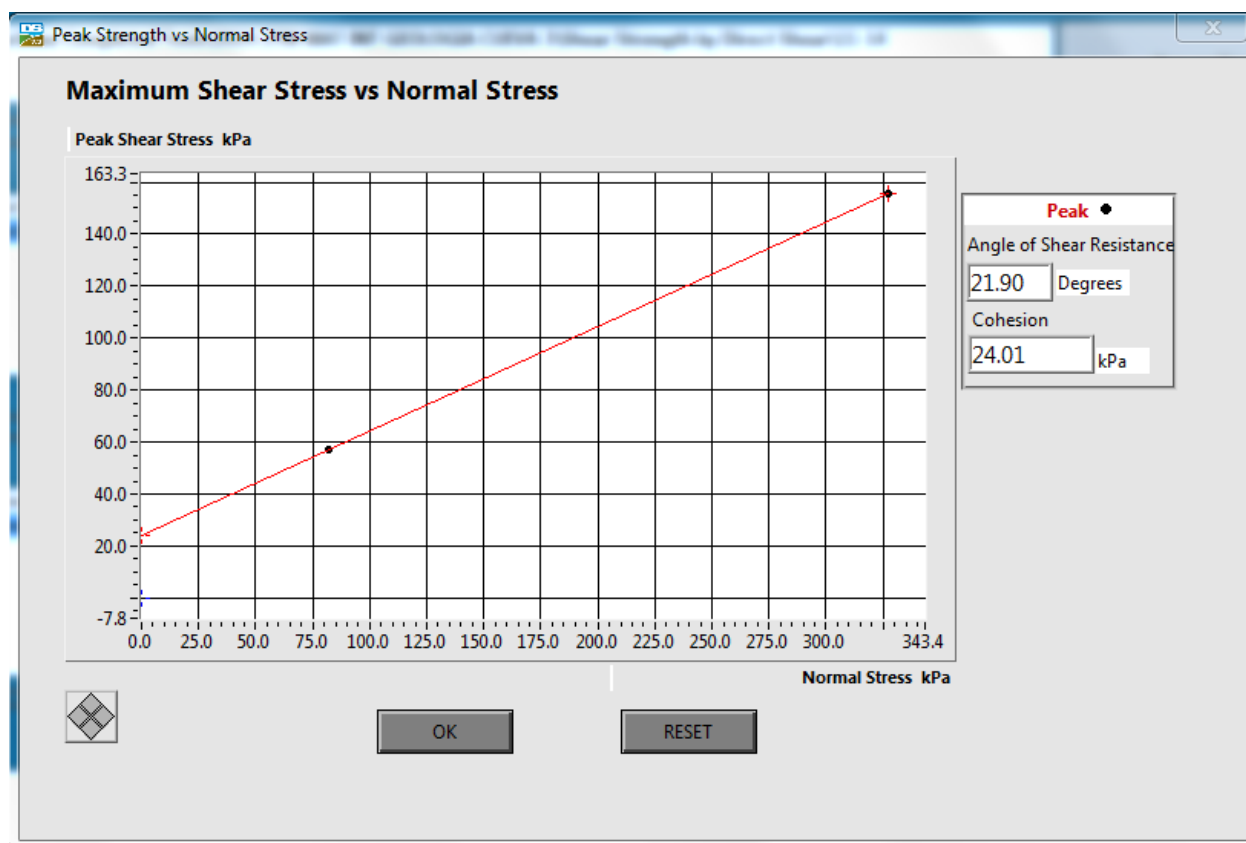
- INIGEMM. (2013). *Zonificación de Susceptibilidad y Peligros/Amenazas por Procesos de Movimientos en Masa, Escala 1:50.000, del Territorio Ecuatoriano, Fase I. Memoria Técnica, I*, 1–117.
- Jibson, R. W., Harp, E. L., & Michael, J. A. (2000). *A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps*. *Engineering Geology*, 58(3–4), 271–289.
- Lacasse, S., & Nadim, F. (2009). *Landslide risk assessment and mitigation strategy. Landslides--Disaster Risk Reduction*, 31–61.
- Lascano, A. (2024). *El aluvión en La Gasca y la negligencia histórica*. <https://www.labarraespaciadora.com/medio-ambiente/el-aluvion-en-la-gasca-y-la-negligencia-historica/>
- Lavell, A. (2001). *Sobre la gestión del riesgo: apuntes hacia una definición*. *Biblioteca Virtual En Salud de Desastres-OPS*, 4, 1–22.
- Lavenue, A., & Noblet, C. (1990). *Análisis sedimentológico y tectónico de la cuenca intramontañosa terciaria de Cuenca (sur del Ecuador)*. *Boletín Geológico Ecuatoriano*, 1(1), 11–26.
- Llano-Serna, Marcelo Alejandro; Muniz-de Farias, Márcio; Martínez-Carvajal, H., & Eduardo. (2015). *Numerical modelling of Alto Verde landslide using the material point method*. *Dyna*, 84(0012–7353), 1–11.
- López Castillo, E. L. A. (2015). *Monitoreo de deslizamientos utilizando el sistema de extensómetros artesanales*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- MAGAP. (2014). *Levantamiento De Cartografía Temática Escala 1:25.000, lote 1*.
- Maldonado, R. (2013). *Creación de resiliencia en las víctimas de la migración de la comunidad de Zumbahuayco de la parroquia Javier Loyola*. Universidad De Cuenca.
- Marín, R. J., Marín-Londoño, J., & Mattos, Á. J. (2020). *Análisis y evaluación del riesgo de deslizamientos superficiales en un terreno montañoso tropical: implementación de modelos*

- físicos simples*. Scientia et Technica, 25(1), 164–171.
- Molina, F. B. (2015). *Mejoramiento de la vía Zumbahuayco y diseño del pavimento desde la abcisa 3+ 000 hasta 6+ 000*.
- MTOP. (2022). *Obras emergentes de protección en el tramo comprendido entre las abscisas referenciales 14+050 y 0+000 del cauce del río Burgay en Azogues, del tramo: San José-Chiturco, provincia del Cañar*.
- Municipio de El Seibo - Municipio de Miches. (2020). *Guía para la operación del sistema de alerta temprana frente a inundaciones. Protocolo de actuación SAT*.
- Noblet, C., Lavenue, A., & Schneider, F. (1988). *Étude géodynamique d'un bassin intramontagneux tertiaire sur décrochements dans les Andes du Sud de l'Équateur: l'exemple du bassin de Cuenca*. Géodynamique, 3(1–2), 117–138.
- Nocquet, J.-M., Mothes, P., & Alvarado, A. (2009). *Geodesia, geodinámica y ciclo sísmico en Ecuador*. Geología y Geofísica Marina y Terrestre Del Ecuador, 83–95.
- ONU. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. In Naciones Unidas. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf
- Pilatasig Guamán, B. S. (2020). *Análisis de procedencia de las Formaciones de la cuenca de Cuenca al sur del Ecuador y sus implicaciones en el contexto geológico*. Quito, 2020.
- Reyes Rodas, D. K. (2022). *Transformaciones urbanas y sociales en la parroquia rural Javier Loyola a partir de la construcción del equipamiento UNAE (Universidad Nacional De La Educación)*.
- Romero, Z. (2015). *Atlas del Cantón Azogues*. Universidad del Azuay.
- Sacoto, M. (2022). *Implementación de los lineamientos para la Gestión del Riesgo de Desastres del Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE) en el Plan del Buen Vivir y Ordenamiento Territorial (PBVOT) del cantón Azogues - Ecuador*. (Vol. 9)

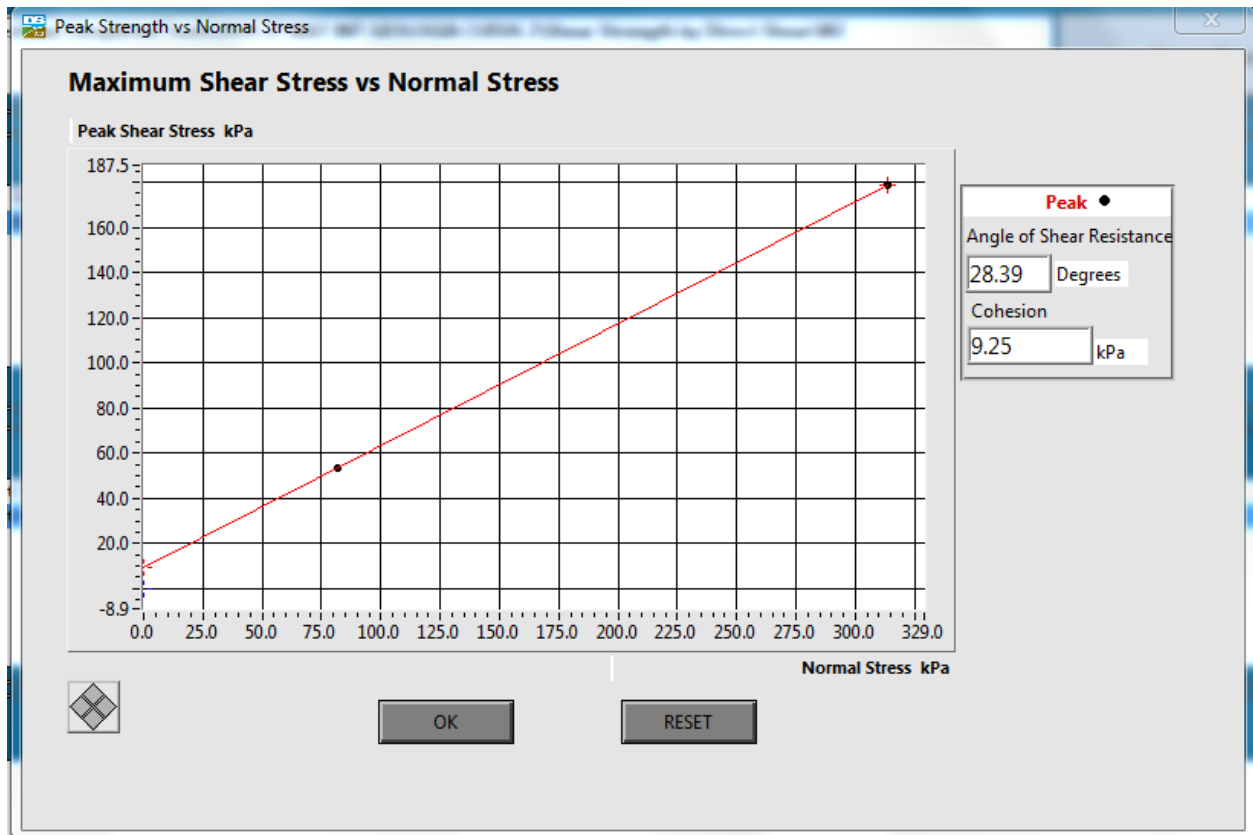
- [Universidad de Barcelona]. <http://hdl.handle.net/2445/185965>
- Sarmiento, F. O., Haller, A., Marchant, C., Yoshida, M., Leigh, D. S., Woosnam, K., Porinchu, D. F., Gandhi, K., King, E. G., Pistone, M., Kavoori, A., Calabria, J., Alcántara-Ayala, I., Chávez, R., Gunya, A., Yépez, A., Lee, S., & Reap, J. (2023). *La Montología Global 4D: Hacia las Ciencias Convergentes y Transdisciplinarias de Montaña a través del Tiempo y el Espacio*. Pirineos, 178, e075. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2023.178001>
- Sataer, G., Sultan, M., Emil, M. K., Yellich, J. A., Palaseanu-Lovejoy, M., Becker, R., Gebremichael, E., & Abdelmohsen, K. (2022). *Remote Sensing Application for Landslide Detection, Monitoring along Eastern Lake Michigan (Miami Park, MI)*. Remote Sensing, 14(14). <https://doi.org/10.3390/rs14143474>
- Scivetti, N., M. E. . B. J. O. S. (2021). *Manual de geofísica y métodos geofísicos*.
- Segovia, M., Alvarado, A., Collot, J. Y., Sallares, V., & Pazmiño, N. (2009). *Breve análisis de la sismicidad y del campo de esfuerzos en el Ecuador*. Geología y Geofísica Marina y Terrestre Del Ecuador: Desde La Costa Continental Hasta Las Islas Galápagos, 131–149.
- Selby, M. J. (1993). *Hillslope Materials and Processes* (Oxford (ed.); Segunda Ed). Oxford University Press.
- Solís Alulima, B., León, J., Tobar, J., & Coronel, O. (2022). *Léxico estratigráfico de las cuencas sedimentarias miocénicas del sur del Ecuador*.
- Steinmann, M. (1997). *The Cuenca basin of southern Ecuador: tectono-sedimentary history and the Tertiary Andean evolution*. ETH Zurich.
- Suarez, J. (2009). *Análisis de estabilidad*. Deslizamientos, Análisis Geotécnico, 130.
- Tamay Granda, J. V. (2018). *Estructura de cuencas intramontañosas del sur de Ecuador en relación con la tectónica de la Cordillera de los Andes a partir de datos geofísicos y geológicos* [Universidad de Granada]. <http://hdl.handle.net/10481/51634>
- Toral, R. A. R., Walden, C. A. S., Prado, D. F. P., Lopez, P. E. B., & Inga, V. O. D. (2022).

- Establecimiento de una red de monitoreo GPS diferencial para el monitoreo de movimiento de tierras. *Revista Geoespacial*, 19(1), 1–11.
- UNISDR. (2009). *Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres*. Estrategia Internacional Para La Reducción de Desastres de Las Naciones Unidas.
- Valarezo, R. (2011). *Plan de orientacion familiar para las familias de los migrantes del Sector La Unión de la comunidad de Zumbahuayco*. Universidad de Azuay.
- Varnes, D. J. (1978). *Slope movement types and processes*. Landslides: Analysis and Control.
- Verdezoto Villacis, P. A. (2006). *Levantamiento geológico del sector comprendido entre las latitudes 2° 37'S y 2° 50'S, provincias de Cañar y Azuay, con especial enfoque sobre las secuencias miocénicas*. EPN.
- Vijayakumar, S., Morais, Y., & Bowstead, S. (2021). *Kit de herramientas: Design Thinking (pensamiento de diseño)*. YouthLead. <https://youthleadawsuat.assyst-uc.com/es/resources/kit-de-herramientas-design-thinking-pensamiento-de-diseno>
- Westen, C. J., Asch, T. W. J., & Soeters, R. (2006). *Landslide hazard and risk zonation-why is it so difficult?* *Bull Eng Geol Environ*. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 65, 167–184. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>

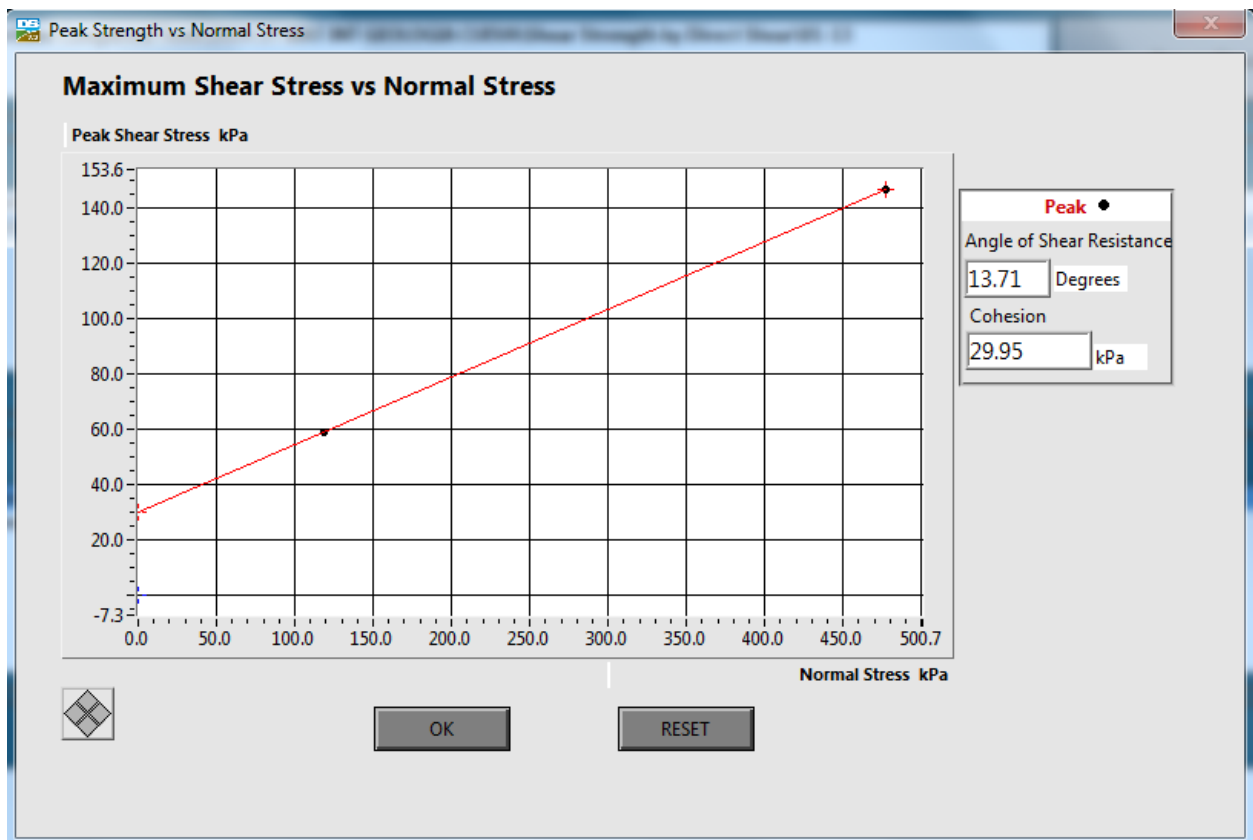
Apéndice A
Corte directo
Muestra Z-01-13



Muestra Z-08-13

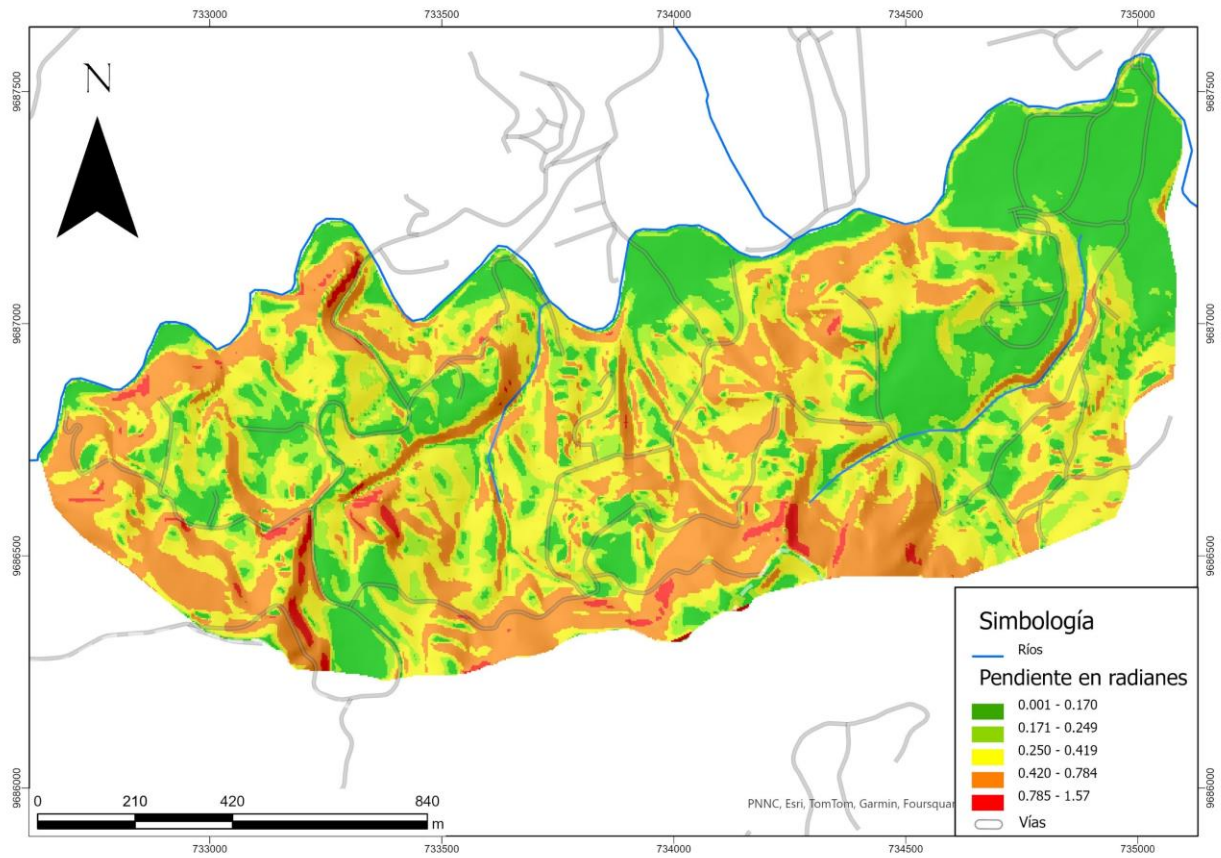


Muestra Z-11-14



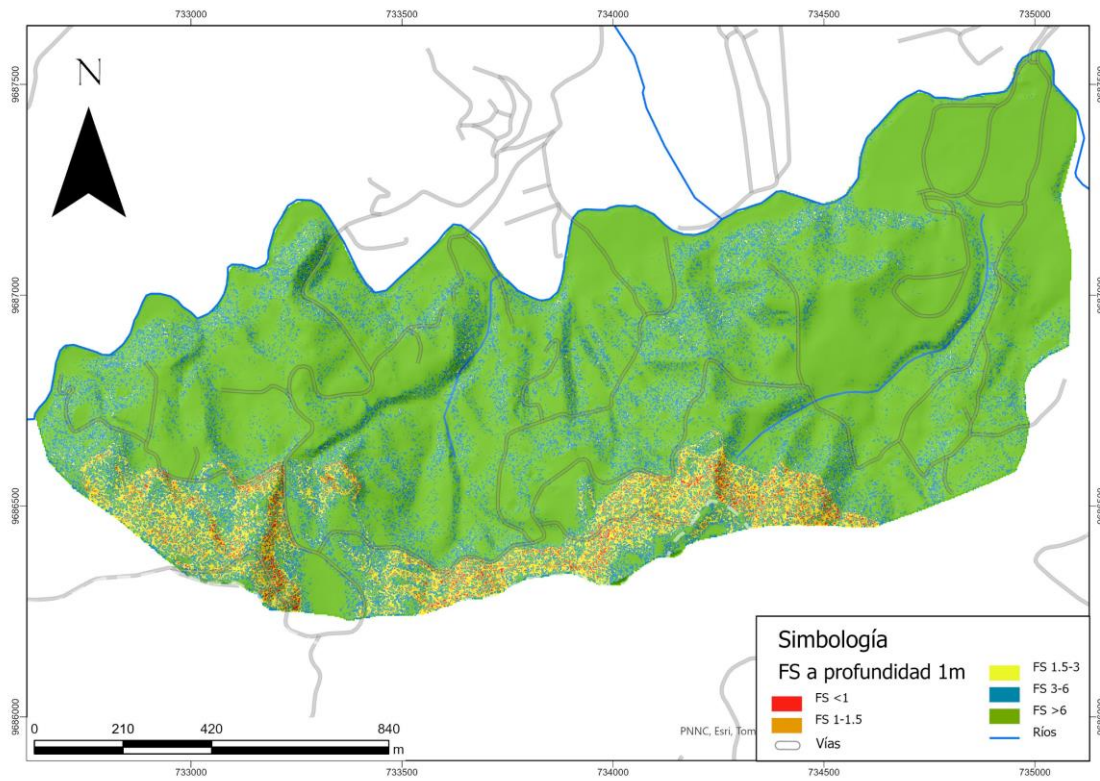
Apéndice B

Mapa de pendientes en radianes

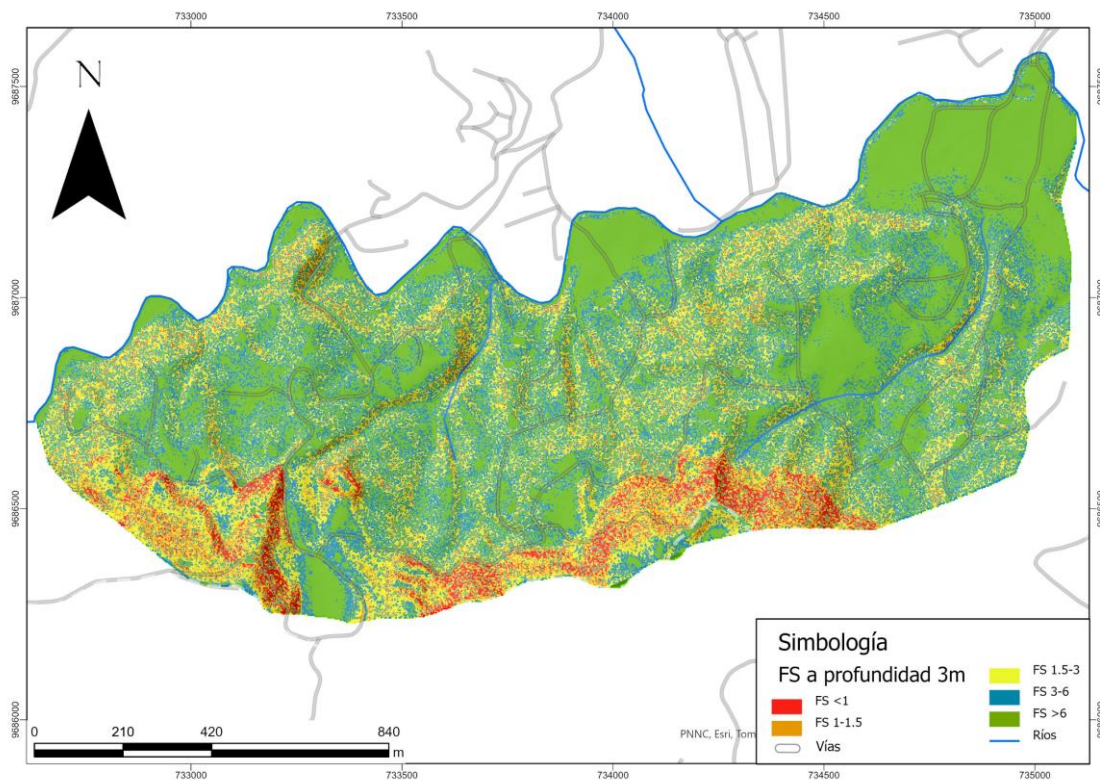


Mapas de Amenaza

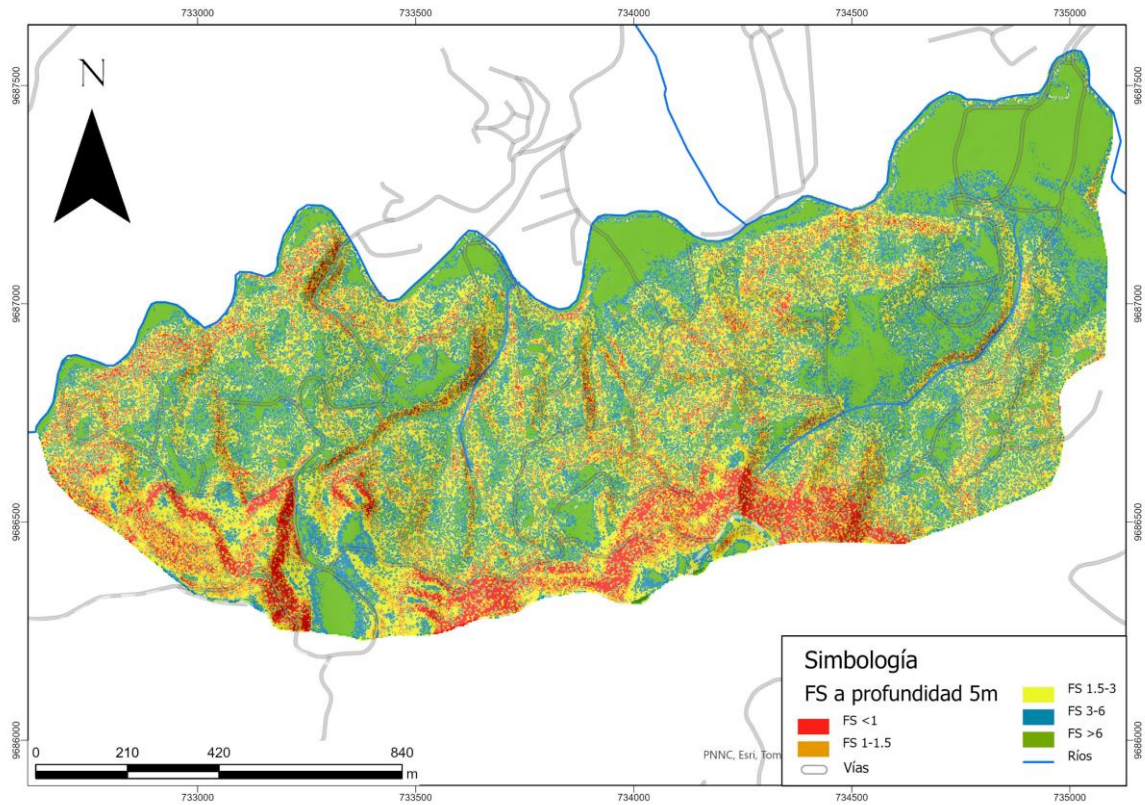
Mapa de Fs a profundidad de 1 m



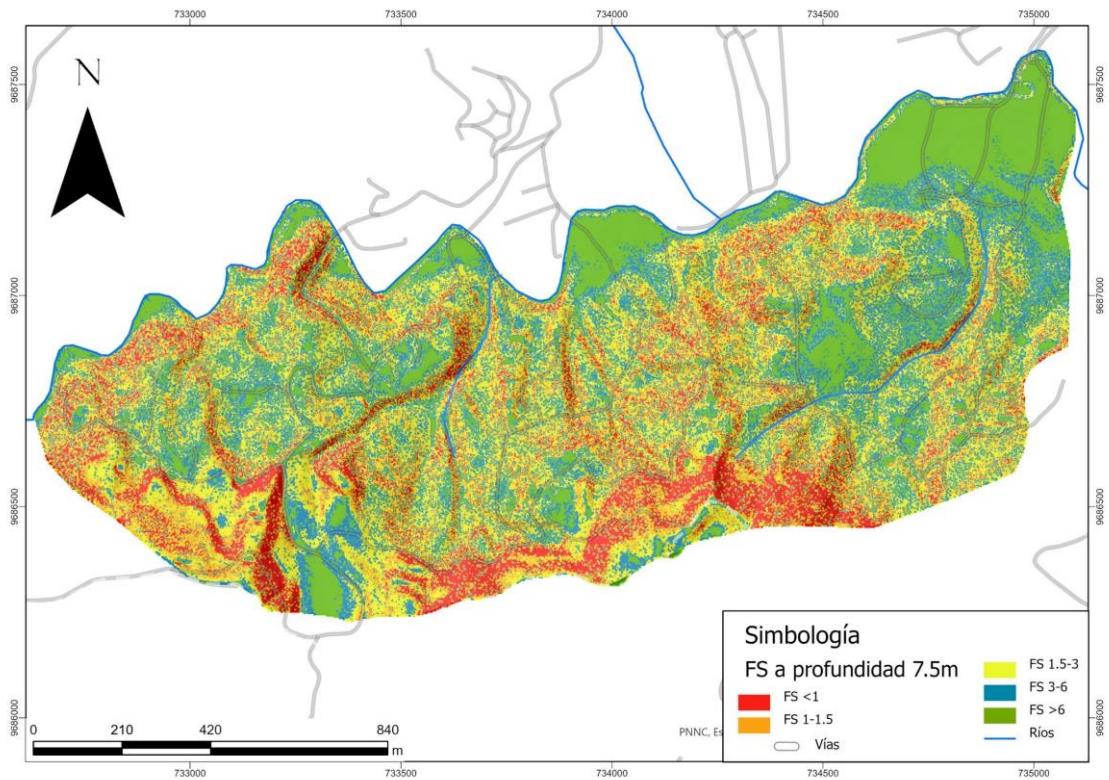
Mapa de Fs a profundidad de 3 m



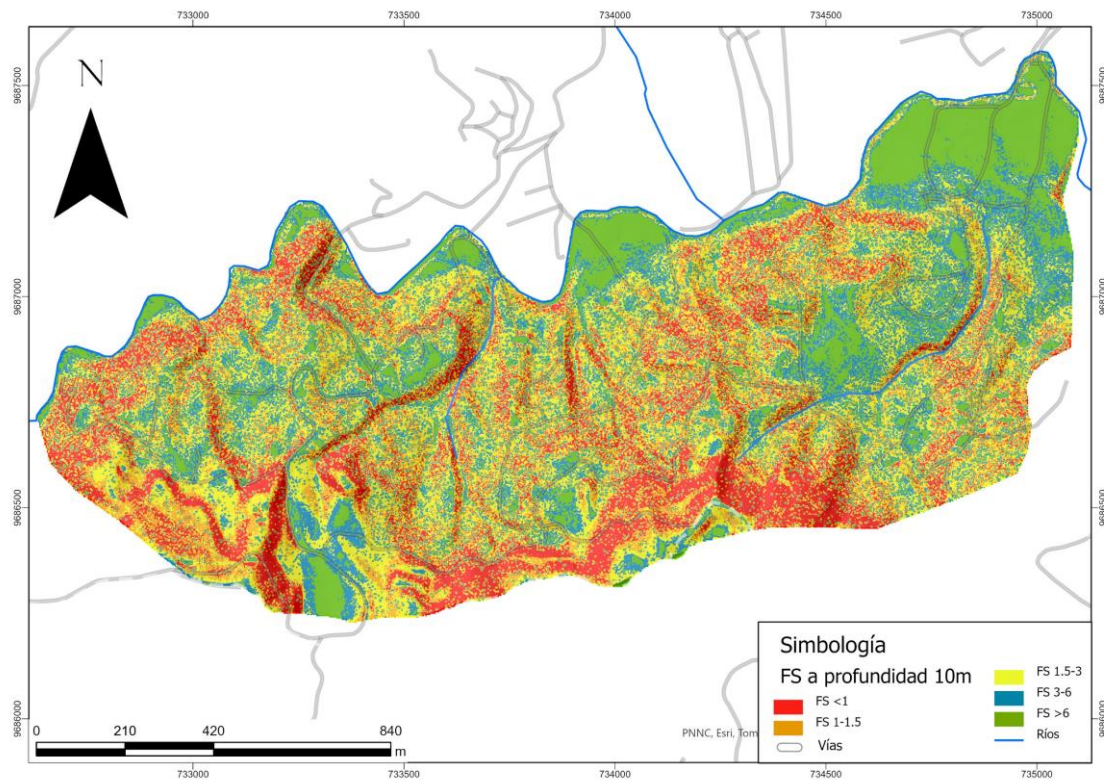
Mapa de Fs a profundidad de 5 m



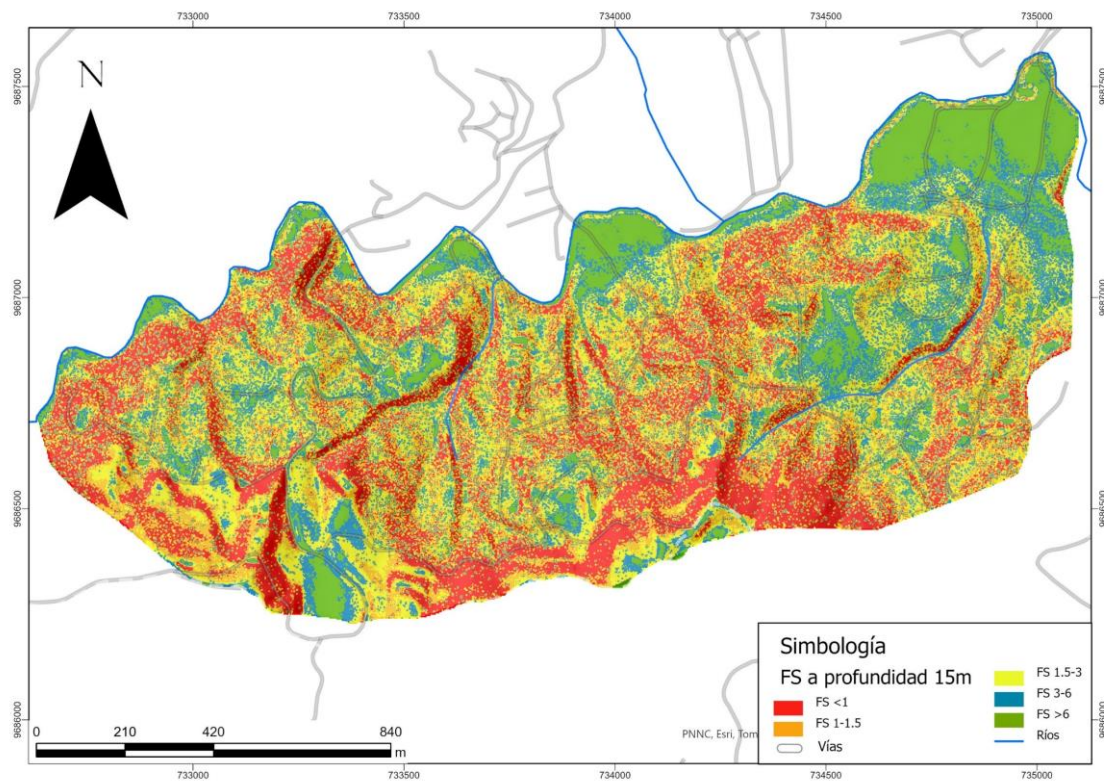
Mapa de Fs a profundidad de 7.5 m



Mapa de Fs a profundidad de 10 m

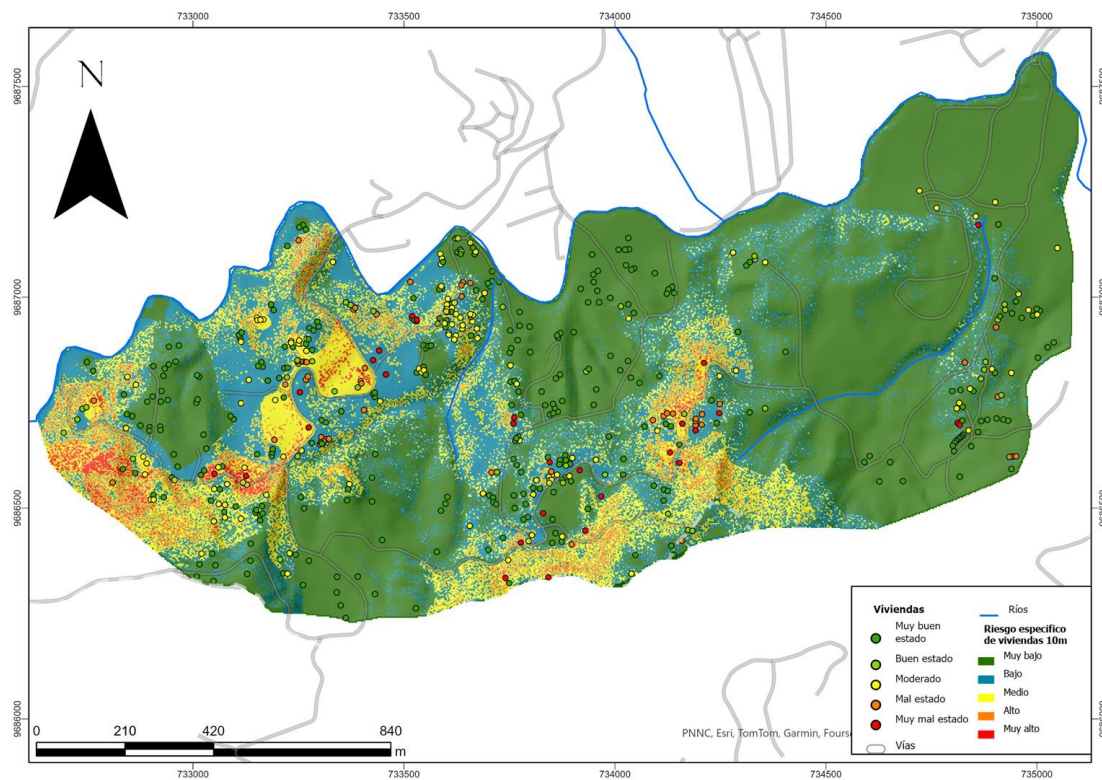


Mapa de Fs a profundidad de 15 m

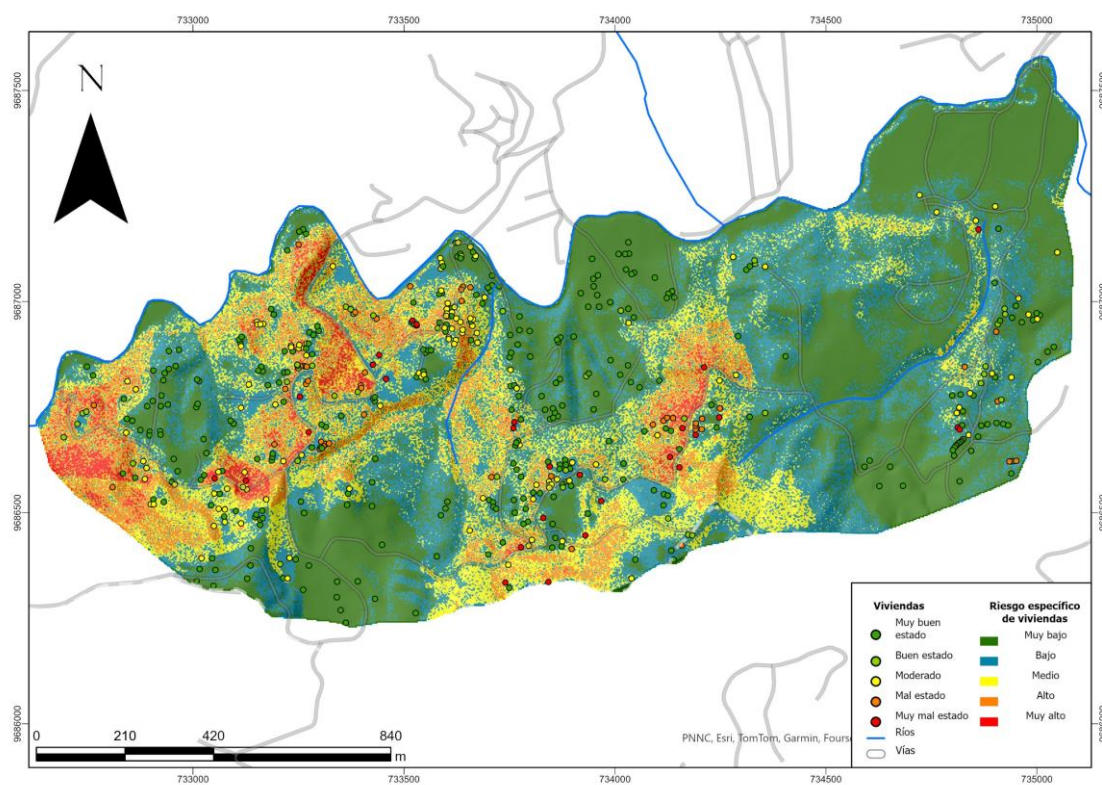


Mapa de riesgo específico de las viviendas

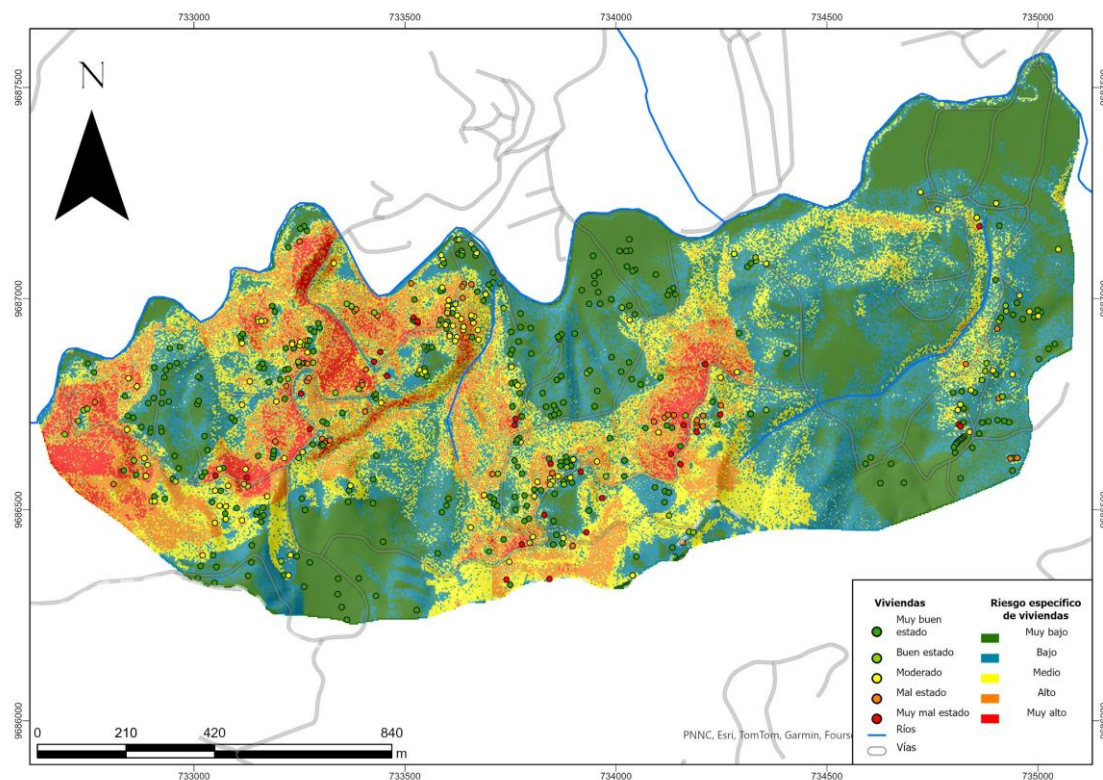
Mapa de riesgo específico de las viviendas en base al mapa de FS a profundidad de 1 m



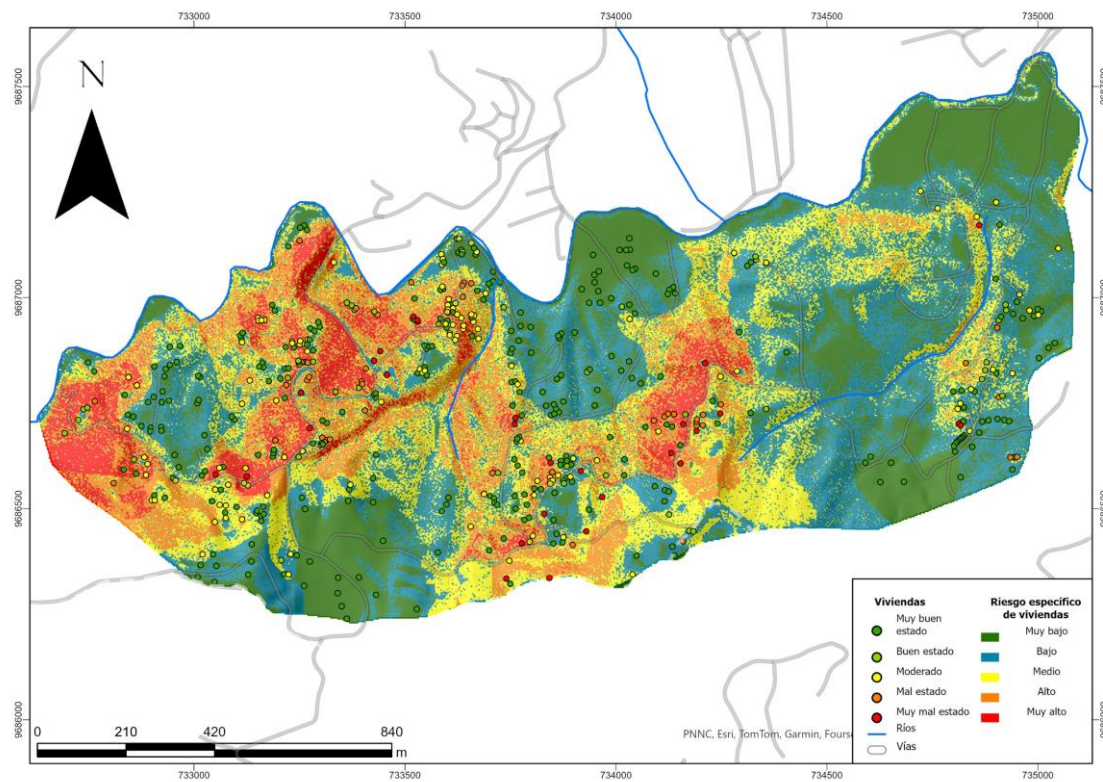
Mapa de riesgo específico de las viviendas en base al mapa de FS a profundidad de 3 m



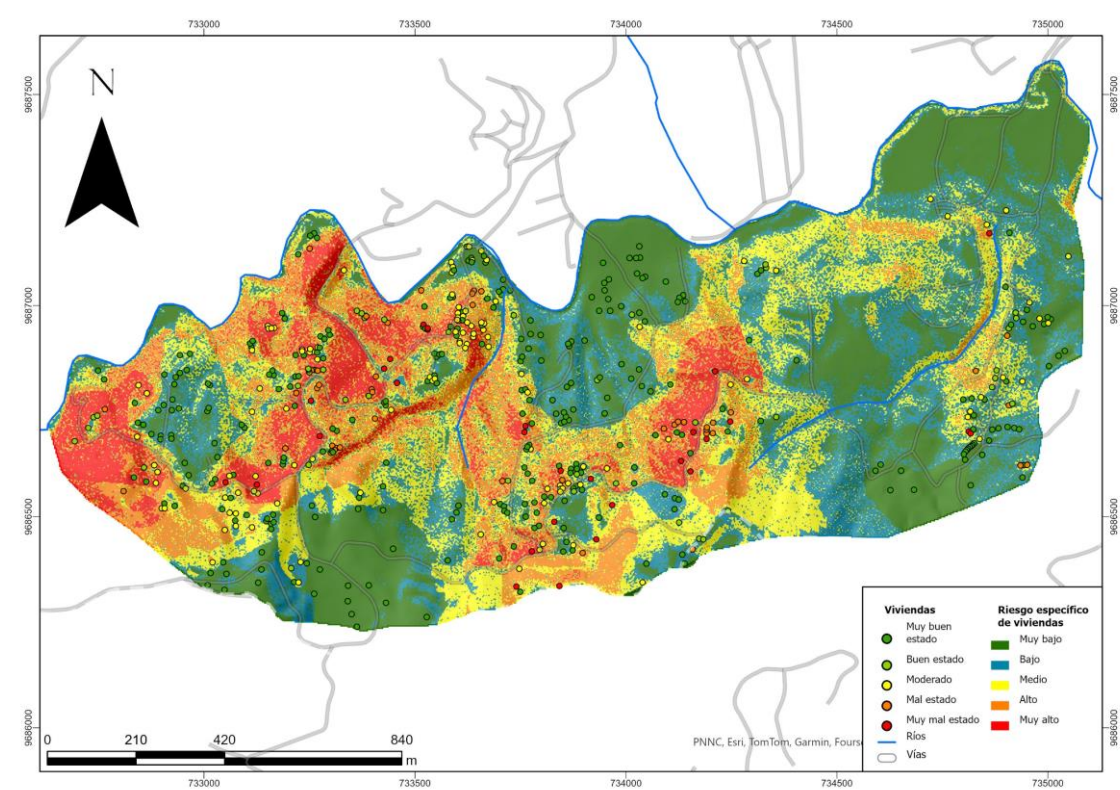
Mapa de riesgo especifico de las viviendas en base al mapa de FS a profundidad de 5 m



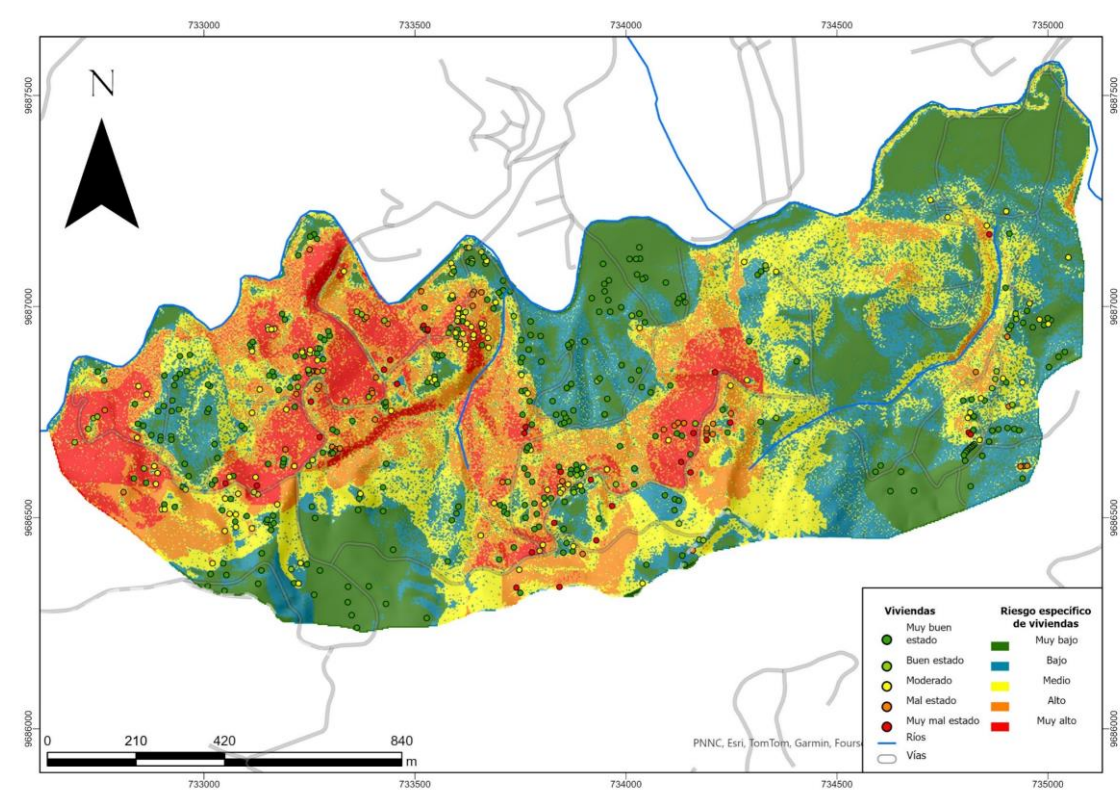
Mapa de riesgo especifico de las viviendas en base al mapa de FS a profundidad de 7.5 m



Mapa de riesgo especifico de las viviendas en base al mapa de FS a profundidad de 10 m

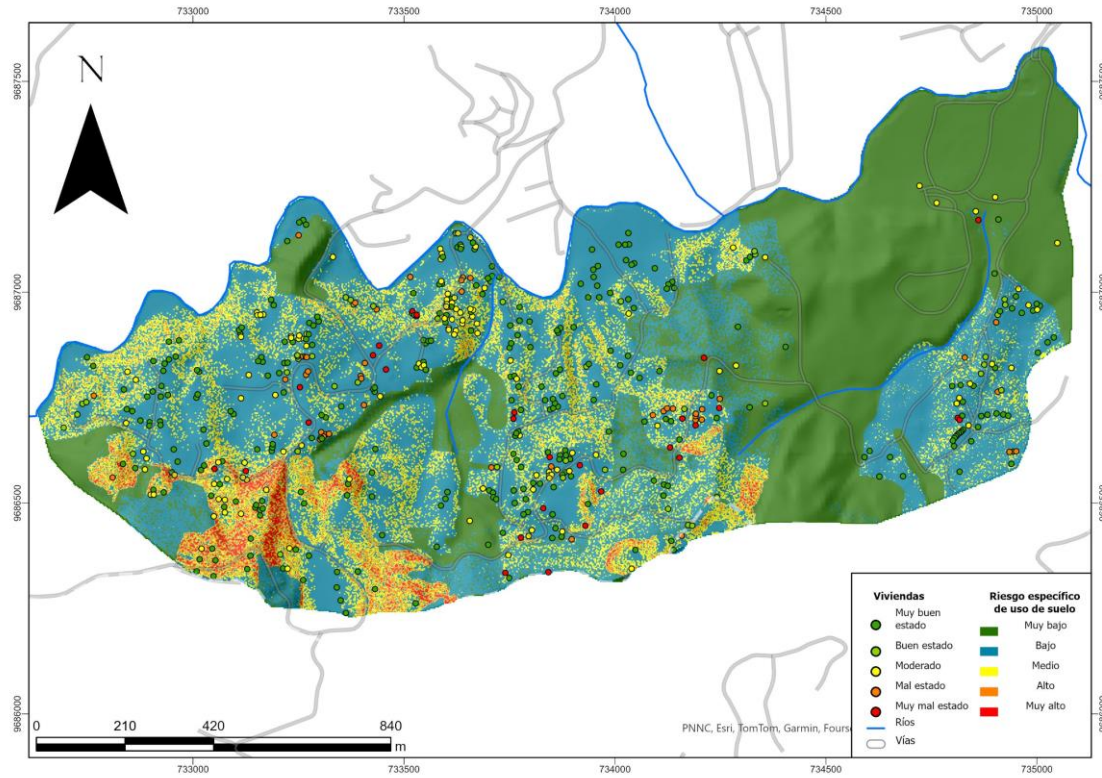


Mapa de riesgo especifico de las viviendas en base al mapa de FS a profundidad de 15 m

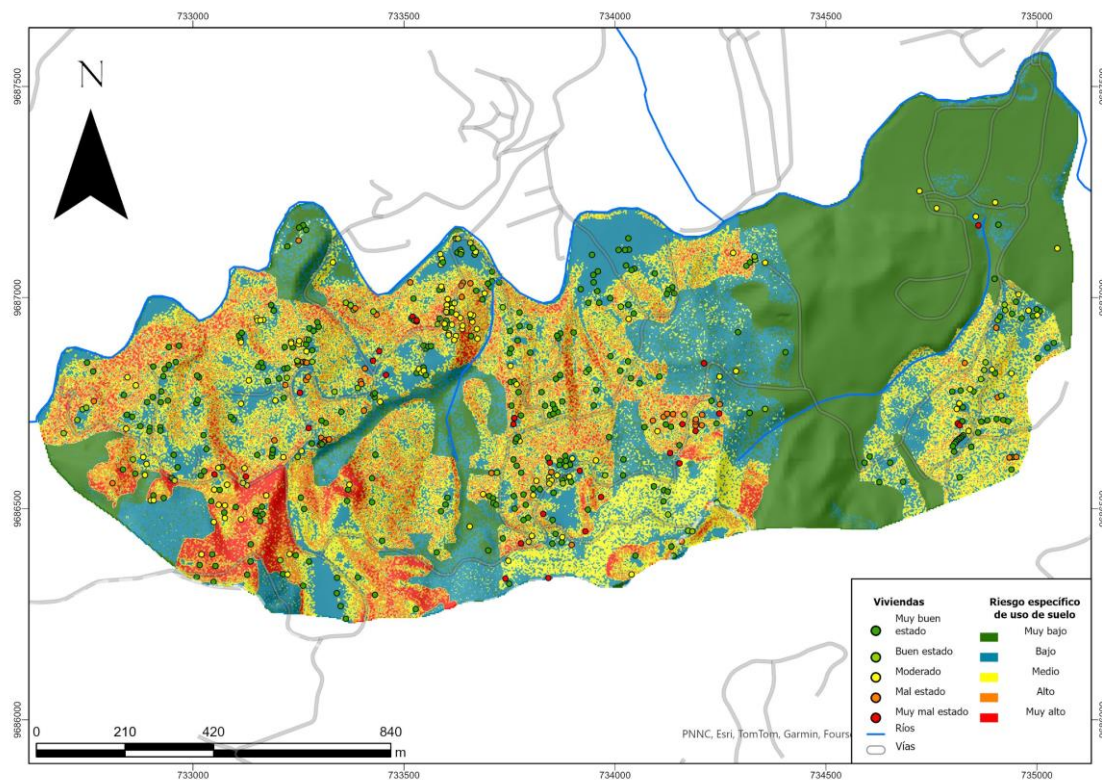


Mapa de riesgo específico del uso de suelo

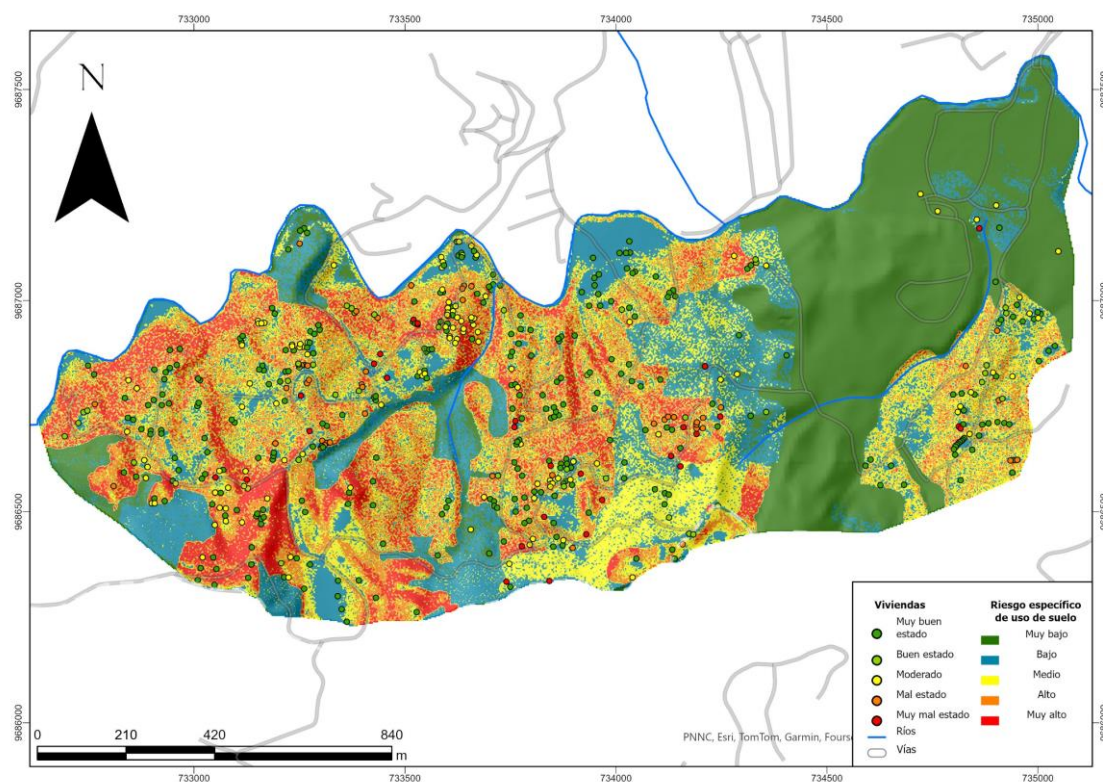
Mapa de riesgo específico del uso de suelo en base al mapa de FS a profundidad de 1 m



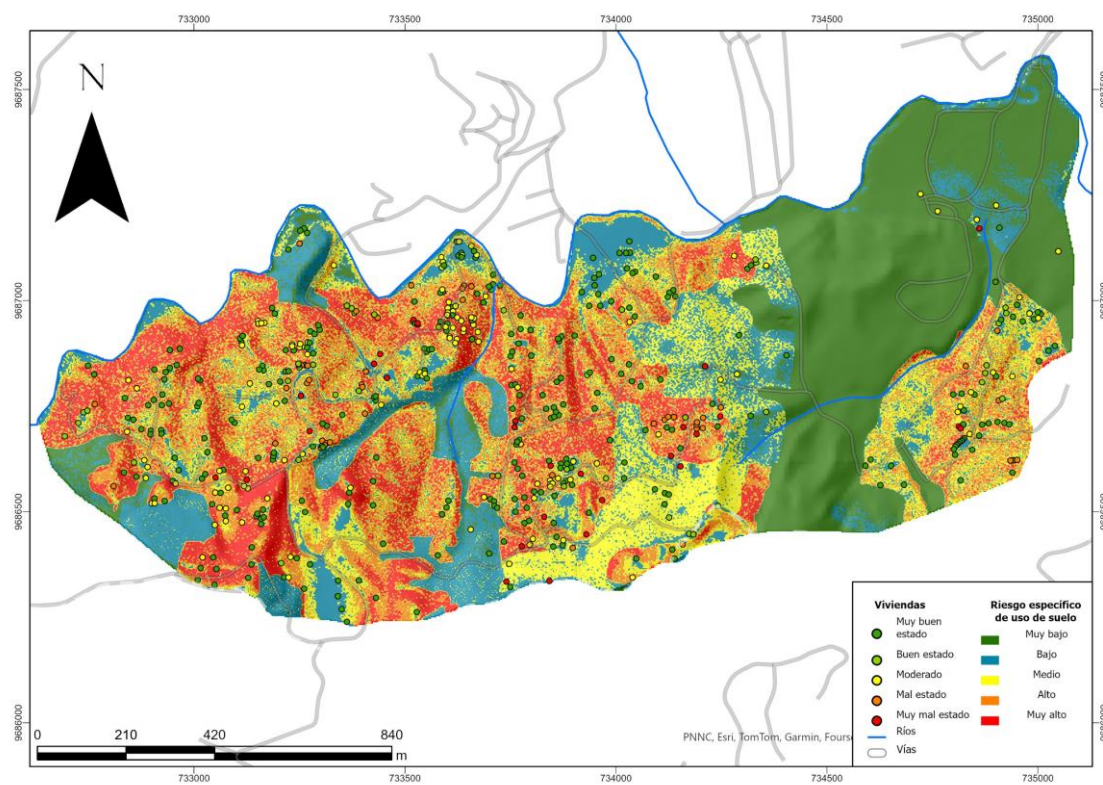
Mapa de riesgo específico del uso de suelo en base al mapa de FS a profundidad de 3 m



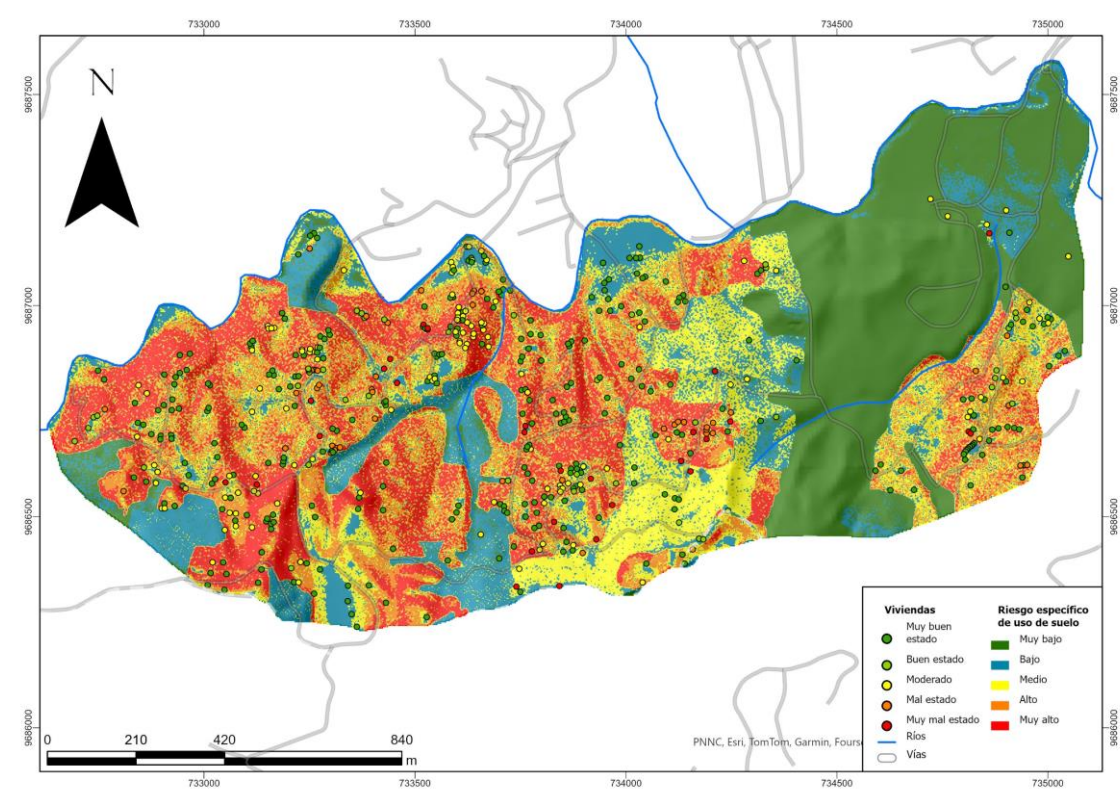
Mapa de riesgo específico del uso de suelo en base al mapa de FS a profundidad de 5 m



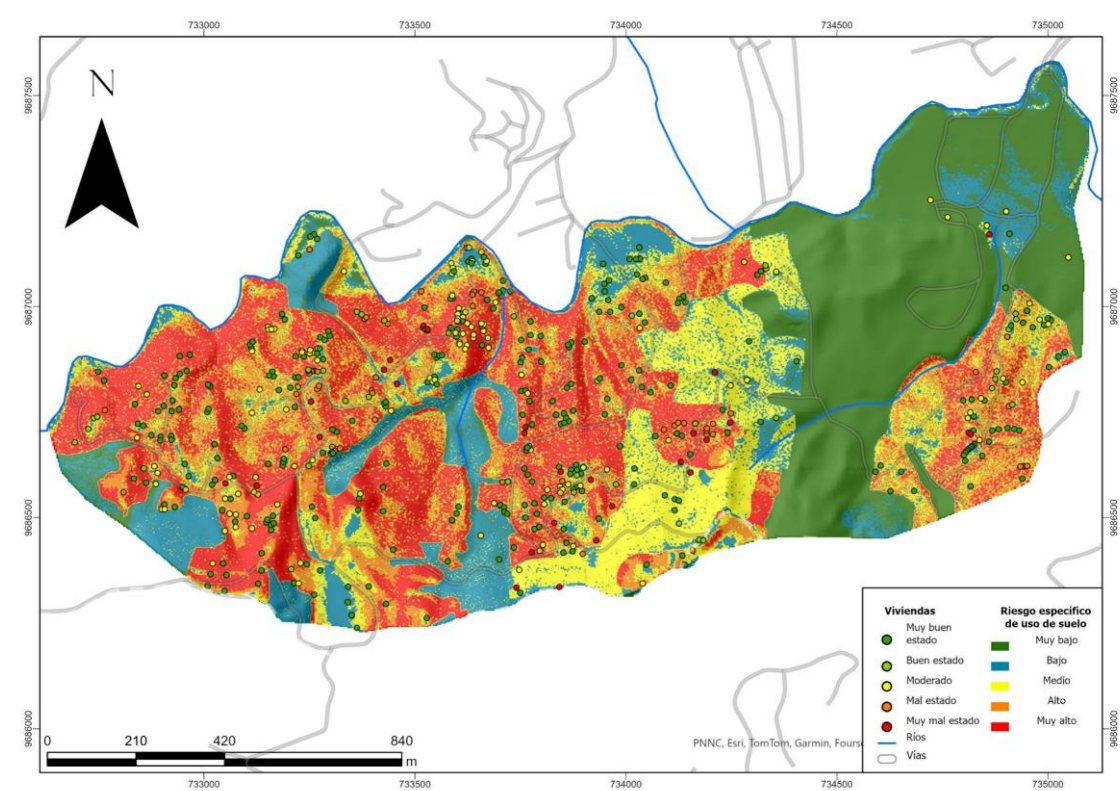
Mapa de riesgo específico del uso de suelo en base al mapa de FS a profundidad de 7.5 m



Mapa de riesgo específico del uso de suelo en base al mapa de FS a profundidad de 10 m

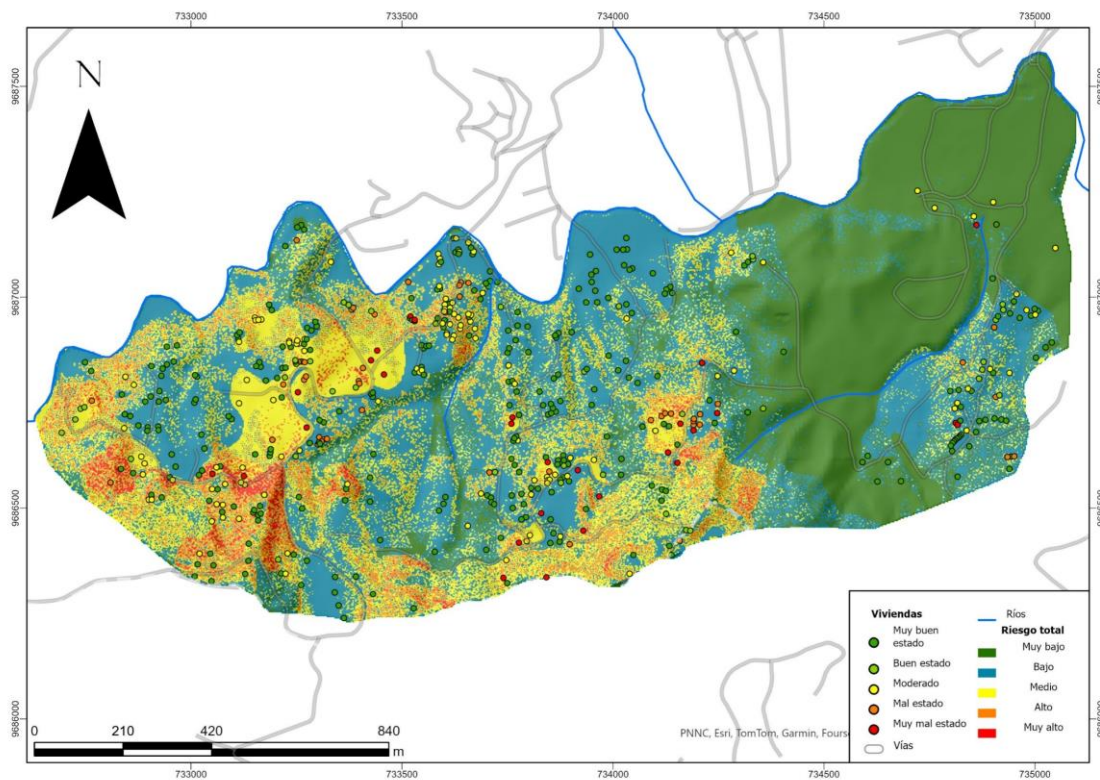


Mapa de riesgo específico del uso de suelo en base al mapa de FS a profundidad de 15 m

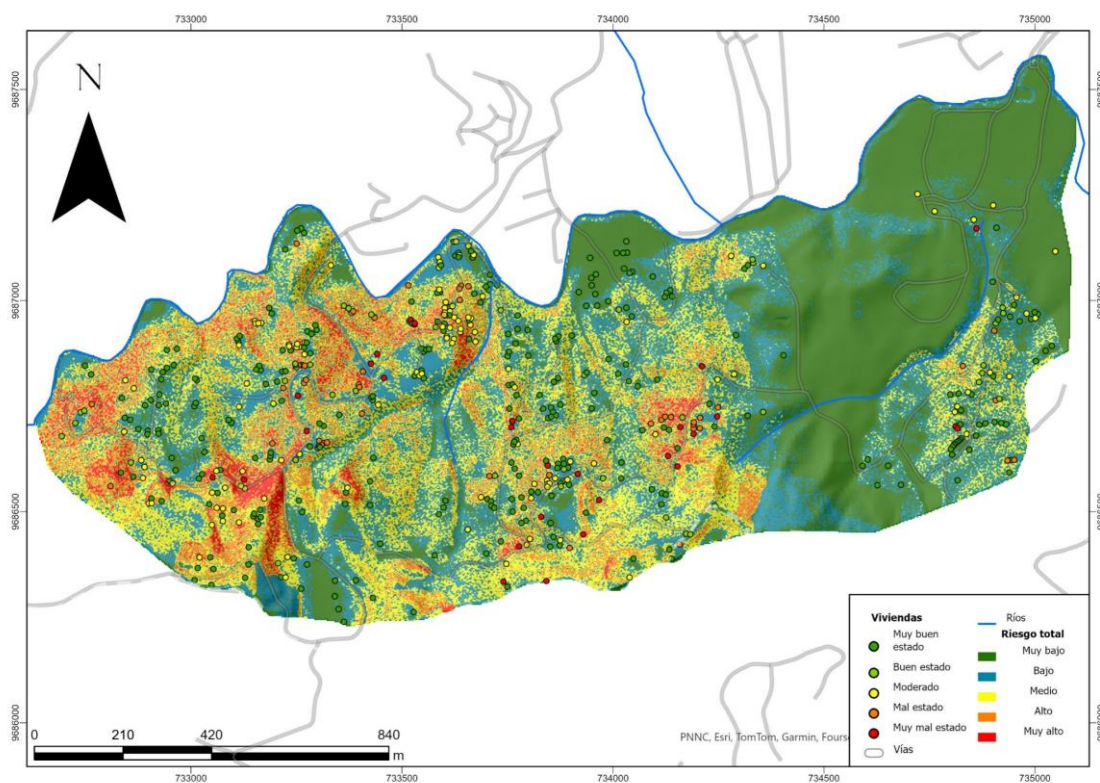


Mapas de riesgo total

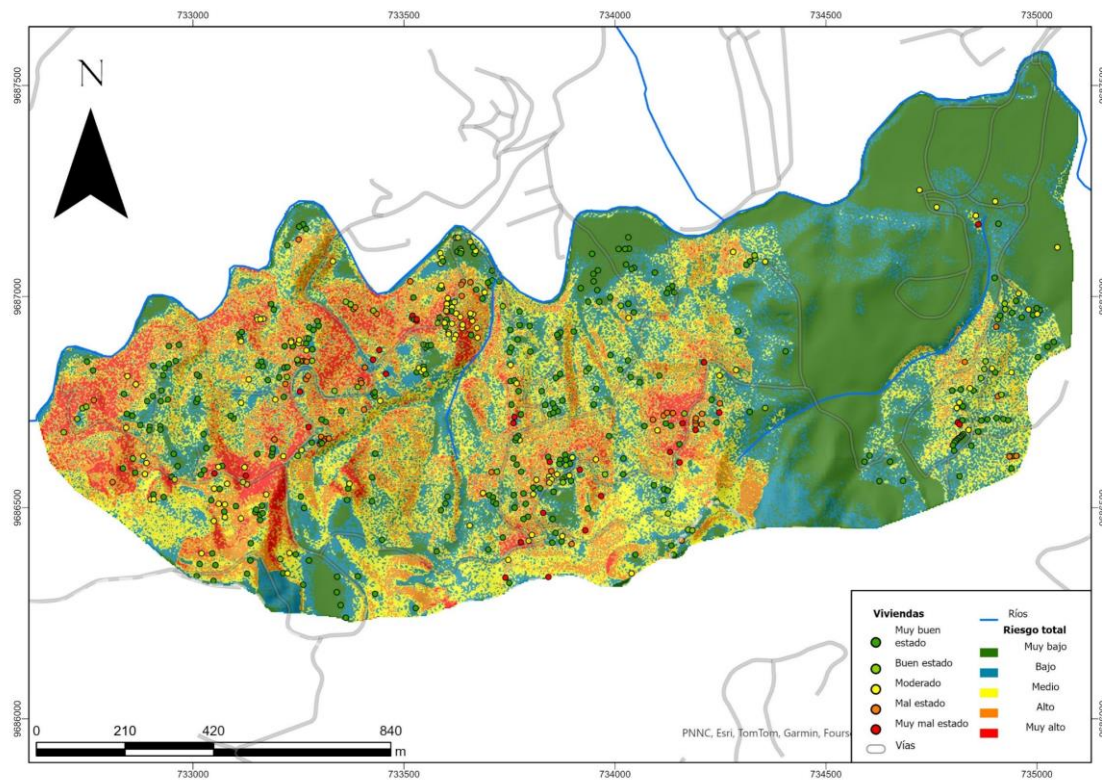
Mapa de riesgo total en base al mapa de FS a profundidad de 1 m



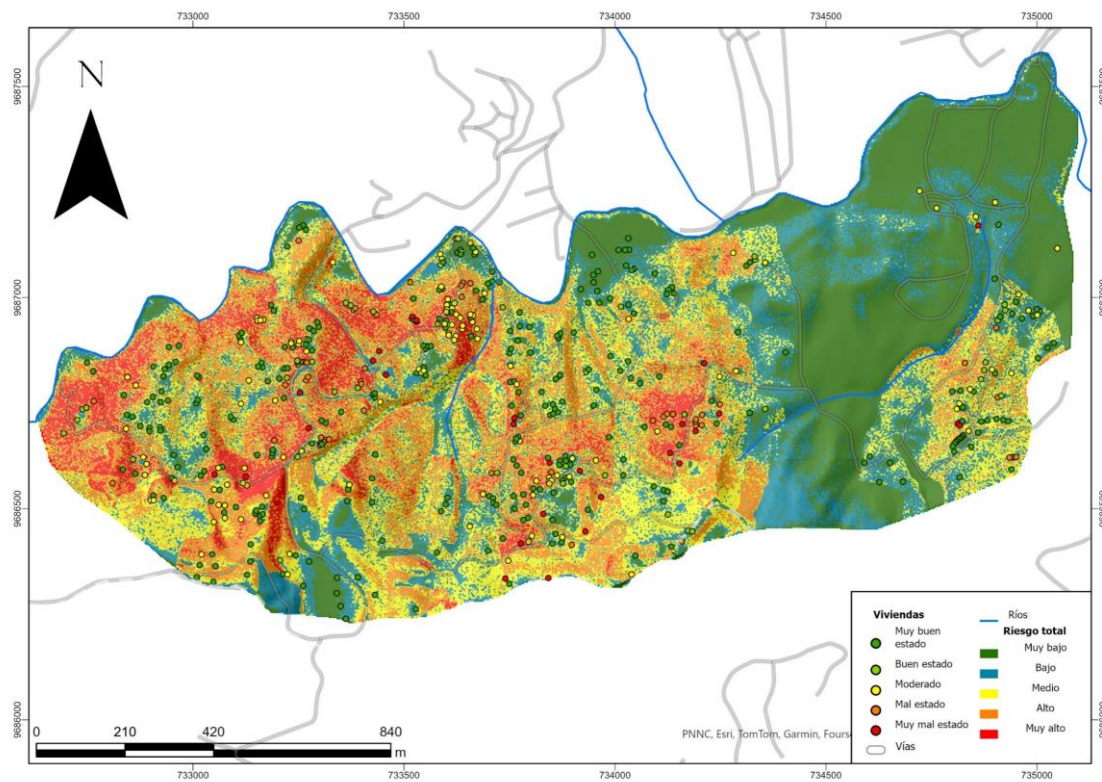
Mapa de riesgo total en base al mapa de FS a profundidad de 3 m



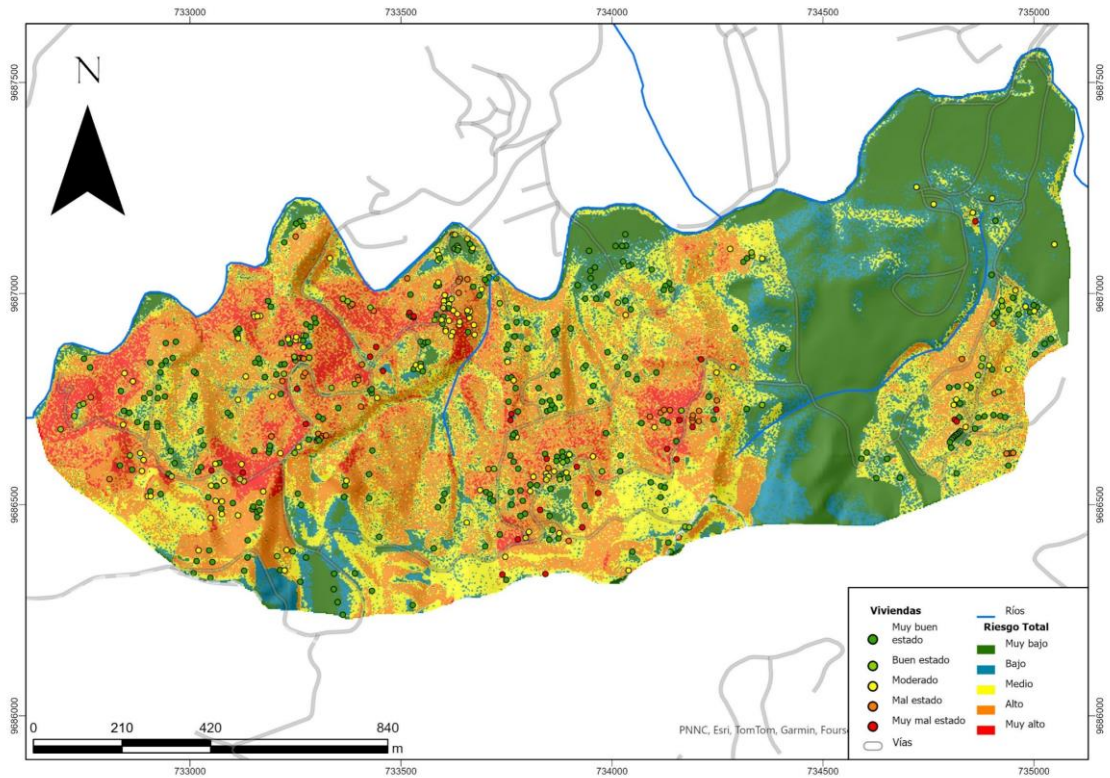
Mapa de riesgo total en base al mapa de FS a profundidad de 5 m



Mapa de riesgo total en base al mapa de FS a profundidad de 7.5 m



Mapa de riesgo total en base al mapa de FS a profundidad de 10 m



Mapa de riesgo total en base al mapa de FS a profundidad de 15 m

