



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Escuela de Ingeniería Ambiental

TÍTULO

Análisis de riesgos en una relavera minera abandonada mediante fotogrametría aérea
con dron en el sector de Tunzhun de San Bartolomé.

Trabajo previo a la obtención del grado académico de:

INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR

CHIMBO SANCHO FERNANDO JOSÉ

DIRECTOR

ING. DIANA VANESSA VANEGAS DELGADO

Cuenca - Ecuador

2025

Dedicatoria

*A **Dios**, por ser el dador de vida, por darme fortaleza en los momentos más difíciles y por permitirme avanzar con firmeza a lo largo de este proceso académico.*

*A mis padres, **Manuel** y **María**, quienes han sido mi inspiración y motivo; gracias por su apoyo desinteresado, por creer en mis capacidades y por acompañarme en cada etapa de este proceso con palabras de aliento y amor incondicional.*

*A mis **hermanxs**, por el respaldo brindado durante este recorrido, por su comprensión en los momentos de sacrificio y por convertirse en un pilar fundamental para mi formación personal y académica.*

Con profundo agradecimiento y cariño, dedico este logro a ustedes, quienes han sido la base que me ha sostenido y la fuerza que me ha impulsado a seguir adelante.

Agradecimiento

*Agradezco a **Dios** y a mis padres por acompañarme y brindarme el impulso necesario para culminar esta etapa.*

*A la **Universidad del Azuay**, por ofrecerme la formación académica fundamental para el desarrollo de este proyecto.*

*A mi directora, **Ing. Diana Vanessa Vanegas**, por su orientación, apoyo y compromiso durante la ejecución de este trabajo de titulación.*

A quienes hicieron posible este proceso con su apoyo y disposición, les expreso mi más profunda gratitud.

Resumen

Este estudio analiza los riesgos presentes en una relavera que se encuentra abandonada en el sector Tunzhun, parroquia San Bartolomé, cantón Sígfig, en la provincia del Azuay. Para ello, se utilizó tecnología de fotogrametría aérea con drones y herramientas de análisis geoespacial, lo que permitió obtener información sobre el terreno.

Se realizó un levantamiento digital de alta resolución, del cual se generaron ortomosaicos georreferenciados, nubes de puntos densas y un Modelo Digital del Terreno (MDT). Estos productos facilitaron una descripción detallada de la superficie, de las pendientes y de la forma del terreno en el área estudiada.

A partir del MDT y sus derivados, fue posible representar la relavera y su entorno inmediato. Se identificaron zonas donde hay erosión activa, deformaciones superficiales y patrones de escurrimiento del agua que afectan la estabilidad de las laderas. Con esta información se elaboró un mapa que combina los niveles de susceptibilidad, amenaza y vulnerabilidad, y se aplicó la matriz SIGR-E para estimar el nivel de riesgo que enfrentan distintos elementos expuestos en el área.

Los resultados muestran que gran parte del sector analizado presenta un riesgo alto o muy alto, sobre todo la propia relavera, algunos tramos de la vía principal, y viviendas ubicadas en laderas con fuertes pendientes.

En conclusión, el uso combinado de drones y sistemas de información geográfica demostró ser una herramienta eficiente para estudiar pasivos mineros en zonas de montaña. La metodología permitió obtener datos actualizados y detallados que sirven como base técnica para tomar decisiones sobre la gestión del riesgo, el ordenamiento territorial, y el diseño de medidas para estabilizar y recuperar ambientalmente estas áreas.

Palabras clave: Relavera, riesgos, fotogrametría, dron, SIG.

Abstract:

This study looks at the risks in an abandoned mining tailings dam located in the Tunzhun sector, San Bartolomé parish, Sígüsig canton, Azuay province. To do this, aerial photogrammetry with drones and basic geospatial analysis tools were used, which made it possible to get precise information about the ground and its surroundings.

A high-resolution digital survey was carried out. From this survey, georeferenced orthomosaics, dense point clouds and a Digital Terrain Model (DTM) were created. These products helped to describe in detail the surface, the slope of the land and the shape of the terrain in the study area.

Using the DTM and its derived products, the tailings dam and its immediate surroundings were represented more clearly. Areas with active erosion, water accumulation, shallow surface deformations, and water flow paths that affect slope stability were identified. With this information, a map was prepared that combines levels of susceptibility, hazard and vulnerability, and the SIGR-E matrix was applied to estimate the level of risk for different exposed elements in the area.

The results show that a large part of the sector has high or extremely high risk, especially the tailings dam itself, some sections of the main road and houses located on steep slopes. In these places, geological and geomorphological hazards coincide with human factors related to land use and the abandonment of the mining infrastructure.

In conclusion, the combined use of drones and geographic information systems proved to be an efficient tool to study mining liabilities in mountain areas. The applied method allowed the collection of updated and detailed data that can be used as a technical basis for decisions on risk management, land-use planning, and the design of measures to stabilize and restore these areas in environmental terms.

Keywords: Tailings, dam, risks, photogrammetry, drone, SIG.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
CAPITULO I.....	- 9 -
1. Introducción.....	- 9 -
1.1. Contexto y Antecedentes Generales.	- 9 -
1.2. Antecedentes.....	- 12 -
1.3. Planteamiento del problema.	- 16 -
1.4. Justificación de la investigación	- 18 -
1.5. Objetivos.....	- 20 -
1.5.1. <i>Objetivo general</i>	- 20 -
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i>	- 20 -
1.6. Alcance y delimitación del estudio.....	- 21 -
CAPITULO II.....	- 22 -
2. Marco Teórico.....	- 22 -
2.1. Pasivos ambientales.....	- 22 -
2.2. Gestión y análisis de Riesgos	- 22 -
2.3. Experiencias previas y/o similares	- 24 -
2.3.1. <i>Los Drones</i>	- 25 -
2.3.2. <i>Velocidad y Tiempo de Vuelo</i>	- 25 -
2.3.3. <i>Carga Útil</i>	- 26 -
2.3.4. <i>Alcance y Altitud</i>	- 26 -
2.3.5. <i>Fotogrametría Aérea con Drones</i>	- 26 -
2.4. Zona de estudio.....	- 32 -
2.4.1. <i>Localización.</i>	- 33 -
2.4.2. <i>Geología.</i>	- 37 -
2.4.3. <i>Geología Local</i>	- 38 -
2.4.4. <i>Geodinámica Externa</i>	- 43 -
2.4.5. <i>Estudio de los suelos</i>	- 44 -
2.4.6. <i>Hidrología.</i>	- 46 -
2.4.7. <i>Amenazas.</i>	- 52 -
2.5. Ocupación Territorial.....	- 54 -
2.5.1. <i>Actividad minera en San Bartolomé.</i>	- 55 -
2.5.2. <i>Fundamentos del sensoramiento remoto</i>	- 59 -
CAPITULO III	- 62 -
3. Metodología.....	- 62 -
3.1. Materiales	- 63 -
3.1.1. <i>Equipos y software utilizados</i>	- 63 -

3.1.2.	<i>Parámetros técnicos del levantamiento</i>	- 63 -
3.1.3.	<i>Sistema de coordenadas y referencia</i>	- 64 -
3.1.4.	<i>Precisión fotogramétrica y validación del MDT</i>	- 64 -
3.2.	Métodos	- 66 -
3.2.1.	<i>Enfoque y diseño metodológico</i>	- 66 -
3.2.2.	<i>Fases de la investigación</i>	- 66 -
3.3.	Síntesis metodológica	- 72 -
CAPITULO IV		- 73 -
4.	Resultados	- 73 -
4.1.	Modelo Digital del Terreno (MDT)	- 74 -
4.2.	Mapa integrado de susceptibilidad, amenaza y vulnerabilidad	- 77 -
4.3.	Cuantificación del riesgo mediante la matriz (Amenaza × Vulnerabilidad) ...	- 79 -
4.4.1	<i>Matriz base de riesgo (SIGR-E)</i>	- 81 -
4.4.2.	<i>Matriz aplicada al área de estudio</i>	- 81 -
4.4.3.	<i>Matriz sectorial del polígono.</i>	- 82 -
4.5.	Diagnóstico técnico de riesgos	- 85 -
4.6.	Recomendaciones para el aprovechamiento y gestión del espacio	- 88 -
CAPITULO V		- 94 -
4.	Conclusiones	- 94 -
Referencias Bibliográficas		- 98 -

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Relavera abandonada en San Bartolomé.....</i>	<i>- 10 -</i>
<i>Figura 2. Características irregulares del terreno en la mina San Bartolomé</i>	<i>- 17 -</i>
<i>Figura 3. Fotogrametría a diferentes escalas en correspondencia del mismo punto</i>	<i>- 28 -</i>
<i>Figura 4. Muestra de una Ortoimagen debidamente georreferenciada.....</i>	<i>- 29 -</i>
<i>Figura 5. Imagen satelital de puntos de observación de estaciones de un área de estudio.....</i>	<i>- 30 -</i>
<i>Figura 6. Imagen de fotogrametría evidencia el deterioro de pavimentos aeroportuarios</i>	<i>- 31 -</i>
<i>Figura 7. Imagen satelital de una zona minera</i>	<i>- 32 -</i>
<i>Figura 8. Mapa de ubicación de la zona de estudio.</i>	<i>- 34 -</i>
<i>Figura 9. Mapa Parroquial San Bartolomé.....</i>	<i>- 36 -</i>
<i>Figura 10. Área de estudio Sector Tunzhun de San Bartolomé.....</i>	<i>- 37 -</i>
<i>Figura 11. Georreferenciación - Geología base del área de estudio</i>	<i>- 39 -</i>
<i>Figura 12. Georreferenciación - Taxonomía de suelos del área de estudio.....</i>	<i>- 44 -</i>
<i>Figura 13. Georreferenciación - Mapa de Patrimonio hídrico del área de estudio</i>	<i>- 49 -</i>
<i>Figura 14. Georreferenciación - Regímenes de temperatura del área de estudio</i>	<i>- 50 -</i>
<i>Figura 15. Georreferenciación - Temperatura del área de estudio</i>	<i>- 52 -</i>
<i>Figura 16. Georreferenciación - Amenaza por movimiento de masa del área de estudio.....</i>	<i>- 53 -</i>
<i>Figura 17. Georreferenciación - Ocupación territorial del área de estudio</i>	<i>- 54 -</i>
<i>Figura 18. Instalaciones abandonadas de la mina San Bartolomé</i>	<i>- 56 -</i>
<i>Figura 19. Instalaciones de la mina San Bartolomé.....</i>	<i>- 58 -</i>
<i>Figura 20. Productos de radar, campos de viento y series de precipitación</i>	<i>- 60 -</i>
<i>Figura 21. Sensor pasivo ETM+ Satélite LandSat</i>	<i>- 61 -</i>
<i>Figura 22. Nube de puntos dispersa (Sparse Point Cloud)</i>	<i>- 68 -</i>
<i>Figura 23. Ortomosaico y Modelo digital de superficie MDS.....</i>	<i>- 73 -</i>
<i>Figura 24. Modelo digital de terreno (MDT).....</i>	<i>- 76 -</i>
<i>Figura 25. Mapa de amenaza y vulnerabilidad</i>	<i>- 78 -</i>
<i>Figura 26. Mapa sectorial del polígono.</i>	<i>- 83 -</i>
<i>Figura 27. Taxonomía del suelo en el área de estudio.....</i>	<i>- 87 -</i>
<i>Figura 28. Ocupación territorial del área de estudio.....</i>	<i>- 89 -</i>
<i>Figura 29. Suelo Rural de Producción Agropecuaria con Pastos Asociados.....</i>	<i>- 91 -</i>
<i>Figura 30. Vía principal Cuenca – San Bartolomé.....</i>	<i>- 92 -</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Coordenadas.</i>	<i>- 37 -</i>
<i>Tabla 2. Equipos y software empleados durante el levantamiento y procesamiento fotogramétrico.....</i>	<i>- 63 -</i>
<i>Tabla 3. Materiales y métodos empleados</i>	<i>- 64 -</i>
<i>Tabla 4. Clasificación de pendiente.</i>	<i>- 70 -</i>
<i>Tabla 5. Matriz base de riesgo (SIGR-E)</i>	<i>- 81 -</i>
<i>Tabla 6. Matriz aplicada al área de estudio.....</i>	<i>- 82 -</i>
<i>Tabla 7. Matriz sectorial del área de estudio.....</i>	<i>- 84 -</i>

CAPITULO I

1. Introducción

La minería impulsa el desarrollo de los países y alineada a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), puede generar importantes beneficios sociales y económicos. Sin embargo, sin una gestión de sostenibilidad a mediano y largo plazo y sin un cierre adecuado, podrían producir pasivos ambientales de alto riesgo. En Ecuador, esta tensión se evidencia en la relavera abandonada Tunzhun - San Bartolomé, que carece de un cierre técnico. Este estudio propone una forma para caracterizarla y evaluar riesgos mediante fotogrametría y Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el propósito de generar evidencia útil y orientar decisiones de gestión.

1.1. Contexto y Antecedentes Generales.

La extracción de minerales ha sido, a lo largo del tiempo, una de las pujanzas económicas más poderosas, que ha contribuido al avance de las sociedades. Gracias a esta actividad se ha promovido la creación de infraestructura, el intercambio comercial y el avance en tecnología. Sin embargo, estos logros a menudo se ven eclipsados por efectos negativos sobre el medio ambiente y las comunidades, en particular cuando la extracción no se ajusta a los principios de sostenibilidad o no se implementan cierres apropiados

Como se advierte en diversos estudios, una mina que ha sido abandonada o que se encuentra en etapa de cierre y abandono y que no ha sido cerrada de forma adecuada, deja un legado que puede representar riesgos significativos para la seguridad de la población, así como la salud de las personas y el ambiente” (MINSUS, 2025).

En Ecuador la minería ha tenido un impacto considerable, particularmente en el Sur de la Sierra, donde la búsqueda de metales como el oro y la plata ha atraído la atención de empresas tanto locales como internacionales. Un caso representativo se localiza en la parroquia San Bartolomé, perteneciente al cantón de Sígus en la provincia de Azuay, que

aún cuenta con una relavera minera desierta (Figura 1). La relavera creada para almacenar los desechos mineros carece de supervisión, lo que ocasiona preocupación ante su deterioro continuo, generando de manera continua la descomposición fisicoquímica de los residuos mineros, que constantemente dan origen a los fenómenos de lixiviación y arrastre de partículas incidiendo directamente en los cursos de agua que circundan el área y contaminan los suelos (Mora & Reiban, 2024).

Los pasivos mineros representan un desafío ambiental para las poblaciones cercanas, con las filtraciones, deslizamientos, arrastre de materiales en las pendientes y la contaminación de los cursos de agua que afectan directamente la seguridad de los pobladores y la salud de los ecosistemas y la carencia de información técnica actualizada para comprender la magnitud del problema (Soria-Maldonado & Cáceres-Romero, 2022).

Figura 1. Relavera abandonada en San Bartolomé



Fuente: Elaboración propia, 2025.

En este marco, los avances en tecnología que se realizan mediante el uso de vehículos no tripulados, conocidos como drones, han confirmado ser de gran utilidad

porque brindan información desde una perspectiva aérea que contribuye a un análisis espacial más detallado lo que simplifica la evaluación de estos riesgos. La fotogrametría aérea, empleando drones, se ha establecido como un método efectivo para conseguir datos geoespaciales de alta resolución. Este método es aplicable en diversos campos del conocimiento, incluida la agricultura, la silvicultura, la topografía, la minería y la inspección estructural. Esta técnica permite detallar un examen con las características físicas del terreno, la detección de factores de amenaza y la información precisa sobre la gestión de riesgos (Ferencz-Appel, García de Marina, Arriola-Valverde, & Rimolo-Donadio, 2021)

La presente investigación pretende analizar los riesgos vinculados a la relavera minera abandonada de San Bartolomé, empleando la fotogrametría aérea como herramienta técnica. El objetivo es describir la situación actual de la relavera, evaluar la vulnerabilidad del entorno y establecer un diagnóstico que sirva de apoyo para la toma de decisiones. Con esta información se espera el aporte académico en el área de estudios de riesgos, de igual manera generar un recurso práctico que pueda ser utilizado por las autoridades respectivas y las poblaciones del área de influencia para la búsqueda de soluciones sostenibles.

De esta manera, la investigación se convierte en una contribución que requiere mostrar de manera más visible los desafíos que generan los pasivos mineros en el país, orientando la significancia de un manejo y control de forma más idónea, responsable y planificada del territorio. Por ende, permitir un debate sobre la inserción de herramientas tecnológicas innovadoras para la obtención de diagnósticos y prevención de desastres, con el fin de fortalecer la resiliencia comunitaria y el resguardo de los recursos naturales.

1.2. Antecedentes

La industria minera se considera una fuente potencial de recursos económicos para el país, que ha permitido impulsar su desarrollo, sin embargo, ha ocasionado una reacción en cadena por los impactos ambientales que conlleva y las afectaciones a la salud pública. La contaminación de suelos a causa de los metales pesados es el resultado de una inapropiada actividad minera, el desatinado manejo de los residuos y relaves mineros y la falta de medidas idóneas para el cierre de las minas, las cuales pueden ocasionar pasivos ambientales de dimensiones significativas. El riesgo de estas actividades es que los metales pesados son muy tóxicos y son residuales, es decir que tienen la capacidad de permanecer en el medio ambiente, insertándose en la cadena trófica a través del suelo, lo que perjudica a la diversidad biológica y a la población humana. Aunado a ello los suelos son utilizados para la agricultura (Aldaz, 2024).

Desde una perspectiva geológica, la parroquia San Bartolomé se localiza en el extremo sur de la cordillera andina del Ecuador, enmarcada dentro de un cinturón volcano-sedimentario de edad Eocena. Este está compuesto principalmente por lavas andesíticas y dacíticas, brechas volcánicas y depósitos piroclásticos que, debido a su alto grado de fracturamiento, presentan una notable susceptibilidad a procesos de meteorización (Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico, 2017).

A este contexto geológico se suma la presencia de relaves mineros y taludes artificiales en pendientes pronunciadas, elementos que intensifican la inestabilidad geomorfológica del área. En estas condiciones, factores como la saturación de humedad en el suelo, la erosión superficial y los movimientos en masa constituyen amenazas latentes para las infraestructuras y asentamientos ubicados en zonas más bajas.

Frente a esta problemática, la fotogrametría aérea se posiciona como una herramienta clave. Permite no solo obtener representaciones detalladas de la morfología actual del terreno, sino también monitorear cambios en la dinámica geomorfológica con alta precisión. Al integrar estos datos con la cartografía geológica, se puede realizar una evaluación más rigurosa del riesgo físico que enfrentan las poblaciones y medios de vida situados aguas abajo de los pasivos ambientales mineros.

La presencia de relaveras abandonadas en la región austral del Ecuador constituye un problema geológico-ambiental relevante debido a la combinación de su historial extractivo y la compleja geología andina que caracteriza al cantón Sígig. La cartografía oficial del Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero y Metalúrgico describe esta zona como un corredor volcánico-volcanosedimentario del Eoceno, donde afloran secuencias andesíticas, dacíticas, brechas y depósitos piroclásticos susceptibles a meteorización e inestabilidad (INIGEMM, 2017). Estas características, sumadas al desmantelamiento de antiguas operaciones mineras, favorecen riesgos asociados a hundimientos, erosión, filtraciones y procesos de remoción en masa.

La fotogrametría aérea mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) se ha consolidado como una herramienta eficaz para el levantamiento de información de zonas mineras. Esta técnica permite generar modelos digitales de elevación (MDE), ortomosaicos georreferenciados y análisis volumétricos, lo que facilita la identificación de zonas críticas, la evaluación de pendientes, la detección de deformaciones superficiales y la estimación de volúmenes de material acumulado. Su aplicación ha sido validada en diversos contextos mineros a nivel internacional.

En Chile, investigaciones realizadas en la región de Atacama han empleado drones equipados con cámaras multiespectrales para evaluar la estabilidad de taludes en relaves de cobre. Los resultados permitieron identificar zonas de subsidencia y fracturamiento

superficial, estableciendo líneas base para el monitoreo periódico de deformaciones (Silva, 2020). En Perú, estudios como el de Quispe et al. 2021 integraron fotogrametría con Sistemas de Información Geográfica (SIG) para construir un modelo de vulnerabilidad ambiental en torno a relaves abandonados, considerando variables como la pendiente, el uso del suelo y la proximidad a fuentes hídricas.

En México, (Ramírez & Torres, 2022) aplicaron fotogrametría aérea en el monitoreo de depósitos de relaves en Zacatecas, logrando detectar cambios morfológicos en cortos periodos de tiempo y establecer alertas tempranas ante posibles eventos de colapso. En Argentina, (González, Paredes, & Soto, 2023) utilizaron drones y sensores térmicos para evaluar la evolución de un relave en la provincia de San Juan, identificando zonas de lixiviación activa y proponiendo medidas de mitigación basadas en evidencia geoespacial.

En el ámbito académico, la Universidad de la República en Uruguay ha documentado experiencias de aplicación de fotogrametría y modelación 3D en contextos geológicos y mineros, destacando su utilidad para el relevamiento de estructuras geotécnicas y la planificación de intervenciones en áreas de riesgo. Estas iniciativas han sido respaldadas por el Ministerio de Industria, Energía y Minería del Uruguay, que ha publicado informes técnicos donde se evidencia el potencial de estas herramientas para el análisis del subsuelo y la gestión de zonas vulnerables (Ministerio de Industria, 2020). Por su parte, la empresa Geocom ha reportado múltiples casos de éxito en la industria minera chilena, donde la fotogrametría ha sido utilizada para el control volumétrico de relaves, la planificación de cierres progresivos y la evaluación de estabilidad de estructuras mineras (Geocom, 2020).

En un contexto diferente, Matías (2020) desarrolló una investigación centrada en la aplicación de tecnologías emergentes en el ámbito minero. Su estudio tuvo como

objetivo evaluar el uso de drones a través de un modelo tecnológico diseñado para mejorar los procesos productivos en la empresa minera Chinalco Perú S.A., ubicada en Morococha. El enfoque adoptado fue de carácter aplicado, con diseño no experimental, descriptivo-comparativo y bajo una metodología cualitativa. La muestra estuvo compuesta por los procesos productivos de la empresa, y la técnica utilizada fue la observación estructurada, registrada mediante una guía que permitió recopilar información detallada sobre las condiciones de operación.

Asimismo, Chand et al. (2025) llevaron a cabo una revisión exhaustiva sobre el uso de drones en el monitoreo de procesos de recuperación en minas a cielo abierto. Su investigación se centró en la sistematización de plataformas tecnológicas vinculadas a la minería 4.0, destacando el potencial de estas herramientas para mejorar la gestión ambiental. La implementación de sensores especializados y aplicaciones prácticas ha demostrado ser prometedora para fortalecer el monitoreo y la recuperación de sitios mineros. El estudio propone una metodología integrada, con base técnica sólida, que amplía el conocimiento sobre el uso de drones en actividades de rehabilitación minera y promueve su adopción como práctica estándar en el sector.

Estas experiencias demuestran que la fotogrametría aérea no solo mejora la precisión del análisis espacial, sino que también reduce significativamente los costos y tiempos de levantamiento en comparación con métodos tradicionales como la estación total o el escaneo láser terrestre. Además, su integración con plataformas SIG permite realizar análisis multicriterio, modelar escenarios de riesgo y generar productos cartográficos de alta calidad para la toma de decisiones (GreenWorld, 2020).

En este marco, la presente investigación propone aplicar fotogrametría aérea para caracterizar la relavera abandonada de San Bartolomé, en la provincia de Azuay, Ecuador. Esta herramienta permitirá generar un diagnóstico técnico detallado del estado actual del

depósito, identificar zonas de riesgo y aportar insumos clave para la gestión ambiental y la planificación territorial en contextos de pasivos mineros. La relavera posee una superficie de 54349,57 m²; está parcialmente inundada y el terreno mantiene humedad casi permanente, de forma habitual (Figura 1), con textura pantanosa y un marcado olor predominante a sulfuro. Tales condiciones han sido descritas en la literatura técnica reciente (Mora & Reiban, 2024).

1.3. Planteamiento del problema.

Los reservorios de residuos mineros son una parte fundamental del proceso extractivo, ya que en ellos se depositan los desechos generados durante el beneficio de minerales. No obstante, estos depósitos también representan una de las fuentes de impacto ambiental más significativas cuando no se gestionan adecuadamente (Sánchez, 2020). Si permanecen en estado de abandono y carecen de un cierre técnico eficaz, se convierten en focos de riesgo tanto para el entorno natural como para las comunidades cercanas. La acumulación de metales pesados, la presencia de aguas contaminadas y la inestabilidad estructural de los taludes pueden generar fenómenos como deslizamientos, infiltraciones en acuíferos y deterioro progresivo del suelo y del agua. Por ello, resulta fundamental contar con información crítica y específica que sustente la toma de decisiones en el ámbito ambiental y de salud pública (Aldaz, 2024).

En la parroquia San Bartolomé, perteneciente al cantón Sígsig en la provincia del Azuay, se encuentra un relave minero en el sector Tunzhun. Este depósito fue originado por la actividad minera iniciada por la empresa filipina Benguet Corporation en 1976 y continuada por la compañía canadiense Armenonic a partir de 1992. Tras la declaración de quiebra de Armenonic en 1993, las operaciones se suspendieron definitivamente, dejando la infraestructura abandonada. Desde entonces, el sitio no ha contado con

supervisión técnica, lo que ha generado preocupación sobre su estabilidad y los posibles riesgos ambientales asociados (Mora & Reiban, 2024).

La ubicación del relave en una zona con topografía irregular y pendientes pronunciadas incrementa su vulnerabilidad. La escorrentía pluvial que desciende desde áreas más elevadas contribuye a la saturación del terreno, lo que puede provocar deslizamientos y afectar diversas actividades humanas en la zona. Además, la configuración del suelo facilita la filtración de contaminantes hacia cuerpos de agua cercanos, con el consiguiente deterioro de ecosistemas. Investigaciones preliminares en el área han identificado la presencia de metales pesados como mercurio, arsénico y plomo, cuya dispersión representa un serio riesgo para la salud humana y el equilibrio ecológico (Valencia, 2017).

Figura 2. Características irregulares del terreno en la mina San Bartolomé



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Aldaz (2024) reporta que en la parroquia San Bartolomé, ubicada en el cantón Sígsig (provincia del Azuay), se identificó la presencia de metales pesados como cadmio, plomo y zinc. Para estimar sus concentraciones en el área de estudio, se aplicaron diversas

técnicas de interpolación espacial, lo que permitió obtener una visión más clara sobre la distribución de estos elementos en el terreno afectado.

A partir de la información disponible sobre la presencia de agentes contaminantes en la zona y considerando el estado actual del sitio, queda en evidencia una falta de monitoreo constante con respaldo técnico, un aspecto clave para la gestión de riesgos en minas abandonadas. La ausencia de datos actualizados dificulta que tanto las autoridades como la comunidad puedan identificar correctamente las amenazas presentes y actuar de manera oportuna para mitigarlas. Por ello, se vuelve prioritario llevar a cabo estudios que apliquen metodologías modernas, capaces de evaluar de forma precisa la situación del relave y generar información confiable para la toma de decisiones.

En ese sentido, la fotogrametría aérea mediante drones se presenta como una herramienta eficaz e innovadora. Esta tecnología permite obtener ortomosaicos de alta resolución y modelos digitales del terreno sin exponer al personal a condiciones peligrosas. Gracias a ello, es posible detectar fisuras, erosión, deslizamientos o fallas estructurales, lo que aporta una base sólida para analizar los riesgos existentes en el área afectada.

1.4. Justificación de la investigación

El uso de fotogrametría aérea para realizar un análisis de riesgos en la relavera de residuos mineros abandonada de San Bartolomé está plenamente justificado, dada la urgencia de prevenir posibles desastres ambientales, estructurales y proteger a las comunidades cercanas. Esta tecnología permite generar información clave para identificar zonas vulnerables, caracterizar amenazas y contar con datos fiables que respalden decisiones de gestión territorial.

Una de las principales ventajas de este enfoque es su capacidad para recopilar datos con gran precisión y en un corto tiempo, lo cual lo hace más eficiente frente a

métodos tradicionales. Además, reduce la exposición del personal de campo a zonas de difícil acceso o riesgo, optimizando tanto recursos económicos como humanos.

Los productos derivados de esta técnica como los ortomosaicos y modelos digitales de elevación constituyen herramientas útiles para diseñar estrategias de restauración, definir medidas de mitigación y establecer programas de seguimiento continuo. Estos insumos no solo benefician el contexto local, sino que también podrían aplicarse como referencia para la gestión de otros pasivos mineros en el país.

Desde una visión más amplia, este tipo de estudio se enmarca en los objetivos de desarrollo sostenible y promueve la adopción de tecnologías innovadoras en la gestión ambiental en el Ecuador. Asimismo, fortalece la responsabilidad institucional y fomenta la participación comunitaria en la construcción de territorios más seguros y resilientes.

La fotogrametría aérea con drones se ha convertido en una herramienta clave para gestionar riesgos en relaveras. Ya que permite obtener una base geométrica y cinemática objetiva sin tener que exponer al personal en terreno. Por otro lado, con un solo vuelo se puede cubrir todo el activo, generar ortomosaicos, producir modelos digitales del terreno y obtener nubes de puntos de altísima densidad.

Lo más interesante es que, al repetir vuelos con horas de diferencia, se pueden detectar pendientes, curvaturas, escurrimientos y estructuras clave. También se pueden identificar grietas, cárcavas, asentamientos o subsidencias, incluso sutiles, y medir cambios de volumen. Todo esto permite anticipar riesgos, activar alertas tempranas y priorizar acciones de mantenimiento o intervención. (Westoby, Brasington, Glasser, Hambrey, & Reynolds, 2012)

Pero donde realmente brilla esta tecnología es cuando se integra con un sistema completo de monitoreo geotécnico. Los productos que entrega la fotogrametría ayudan a construir modelos de estabilidad más precisos, definir mejor dónde hacer calicatas o

ensayos, y decidir dónde instalar sensores como piezómetros o inclinómetros. También permite documentar el comportamiento de los drenajes, diques y bermas tras eventos extremos como lluvias intensas. En resumen: no reemplaza a la investigación geotécnica ni al modelamiento numérico, pero sí los refuerza. Y lo hace reduciendo la exposición en zonas peligrosas, mejorando la calidad de los datos y acelerando la toma de decisiones basadas en observaciones claras y repetibles. (American Society for Photogrammetry, 2015)

En definitiva, esta investigación se justifica tanto por su aporte científico como por su valor práctico. No solo mejora la comprensión de los riesgos asociados a relaveras mineras abandonadas, sino que también proporciona insumos estratégicos para la toma de decisiones y contribuye a la protección del medio ambiente y de la población de San Bartolomé frente a posibles emergencias.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar y caracterizar los riesgos vinculados a una relavera minera en abandono en el sector Tunzhun de San Bartolomé, cantón Sígsig, utilizando técnicas de fotogrametría aérea con dron, para identificar zonas de vulnerabilidad y potenciales eventos de remoción en masa.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Generar un modelo digital del terreno (MDT) mediante fotogrametría aérea con dron, como base para el análisis de riesgos.
2. Identificar áreas de susceptibilidad y las principales amenazas con potencial de afectar a las infraestructuras y poblaciones cercanas.
3. Evaluar la vulnerabilidad del entorno físico y social frente a las amenazas detectadas, con base en la información obtenida.

4. Proponer estrategias de aprovechamiento y gestión del espacio en abandono, a partir de los datos obtenidos.

1.6. Alcance y delimitación del estudio

El alcance de esta investigación se centrará en la relavera minera abandonada ubicada en el sector Tunzhun de la parroquia San Bartolomé, cantón Sígfig, provincia del Azuay. Mediante el uso de fotogrametría aérea, se busca identificar las zonas de mayor riesgo y vulnerabilidad frente a posibles eventos de remoción en masa. Este enfoque permitirá caracterizar el estado actual del depósito y establecer propuestas de manejo que contribuyan tanto a la optimización del uso del terreno como a la reducción de los impactos ambientales. Asimismo, se pretende generar información útil para proteger a las comunidades cercanas ante posibles amenazas.

La investigación tiene como objetivo principal anticipar los riesgos presentes en la zona de estudio, con el fin de prevenir de forma oportuna situaciones que puedan derivar en desastres naturales y afectar negativamente a las poblaciones aledañas.

CAPITULO II

2. Marco Teórico

2.1. Pasivos ambientales

Los pasivos ambientales mineros son restos de actividades mineras como relaves, botaderos o suelos contaminados que siguen liberando contaminantes o representando un riesgo, aunque ya no estén en operación. Para poder analizarlos adecuadamente: primero se identificarían los peligros (por ejemplo, taludes inestables o drenajes contaminados); luego se evaluaría cómo se puede mover ese contaminante (línea de base ambiental); después se evalúa a quién puede afectar (poblaciones, ríos, cultivos); y finalmente se estima el riesgo, considerando la probabilidad y el daño que podría causar.

En Ecuador, estos pasivos son el resultado de años de minería ilegal, mal gestionada con estructuras abandonadas que liberan arsénico, mercurio plomo, entre otros a los ríos, mientras las comunidades cargan con las consecuencias. No se trata de un "daño inevitable", sino por el contrario de una falta de responsabilidad en el cierre y monitoreo de estas operaciones.

Resolver este problema requiere voluntad política, tecnología (drones, sensores, modelación), normas claras y, sobre todo, aplicar el principio de que quien contamina paga. Cada año que pasa sin actuar agrava el daño y hace más costosa la solución.

2.2. Gestión y análisis de Riesgos

La gestión de riesgos parte del principio fundamental de que el riesgo (R) es el resultado de la interacción entre una amenaza (A) y la vulnerabilidad (V) de los elementos expuestos, expresado de manera general como:

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} \times \text{Vulnerabilidad}$$

Esta relación constituye la base conceptual utilizada en los marcos internacionales de gestión del riesgo, al establecer que un escenario riesgoso solo se materializa cuando existe simultáneamente un proceso peligroso (amenaza) y una susceptibilidad o fragilidad de los sistemas, infraestructuras o comunidades (vulnerabilidad). Bajo este enfoque, la gestión del riesgo implica identificar, caracterizar, evaluar y reducir estos componentes mediante análisis técnicos, planificación y medidas de intervención (Internacional Organization for Standardization, 2018).

En el ámbito minero, el estudio del riesgo adquiere una relevancia particular debido a que la actividad depende de la explotación de recursos esenciales para la sociedad contemporánea. Prácticamente todas las actividades económicas y gran parte de los bienes que se utilizan diariamente tienen algún vínculo con la minería (USGS, 2025). Además, ciertos minerales como sodio, potasio, calcio, hierro y magnesio cumplen funciones biológicas fundamentales, lo cual evidencia la necesidad de disponer de una minería gestionada de manera responsable y segura (Health, 2022).

Sin embargo, la minería también implica amenazas inherentes. A pesar de los avances en sistemas de seguridad, continúan registrándose incidentes significativos, particularmente los relacionados con la operación de equipos móviles y con derrumbes o inestabilidades en frentes de explotación, conocidos como fall of ground (García, 2023). Estos eventos constituyen amenazas físicas que requieren controles de ingeniería y monitoreo continuo para minimizar la vulnerabilidad del personal y la infraestructura.

La problemática se intensifica en minas abandonadas o pasivos ambientales mineros, donde la ausencia de gestión activa incrementa tanto la amenaza como la vulnerabilidad. Estos sitios presentan riesgos físicos como hundimientos, colapsos estructurales, inestabilidad de taludes y subsidencia, así como riesgos químicos y biológicos documentados ampliamente en la literatura (Meza Canto & Castilla Rojas,

2024). En Perú, por ejemplo, la evaluación de la unidad minera Cobre Cata Acaril evidenció altos niveles de contaminación por metales pesados y deficiencias asociadas a procesos de cierre inadecuados, constituyendo un escenario de riesgo elevado para las comunidades y ecosistemas circundantes (Meza Canto & Castilla Rojas, 2024).

2.3. Experiencias previas y/o similares

La fotogrametría con drones, se volvió una herramienta clave y, además, bastante accesible para sacar modelos muy detallados (mayor precisión), sobre todo en depósitos de relaves y zonas mineras.

Un ejemplo, fue el estudio de un programa sub-ártico (2015–2017) hicieron cuatro campañas que cubrieron todo el depósito sin exponer a nadie a exponer a riesgos y eso terminó por consolidar un análisis de fotogrametría como parte del monitoreo rutinario de seguridad (Rauhala, Tuomela, Davids, & Rossi, 2017).

Otro ejemplo fue un análisis más exhaustivo para medir la longitud de la playa seca y su pendiente como indicadores de estabilidad. En 2025, un equipo mezcló vuelos con sensores de nivel; la diferencia frente a métodos tradicionales y poder detectar las variables más críticas, los volúmenes del estanque, posición de la playa para evitar un sobrevertido (Li, Zheng, Fang, Zhang, & Xiao, 2025).

En riesgo y fallas, los modelos UAV han sido la base para simular rupturas o flujos de relaves. Casos como: “Fundão y Brumadinho” en Brasil usaron modelos 3D, montados sobre DEMs de alta resolución; los outputs salieron bastante bien con lo observado en terreno (Yu, Tang, & Chen, 2020)

En sitios abandonados también suman: los drones ayudan a detectar grietas, hundimientos leves, residuos mal dispuestos o drenaje ácido; si encima integras geoquímica con imágenes de muy alta resolución.

2.3.1. Los Drones

La palabra Dron proviene del inglés y su significado al idioma español es abeja macho, que se origina del sonido al volar; sin embargo, la Agencia Estatal de Seguridad Aérea lo definen como aeronaves o vehículo aéreo no tripuladas VANT, pilotadas a través de un control remoto o radio mando a distancia y se clasifican en dos categorías básicamente de ala fija y multirrotores (Gómez-Zurdo, 2021).

Los drones son considerados instrumentos que se pueden emplear en diversas áreas de influencia, que permite tener fácil acceso a ciertas regiones o zonas determinadas con especial rapidez y destreza en la recogida y captura de información en el área de estudio, aunado a esto no arriesga la integridad física de ninguna persona en el momento del trabajo de campo (Cristóbal, 2023).

El uso de drones se ha incrementado rápidamente a nivel mundial con múltiples propósitos para importantes empresas que ejercen funciones de paquetería, envíos, ingreso a lugares de difícil acceso y labores de vigilancia. La manipulación de los drones es fundamental los tipos de pilotaje tanto externo como el interno, es decir el interno la persona verifica la condición del dispositivo, el pilotaje externo la persona maniobra el dron desde el punto de vista del usuario (Torres & Lliguisaca, 2023).

En esta investigación, los drones se emplean como una herramienta de levantamiento fotogramétrico, orientada a la generación de modelos tridimensionales de la relavera minera de San Bartolomé, con el fin de identificar riesgos estructurales, erosivos o de estabilidad física.

2.3.2. Velocidad y Tiempo de Vuelo

Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) de menor tamaño puede volar a una velocidad inferior a 15 m/s, sin embargo, los UAVs más grandes alcanzan hasta 100 m/s;

es importante que el vehículo siga una trayectoria específica porque permite mejorar su nivel de eficiencia espectral y energética debidamente monitoreada a lo largo de su recorrido, se resumen entre la agilidad de giro y la velocidad. En referencia al tiempo de vuelo, su duración se considera hasta el agote de su batería, condicionado por el tamaño, peso, condiciones meteorológicas, sistema de piloto y GPS (Méndez, 2024).

2.3.3. Carga Útil

Hace referencia a la capacidad de carga de un vehículo aéreo no tripulado, para levantar y trasladar una cantidad de peso en una determinada distancia; una carga útil se traduce en el transporte de más accesorios en un tiempo de vuelo más corto, donde existe mayor consumo de batería y mayor tamaño. Comúnmente se trasladan sensores, cámaras de video empleadas para labores de vigilancia o reconocimiento, equipos celulares o tablets que peso inferior a 1 kg (Méndez, 2024).

2.3.4. Alcance y Altitud

El alcance se considera el recorrido desde donde puede ser manipulado a través del control remoto, la distancia entre drones pequeños o grandes llegando hasta cientos de kilómetro; en referencia a la altitud que puede volar el dron se clasifican en dos categorías plataformas de baja altitud (LAPs) permiten la comunicación celular con rapidez y rentabilidad favoreciendo la comunicación y las plataformas de alta altitud (HAPs) ejemplo de ello los globos que se emplean para comunicación celular con mayor despliegue y más complejo con conectividad a internet (Méndez, 2024).

2.3.5. Fotogrametría Aérea con Drones

La fotogrametría aérea con drones fue diseñada fundamentalmente para generar de forma rápida y sencilla información de la observación de objetos, determinadas

regiones o superficies a partir de imágenes que son capturadas por un drone, con el propósito de registrar un mapa de un área específica o de un determinado territorio con fotografías aéreas georreferenciadas para generar pares estereoscópicos entre las fotos. Representa una base importante en la elaboración de información cartográfica a nivel mundial, con la obtención de resultados innovadores con tecnología de punta (Chimborazo & Espejo, 2021).

Entre las ventajas es que las capturas de imágenes se realizan en menor tiempo, sin ser afectadas por condiciones climáticas, la fotogrametría es el método más idóneo para terrenos o zonas de estudios de difícil acceso o en ocasiones inaccesibles, se obtiene un registro de información con elevado nivel de detalle, amplitud en el registro de información de las zonas aledañas, sin embargo, en circunstancias con elevada densidad de vegetación se hace dificultoso la captura de la información requerida, pero depende del tipo de información que se requiera recabar (Chimborazo & Espejo, 2021).

Las nuevas tendencias tecnológicas aplicadas han estado orientadas al control como el GPS, laser escáner, radares terrestres entre otros son básicamente desde un punto fijo, condición que genera ciertas limitaciones en su aplicación sobre todo en zonas de difícil acceso y con visibilidad restringida, aunado a esto los puntos de observación a la misma distancia, ángulo de incidencia, la luminosidad que afecta en la captura de la información perturba la calidad de los resultados. En función de esto, los nuevos métodos en la captura de imágenes en diversas ubicaciones, ha generado una evolución y mejora sobre los sistemas convencionales de medición como lo es la fotogrametría con drones que desarrollaron técnicas con varios sensores que son pilotados a control remoto y hacen favorable la evaluación de relaveras, fachadas, grandes estructuras a gran escala y gran detalle (Gómez-Zurdo et al., (2021).

La vigilancia y control de las grandes estructuras, minas abandonadas y ciertos lugares que demanden monitoreo, se ha empleado a través de la fotogrametría aérea con drones para evaluar las formaciones rocosas, movimientos en masa, deslizamientos o deformaciones de espacios que representan un riesgo significativo, latente y se encuentran en estado de abandono. La valoración con los drones vinculados a la fotogrametría aérea permite obtener modelos en color verdadero y a gran escala y gran detalle, por su alta resolución y escalado favorece de manera rápida y sencilla para evaluar con mayor detalle la estructura que se requiere (Gómez-Zurdo, Aplicación de la fotogrametría con drones al control deformacional de estructuras y terreno, 2021).

Figura 3. *Fotogrametría a diferentes escalas en correspondencia del mismo punto*



Fuente: (Gómez-Zurdo et al., (2021).

La metodología de campo se basa en la fotogrametría, que consiste en la recopilación de información mediante la captura de imágenes aéreas georreferenciadas. Para ello, se utilizan equipos como GPS, RTK o módulos PPK. Luego, los datos obtenidos

se procesan para generar productos como modelos 3D, ortoimágenes georreferenciadas, nubes de puntos, curvas de nivel, entre otros.

Este procesamiento se realiza con el apoyo de software especializado como AutoCAD, Civil 3D, ReCAP, Pix4DMapper, Global Mapper y ArcGIS (Pineda, 2021).

Figura 4. *Muestra de una Ortoimagen debidamente georreferenciada*



Fuente: (Pineda, 2021).

Según Cristóbal (2023), se utilizó la fotogrametría con drones para evaluar los movimientos de tierra en las unidades Atacocha y El Porvenir, pertenecientes a la empresa Nexa Resources. El objetivo fue optimizar los recursos destinados a los levantamientos topográficos y al cálculo de volúmenes en ambas unidades.

La metodología empleada fue de tipo aplicada, con un nivel descriptivo-comparativo, bajo un enfoque cualitativo. Se basó en métodos deductivos y analíticos, dentro de un diseño no experimental.

Figura 5. *Imagen satelital de puntos de observación de estaciones de un área de estudio*

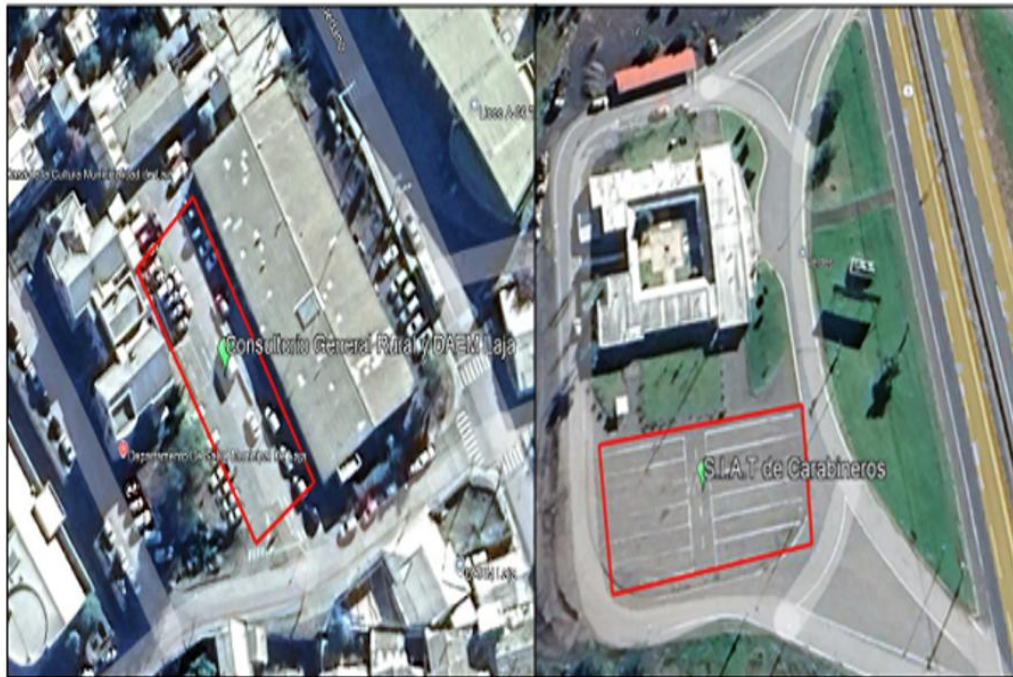


Fuente: (Cristóbal, 2023).

Jara (2025) evaluó si el uso de drones y fotogrametría era viable para detectar y medir el deterioro en pavimentos, tanto rígidos como flexibles. Comparó esta metodología con los métodos tradicionales, especialmente en infraestructuras aeroportuarias, y encontró diferencias notables en aspectos como el tiempo de medición, los criterios del evaluador y la calidad de los datos recolectados.

Gracias a esta tecnología, es posible elegir zonas representativas dentro del área de estudio que reflejan con mayor detalle las condiciones específicas del pavimento. Además, al combinar diferentes alturas de vuelo y niveles de traslape, se logran resultados más precisos y confiables sobre el estado real de los pavimentos aeroportuarios.

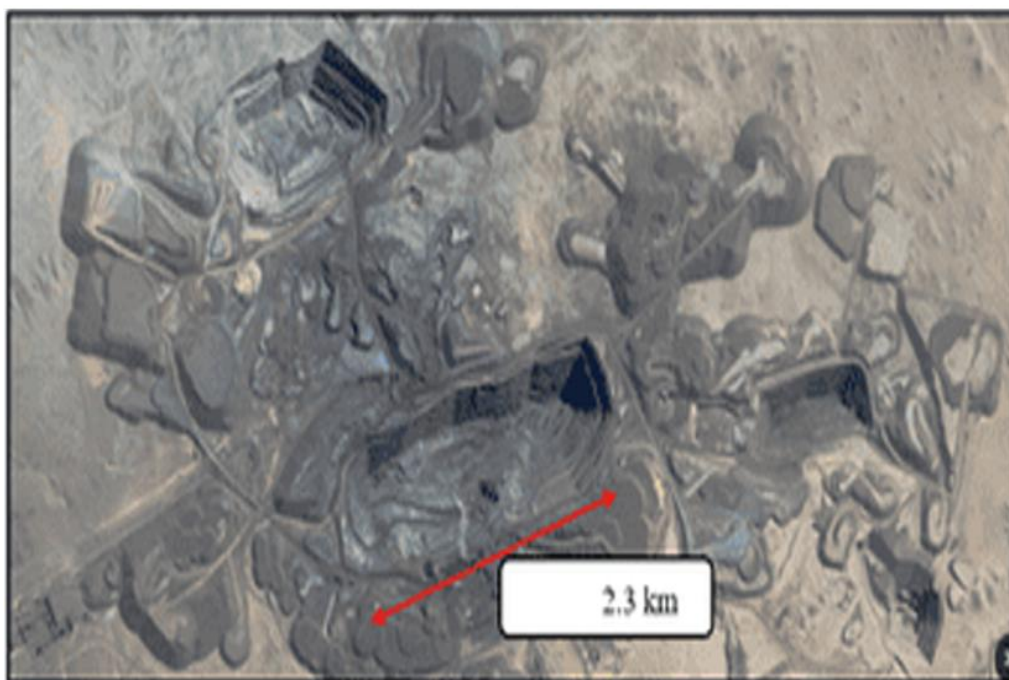
Figura 6. Imagen de fotogrametría evidencia el deterioro de pavimentos aeroportuarios



Fuente: (Jara, 2025).

Además, Bustamante (2022) en su investigación, tuvo como objetivo optimizar los levantamientos topográficos de los stocks de mineral mediante el uso de fotogrametría en una mina a cielo abierto ubicada en la costa sur del Perú. La implementación de drones resultó ser una propuesta muy acertada, ya que aportó múltiples beneficios tanto para la empresa como para los operarios. Esta tecnología permitió realizar los levantamientos de forma rápida y segura, mejorando significativamente el nivel de detalle en la medición de las superficies de los stocks

Figura 7. *Imagen satelital de una zona minera*



Fuente: (Bustamante, 2022).

En este trabajo, se utilizan drones y fotogrametría aérea para poder analizar los diversos riesgos físicos y ambientales que rodean la antigua relavera minera de San Bartolomé. La idea es generar modelos digitales y ortomosaicos bien detallados, que nos ayuden a detectar zonas con erosión, acumulación de sedimentos o signos de inestabilidad. Todo esto servirá como base técnica para tomar decisiones más informadas en el futuro.

2.4. Zona de estudio.

El área de estudio se ubica en el sector Tunzhun, dentro de la parroquia rural San Bartolomé, cantón Sigsig, en la provincia del Azuay, al este de la cordillera andina sur del Ecuador, aproximadamente a 60 km de Cuenca. Se trata de una zona de relieve bastante montañoso, con pendientes que van de moderadas a fuertes y altitudes cercanas a los 2.790 metros sobre el nivel del mar. El terreno está compuesto por formaciones volcano-

sedimentarias fracturadas, sobre las cuales se desarrollan suelos tipo Inceptisol. Estos suelos tienen una fertilidad media, pero también una alta vulnerabilidad a procesos erosivos.

En esta zona se encuentra una relavera minera abandonada, ubicada en laderas que descargan hacia la microcuenca de la quebrada Sorche, la cual forma parte del sistema hídrico del río Bolo Pamar. El clima en la región es húmedo e isotérmico, con temperaturas promedio que oscilan entre 12 y 13 °C y una alta precipitación anual.

Todo este conjunto de condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrológicas sumado al uso actual del suelo (pastizales, pequeños cultivos y restos de estructuras mineras) da lugar a un entorno frágil. Este escenario favorece la aparición de fenómenos como inestabilidad de taludes, erosión acelerada y movimiento de sedimentos posiblemente contaminados desde el antiguo depósito de relaves

2.4.1. Localización.

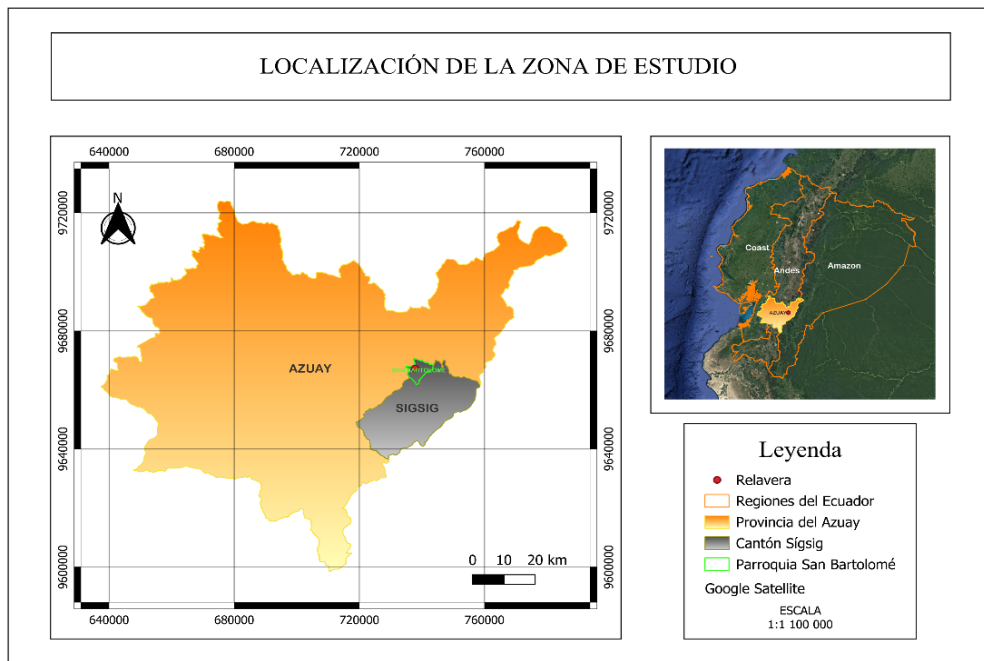
Ecuador se encuentra en la zona noroccidental de América del Sur y se distingue por su enorme riqueza natural y cultural. A pesar de ser un país relativamente pequeño, presenta una gran variedad de paisajes, climas y ecosistemas, que se distribuyen en sus cuatro regiones naturales: Costa, Sierra, Amazonía e Insular. Esta diversidad le otorga un valor ambiental y geográfico muy particular.

En este marco, el presente estudio se desarrolla en la parroquia San Bartolomé, perteneciente a la provincia del Azuay, en la región interandina o Sierra Sur del Ecuador. La zona se encuentra aproximadamente a 60 minutos de la ciudad de Cuenca, capital provincial, mediante una vía terrestre de primer orden de acceso vehicular.

Geográficamente, San Bartolomé está situada en las coordenadas 3°00'28" de latitud sur y 78°50'38" de longitud oeste, alcanzando una altitud promedio de 2.790 metros sobre el nivel del mar en su cabecera parroquial (Gobierno Autónomo

Descentralizado Parroquial Rural de San Bartolomé, 2024). Su relieve es predominantemente montañoso, característico de los Andes australes, con pendientes moderadas a pronunciadas que conforman un paisaje irregular y de gran valor ambiental.

Figura 8. *Mapa de ubicación de la zona de estudio.*



Fuente: Elaboración propia, 2025 - IGM Geo Portal Ecuador – Qgis

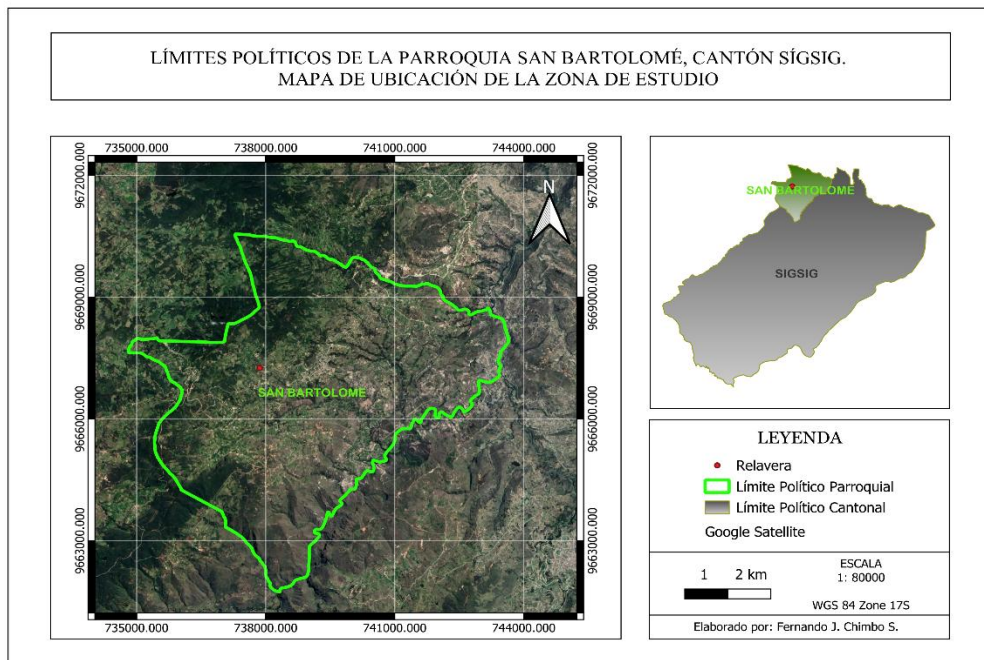
San Bartolomé conforma una de las seis parroquias rurales del cantón de Sigsig, en la provincia del Azuay. La cabecera parroquial se ubica a una distancia aproximada de 30 km por carretera desde Cuenca, el acceso principal a la parroquia se da a través del anillo vial Valle Santa Ana Bella Unión. También existen rutas alternas, como las que conectan vía Cuenca Gualaceo Chordoleg Sigsig San Bartolomé y la ruta Gualaceo San Juan de Cid, San Bartolomé (Gobierno Autónomo Descentralizado, 2024). La superficie parroquial se sitúa en el orden de 36 a 37 km² (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de San Bartolomé, 2024)

La parroquia dispone de cuatro vías de acceso, siendo la principal el anillo vial Valle Santa Ana Bella Unión, que conecta con el cantón Cuenca y facilita el desplazamiento de personas y productos hacia los principales centros poblados de la provincia.

La parroquia San Bartolomé, de carácter rural, pertenece al cantón Sígfig, provincia del Azuay, ubicada en la región interandina sur del Ecuador. Su territorio presenta un relieve montañoso típico de los Andes australes, con laderas, quebradas y valles que condicionan el uso del suelo y la dinámica hidrológica local. Limita al norte con las parroquias San Juan y Zhidmad (cantón Gualaceo) y Santa Ana (cantón Cuenca); al sur con Ludo; al este con Sígfig; y al oeste con Quingeo (cantón Cuenca).

Dentro de la parroquia se ubica la relavera minera abandonada, remanente de antiguos proyectos extractivos, que representa un riesgo ambiental potencial para áreas agrícolas y asentamientos cercanos. Este sitio se encuentra en la Zona 17S UTM, con coordenadas Este 737852m y Norte 9667253 m, y se conecta mediante una vía de primer orden, lo que facilita el acceso y transporte en la zona.

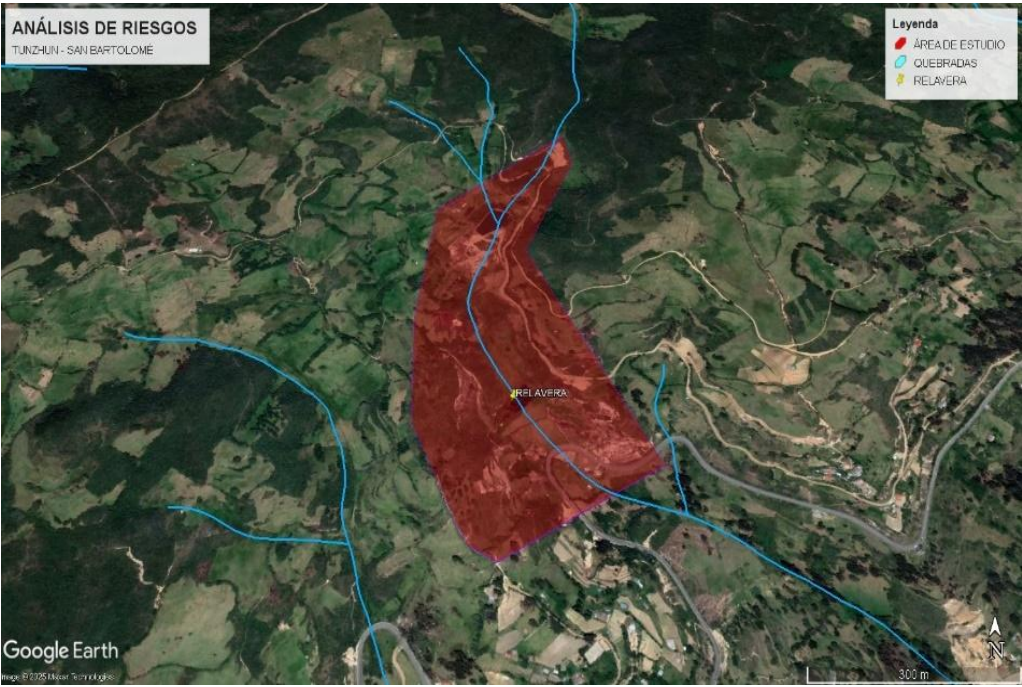
Figura 9. *Mapa Parroquial San Bartolomé*



Fuente: Elaboración propia, 2025 - IGM Geo Portal Ecuador QGIS

El área de estudio se ubica en la cabecera parroquial, donde se ha identificado la presencia de una relavera en condiciones de abandono. Esta zona comprende las coordenadas geográficas correspondientes a cada polígono delimitado.

Figura 10. Área de estudio Sector Tunzhun de San Bartolomé



Fuente. Elaboración propia, 2025 - Google Earth Pro
A continuación, se presentan las siguientes coordenadas

Tabla 1

Coordenadas.

VÉRTICES		
ID	Coordenadas UTM / WGS 84 Zona 17S	
	Este	Norte
1	737672,764	9666983,248
2	737672,764	9667882,920
3	738101,310	9667882,920
4	738101,310	9666983,248

Fuente: Elaboración propia, 2025

2.4.2. Geología.

La parroquia San Bartolomé, en el cantón Sígsig (provincia del Azuay), está ubicada en las estribaciones de la cordillera Sur Oriental de los Andes ecuatorianos, hacia el este de la provincia. Su terreno es bastante accidentado, con muchas fracturas, algo

típico en esta parte de los Andes, donde la placa de Nazca incide por debajo de la Sudamericana (Este proceso sigue ocurriendo desde hace millones de años). Todo este movimiento ha dado forma a la región, afectando tanto la actividad volcánica como las estructuras geológicas. (Gobierno Autónomo Descentralizado del Sígsig, 2025)

Ya en lo local, el área de San Bartolomé muestra una mezcla compleja de rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas. Algunas de las formaciones más reconocidas pertenecen a los grupos Paute, Azogues y Ayancay con nombres como Yunguilla, Biblián, Loyola, Mangan, Santa Rosa y otros. También hay depósitos más recientes, de origen cuaternario. Varias investigaciones y tesis han detectado capas de tobas (algunas finas, otras más gruesas), brechas volcánicas y lavas andesíticas-dacíticas. Estas rocas están relacionadas con un tipo de vulcanismo típico de zonas donde las placas chocan, como en este caso.

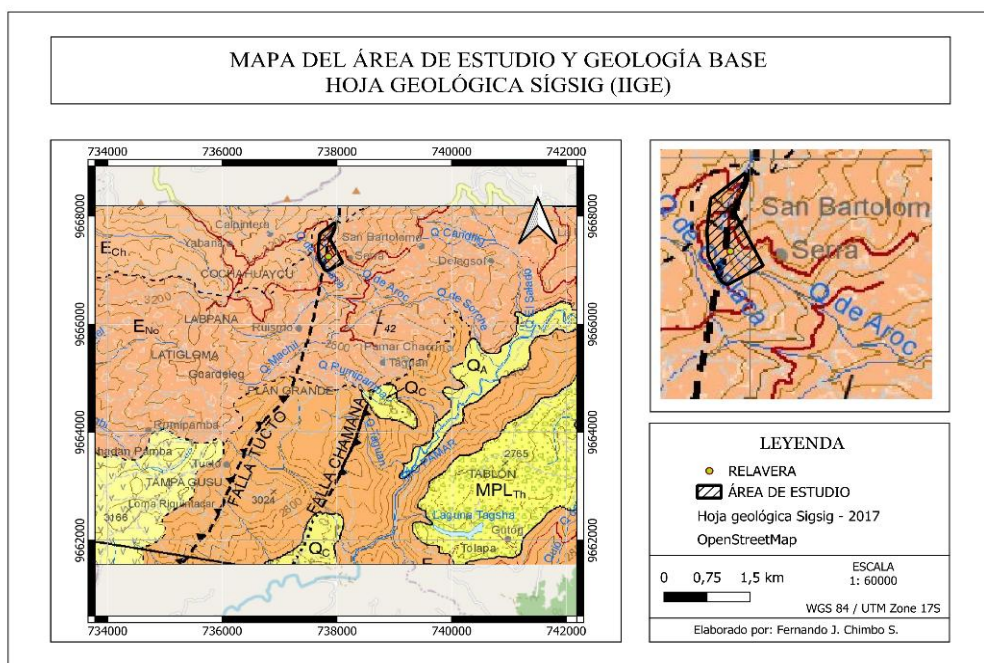
La geología del lugar, dominada por rocas volcánicas fracturadas y sedimentos sueltos (coluviales y aluviales), tiene una gran influencia en los suelos actuales. Estos materiales afectan la estabilidad de las laderas, y también los procesos de erosión, escorrentía y acumulación de sedimentos. En el contexto más amplio de la provincia del Azuay (especialmente en zonas como Cuenca), hay estudios que señalan una alta tendencia a los deslizamientos, especialmente donde hay pendientes fuertes y materiales volcánicos poco consolidados. Esto aplica también para San Bartolomé, dado que comparte esas mismas características.

2.4.3. Geología Local

El área de estudio, localizada en el sector Tunzhun de la parroquia San Bartolomé, cantón Sígsig, forma parte del flanco oriental de la Cordillera Real, dentro de la cuenca alta del río Paute. Esta región se caracteriza por un basamento compuesto por unidades

volcánicas del Eoceno, donde predominan depósitos piroclásticos, brechas volcánicas y lavas andesíticas que han sido ampliamente documentadas en la cartografía oficial del Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico (Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico, 2017). La dinámica geológica de este sector, sumada a la presencia de estructuras tectónicas activas como la Falla Tucto, condiciona de manera significativa la estabilidad física del terreno y constituye un factor crítico en el análisis de riesgos asociados a la relavera minera abandonada presente en Tunzhun.

Figura 11. Georreferenciación - Geología base del área de estudio



Fuente: Elaboración propia, 2025 - Hoja geológica Sigsig

Geología Base: Unidad Nonadel (Eno) y su composición

De acuerdo con el Mapa Geológico Sigsig 1:100 000 (INIGEMM, 2017) gran parte del sitio de estudio se emplaza sobre la Unidad Nonadel (ENo), una secuencia predominantemente piroclástica caracterizada por depósitos fragmentarios derivados de

antiguas erupciones explosivas. Esta unidad presenta una notable heterogeneidad litológica, integrada por brechas piroclásticas, brechas tobáceas, tobas de cristales, areniscas volcánicas y flujos andesítico–basálticos, cuyos comportamientos mecánicos y niveles de alteración representan un factor determinante para la susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Las brechas piroclásticas corresponden a rocas volcánicas formadas por clastos angulosos de diverso tamaño eyectados durante erupciones explosivas, cementados parcialmente en una matriz de ceniza consolidada. Su pobre cohesión interna y la distribución irregular de fragmentos generan zonas de alta permeabilidad e inestabilidad (Cas, Giordano, & Wright, 2008) Las brechas tobáceas, por su parte, incorporan fragmentos volcánicos dentro de una matriz tobácea de ceniza fina, manteniendo igualmente una estructura débil frente a procesos de erosión y saturación.

Las tobas de cristales representan depósitos de ceniza consolidada con alta concentración de cristales individuales, como feldespatos, cuarzo o piroxenos, que reflejan episodios eruptivos de alta energía. Debido a su bajo grado de cementación, estas tobas tienden a erosionarse y perder resistencia cuando incrementa su contenido de humedad (Fisher & Schmincke, 2012). En cuanto a las areniscas volcánicas, estas se originan por la deposición de fragmentos derivados del desgaste de materiales ígneos. Su naturaleza poco consolidada facilita procesos de desagregación, socavamiento y colapso superficial.

Finalmente, los flujos andesítico–basálticos se relacionan con episodios efusivos que generaron lavas de composición intermedia a básica. Si bien estos flujos presentan una mayor competencia mecánica en comparación con los depósitos piroclásticos, suelen estar afectados por fracturamiento y alteración secundaria, lo que permite la infiltración de agua y el debilitamiento progresivo del macizo rocoso (Best, 2003)

La combinación de estos materiales convierte a la Unidad Nonadel en un sustrato geológicamente frágil, con cohesión reducida, alta variabilidad mineralógica y niveles significativos de alteración hidrotermal, factores que aumentan la vulnerabilidad de estructuras superficiales, como la relavera minera abandonada, frente a procesos de erosión, inestabilidad y remoción en masa.

Formación Chinchín (Ech) y su influencia.

Hacia el noroeste del sitio de estudio aflora la Formación Chinchín (Ech), descrita por (Steinmann, 1997) y cartografiada por INIGEMM (2017). Esta formación está compuesta por lavas andesíticas masivas, brechas volcánicas y depósitos intermedios, reflejando episodios efusivos repetidos durante el Eoceno. Aunque la Formación Chinchín no se superpone directamente con la relavera, su proximidad inmediata contribuye al comportamiento estructural general de la región, especialmente debido a la continuidad de lineamientos geológicos, fracturas y variaciones en la competencia de los materiales. Las lavas andesíticas masivas actúan como cuerpos relativamente más competentes, pero su fracturamiento natural favorece la infiltración profunda y el desarrollo de zonas de debilidad en sectores de transición hacia las unidades piroclásticas.

Fallas tectónicas

Una falla geológica se define como una fractura o zona de ruptura en el terreno donde ha ocurrido desplazamiento relativo entre bloques rocosos (Twiss & Moores, 2007). Las fallas tectónicas representan zonas de fracturamiento y cizallamiento en la corteza terrestre donde se concentra la deformación frágil, permitiendo el desplazamiento relativo entre bloques de roca.

Estas estructuras no solo marcan discontinuidades mecánicas de gran contraste reológico, sino que también desempeñan un papel fundamental en la distribución de la

sismicidad cortical. Desde una perspectiva mecánica, su comportamiento está condicionado por factores como la fricción, la presión de poros y el régimen de esfuerzos locales, lo que influye directamente en su modo de activación ya sea mediante rupturas sísmicas o procesos asísmicos (Sibson, 1982).

A escala de zona de falla, se reconoce una arquitectura interna bien diferenciada, compuesta por un núcleo de falla donde se concentra el mayor desplazamiento y una zona de daño adyacente. Esta última se caracteriza por la presencia de redes densas de fracturas, brechas y otras estructuras secundarias, que alteran de forma significativa las propiedades mecánicas e hidrogeológicas del macizo rocoso (Kim & Sanderson, 2004).

Dicha organización estructural tiene implicaciones directas sobre la permeabilidad del terreno, el flujo de fluidos subterráneos y la estabilidad geotécnica de laderas e infraestructuras ubicadas en su entorno. Por ello, la identificación y caracterización detallada de fallas activas o susceptibles de reactivación resulta esencial en estudios de peligro sísmico y en evaluaciones de riesgo geológico aplicadas al diseño y planificación de obras civiles, incluidas las instalaciones mineras como relaveras.

La Falla Tucto y su incidencia en la estabilidad del sector Tunzhun

Su presencia implica un aumento de fracturamiento, pérdida de cohesión, incremento de permeabilidad e inestabilidad mecánica. En el sector Tunzhun, la Falla Tucto, identificada con claridad en el Mapa Geológico Sígsig (INIGEMM, 2017), atraviesa directamente la zona donde se localiza la relavera. Este lineamiento estructural constituye uno de los factores más críticos para la evaluación geotécnica del área.

La interacción entre la Falla Tucto y los materiales piroclásticos de la Unidad Nonadel genera condiciones favorables para infiltraciones profundas, alteración mineralógica y desarrollo de potenciales planos de ruptura. Estas características incrementan el riesgo de deformaciones, asentamientos diferenciales y reactivación de

movimientos de masa, especialmente bajo condiciones de saturación o actividad sísmica local. Para estructuras artificiales como la relavera abandonada, la presencia de esta falla representa un elemento determinante en la evaluación del riesgo físico, ya que puede comprometer la estabilidad del talud, la integridad del depósito y el comportamiento del suelo ante cargas adicionales o vibraciones.

2.4.4. Geodinámica Externa

En el entorno andino de Sígsig (cuenca del río Paute), la geodinámica externa está controlada por pendientes fuertes, meteorización intensa y lluvias estacionales con episodios convectivos, condiciones que favorecen deslizamientos (superficiales y de gran escala), erosión en cárcavas, flujos de detritos e incisión fluvial; la ocurrencia reciente del macro deslizamiento de (Torrijo & Garzón, 2024). En el valle del Paute, la inestabilidad histórica asociada al evento de La Josefina motivó intervenciones de estabilización y un seguimiento prolongado, subrayando el papel crítico del drenaje y del control de escorrentía en laderas y depósitos.

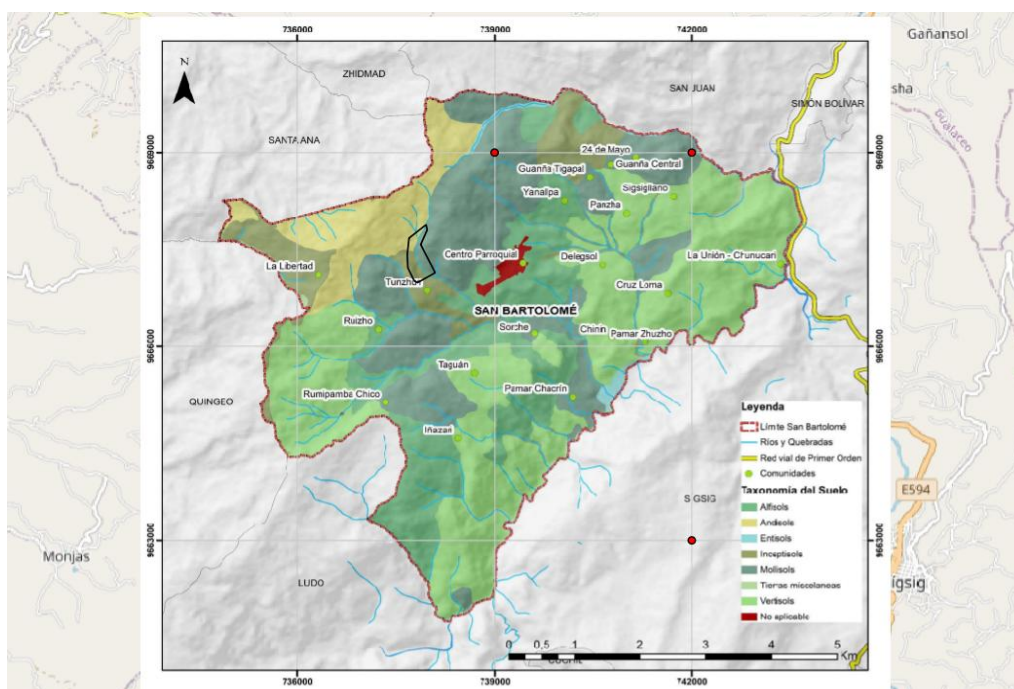
Además, la variabilidad climática vinculada a El Niño Oscilación del Sur (ENSO) intensifica los extremos de precipitación en el Ecuador, elevando la probabilidad de saturación y falla de taludes durante ciertos episodios; este forzante debe incorporarse en la evaluación de amenazas y en el diseño de medidas de manejo (Thielen, Ramoni Perazzi, Puche, & Márquez, 2023).

En conjunto, estos controles exógenos condicionan la estabilidad de taludes antrópicos (p. ej., relaveras), por lo que la gestión del sitio debe priorizar obras de drenaje superficial y subsuperficial, manejo de escorrentía y monitoreo operativo de movimientos en masa y lluvia, en línea con las plataformas nacionales de alerta. (Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos de Ecuador, 2025).

2.4.5. Estudio de los suelos

El área donde se encuentra el antiguo relave minero de San Bartolomé está sobre rocas volcano-sedimentarias que son bastante blandas y se degradan con facilidad, especialmente si hay mucha humedad y pendientes pronunciadas. Investigaciones en la región y en los Andes del sur del país han mostrado que, en estos ambientes húmedos, los sulfuros que quedan en los relaves pueden transformarse y generar drenaje ácido. Este proceso puede movilizar metales, que terminan afectando los ríos y suelos cercanos si no hay medidas de control.

Figura 12. Georreferenciación - Taxonomía de suelos del área de estudio



Fuente: (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de San Bartolomé, 2024) - Elaboración propia, 2025.

De acuerdo con el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) 2024, el mapa cartográfico de taxonomía de suelos identifica que el área de estudio presenta una dominancia del orden Inceptisol, con una extensión aproximada de 332,66 hectáreas, que representan el 9,27 % del territorio parroquial, también predominan molisoles con alta capacidad orgánica. Estos suelos se desarrollan a partir de materiales volcánicos y

presentan una estructura incipiente, moderada fertilidad y una alta sensibilidad a la erosión.

Según la USDA Soil Taxonomy (2014), los Inceptisoles son suelos jóvenes con un desarrollo incipiente del horizonte B, típicos de regiones montañosas húmedas y de topografía pronunciada, donde la formación del suelo está fuertemente limitada por la pendiente y por los procesos de erosión. En Tunzhun, estos Inceptisoles derivan de depósitos volcánicos fracturados y materiales piroclásticos alterados.

Junto a ellos, también encontramos una presencia significativa de Molisoles y un pequeño enclave de Andisoles en la parte norte del polígono. Esta distribución de suelos se asienta sobre una base geológica compuesta principalmente por materiales piroclásticos alterados (pertenecientes a la Unidad Nonadel), brechas y tobas volcánicas con muy poca cohesión. Todo esto da lugar a un sistema suelo-roca altamente erosionable, lo cual influye directamente en la estabilidad de las laderas, especialmente en la zona donde se encuentra una antigua relavera minera.

Tal como lo señala la USDA Soil Taxonomy (2014), son comunes en regiones montañosas y húmedas, donde la meteorización avanza, pero no logra estabilizarse debido a la constante remoción de materiales. Esta combinación los hace propensos a la formación de cárcavas, deslizamientos y arrastre de sedimentos hacia la quebrada Sorche.

Por otro lado, los Molisoles aparecen sobre todo en las zonas central y sur del área de estudio. Aunque se ubican también en laderas con bastante pendiente, muestran una mayor evolución pedogenética. Se reconocen fácilmente por su horizonte superficial oscuro, alto contenido de materia orgánica y una estructura granular bien desarrollada. Tienen una excelente capacidad de intercambio catiónico, lo que les otorga un alto potencial para usos agropecuarios de baja intensidad. No obstante, su localización en zonas de riesgo elevado, junto con lluvias intensas y la presencia de materiales volcánicos

poco consolidados en profundidad, los hace vulnerables a la compactación y a deslizamientos superficiales, sobre todo si se les somete a actividades como el sobrepastoreo, la mecanización o el desbroce de taludes.

En la parte norte se ha identificado un pequeño enclave de Andisoles. Estos suelos provienen de cenizas volcánicas más recientes. Se caracterizan por ser muy porosos, con baja densidad aparente y una notable capacidad para retener agua, gracias a la presencia de alófanos y complejos órgano-minerales.

En síntesis, el sistema de suelos en Tunzhun combina una fertilidad natural relativamente alta con una fragilidad física y geotécnica muy marcada. Esto significa que, si bien es posible aprovechar estos suelos con usos agropecuarios de baja intensidad, cualquier acción que implique remoción de la capa superficial, compactación o pérdida de cobertura vegetal puede acelerar de forma significativa la erosión, los deslizamientos y el transporte de sedimentos con potencial contaminante. Por eso, una caracterización detallada de los Inceptisoles, Molisoles y Andisoles no solo es clave desde el punto de vista edafológico, sino que resulta fundamental para evaluar adecuadamente los riesgos vinculados a la relavera y para diseñar estrategias de manejo territorial que respeten los límites del sistema suelo–paisaje.

2.4.6. Hidrología.

Desde la perspectiva hidrológica, el sector Tunzhun, ubicado en la parroquia San Bartolomé, forma parte de un sistema típico de microcuencas andinas de montaña. Esta región se caracteriza por una notable disponibilidad de agua superficial, acompañada de una red de drenaje densa, conformada por cursos de agua de recorrido corto y pendientes marcadas.

En este contexto, la relavera minera abandonada se sitúa en las cabeceras de la quebrada Sorche un afluente del río Bolo Pamar, lo que implica una conexión directa con el sistema hídrico de la zona y con las áreas agrícolas localizadas aguas abajo.

Las condiciones naturales del área, que combinan pendientes pronunciadas, alta pluviosidad y suelos fácilmente erosionables, favorecen la escorrentía superficial y el arrastre de sedimentos. Esta dinámica configura un escenario sensible, en el cual cualquier inestabilidad del depósito de relaves podría facilitar la movilización de contaminantes hacia los cuerpos de agua y los ecosistemas circundantes. Por tanto, se trata de un aspecto clave dentro del análisis de riesgo ambiental que se plantea en el presente estudio.

A. Patrimonio hídrico

En Ecuador, el patrimonio hídrico comprende el conjunto de aguas superficiales y subterráneas y sus ecosistemas asociados, reconocido por la Constitución como patrimonio nacional estratégico de uso público y ligado al derecho humano al agua, lo que obliga a su protección y gestión para el bien común (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

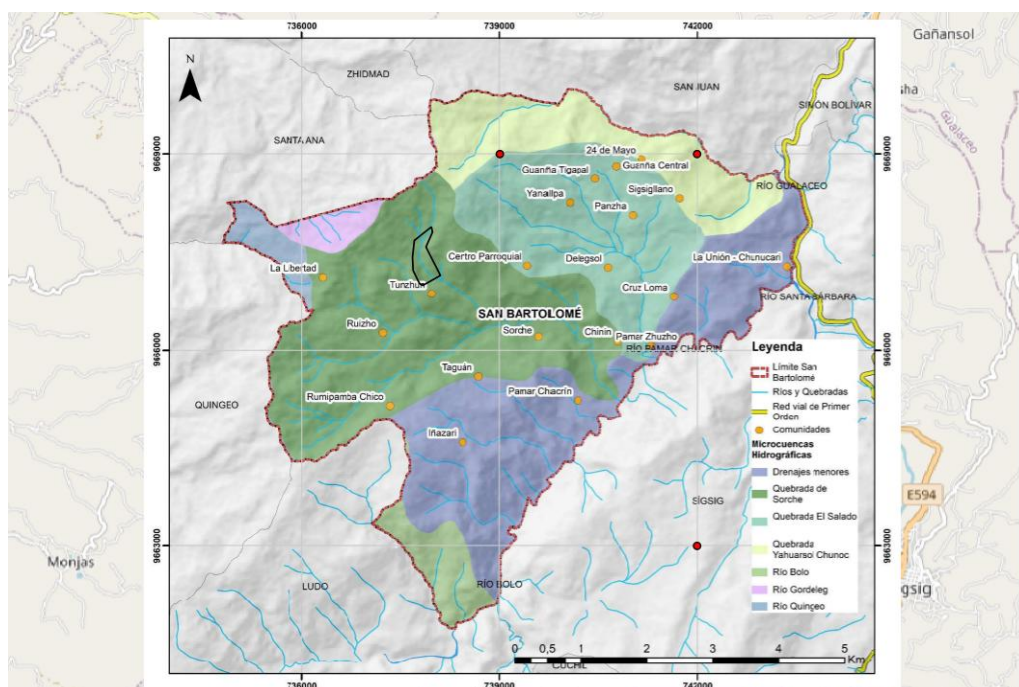
La Ley Orgánica de Recursos Hídricos refuerza que los recursos hídricos son parte del patrimonio natural del Estado y dispone su gestión integrada bajo la Autoridad Única del Agua. Esta protección se instrumenta, entre otros mecanismos, mediante Áreas de Protección Hídrica (APH) que resguardan nacientes y fuentes de abastecimiento para consumo humano. En el plano internacional, la noción de “Patrimonio Hidráulico” resalta que los sistemas y paisajes del agua son bienes culturales cuya conservación y gobernanza aportan lecciones para una gestión hídrica sostenible hoy.

B. Cuencas y microcuencas hidrográficas

La hidrología de los Andes Orientales del Ecuador se caracteriza por la alta disponibilidad de recursos hídricos superficiales, resultado de un régimen pluviométrico abundante y la presencia de relieves montañosos que favorecen la formación de cuencas y microcuencas bien definidas. De acuerdo con la descripción del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2020), esta región forma parte de uno de los principales sistemas hidrográficos andino-amazónicos, donde la precipitación anual supera los 1.000 mm y los drenajes se originan en zonas de alta pendiente, dando lugar a una red densa de quebradas y ríos de corto recorrido, pero con alto poder erosivo y capacidad de transporte de sedimentos.

En este contexto, la parroquia San Bartolomé, perteneciente al cantón Sígig, se encuentra inserta en una red hidrográfica de montaña, caracterizada por la presencia de siete microcuencas que estructuran el sistema de drenaje local. Entre ellas destacan las microcuencas de los ríos Gualaceo Alto, Quingeo Alto y Pamar, siendo esta última la de mayor extensión, ya que delimita el territorio parroquial hacia el este. Además, en el extremo oriental se observa la influencia parcial de la microcuenca del río Santa Bárbara, mientras que las microcuencas de los ríos Gordeleg y Quingeo Alto conforman parte de la subcuenca del río Jadán, dentro de la gran cuenca del río Santa Bárbara (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de San Bartolomé, 2024)

Figura 13. Georreferenciación - Mapa de Patrimonio hídrico del área de estudio



Fuente: (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de San Bartolomé, 2024) - Elaboración propia, 2025.

El principal recurso hídrico de la parroquia corresponde al río Bolo Pamar, que discurre por la zona baja del territorio, aportando caudal a los sectores agrícolas más cercanos a su ribera. No obstante, las zonas altas, donde se localiza el antiguo depósito de relaves mineros, se encuentran dentro del ámbito de la Quebrada Sorche, la cual ocupa aproximadamente 1.236,95 hectáreas, equivalentes al 34,48 % del territorio parroquial. Esta quebrada actúa como un colector natural de escorrentías superficiales, por lo que constituye un elemento clave en la evaluación del riesgo ambiental asociado al arrastre de materiales potencialmente contaminantes provenientes del área del relave.

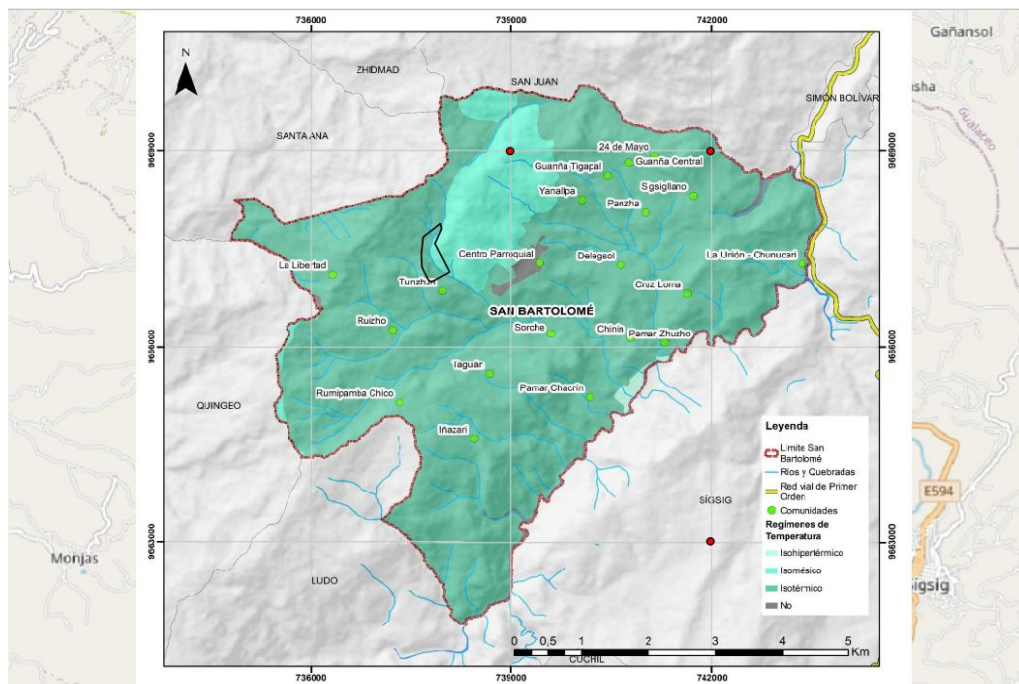
C. Temperatura y Clima.

El sistema climático de los Andes Orientales del Ecuador se caracteriza por un marcado gradiente térmico altitudinal, donde la temperatura disminuye aproximadamente entre 0,5 y 0,7 °C por cada 100 m de incremento en la altitud (Instituto Nacional de

Meteorología e Hidrología, 2020). Este comportamiento está influenciado por la topografía montañosa, la orientación de los valles y la presencia de masas de aire húmedo provenientes de la Amazonía. Como resultado, el régimen térmico en la región presenta condiciones estables a lo largo del año, sin variaciones estacionales significativas, propias de los climas tropicales de montaña.

De acuerdo con la clasificación térmica establecida por el Sistema Único de Información Ambiental (SUIA) y los estudios del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE, 2020), en la parroquia San Bartolomé se identifican tres regímenes de temperatura: isotérmico, isomésico e isohipertermal. El régimen isotérmico predomina en el 88,15 % del territorio parroquial, concentrando la mayor parte de los asentamientos humanos.

Figura 14. Georreferenciación - Regímenes de temperatura del área de estudio



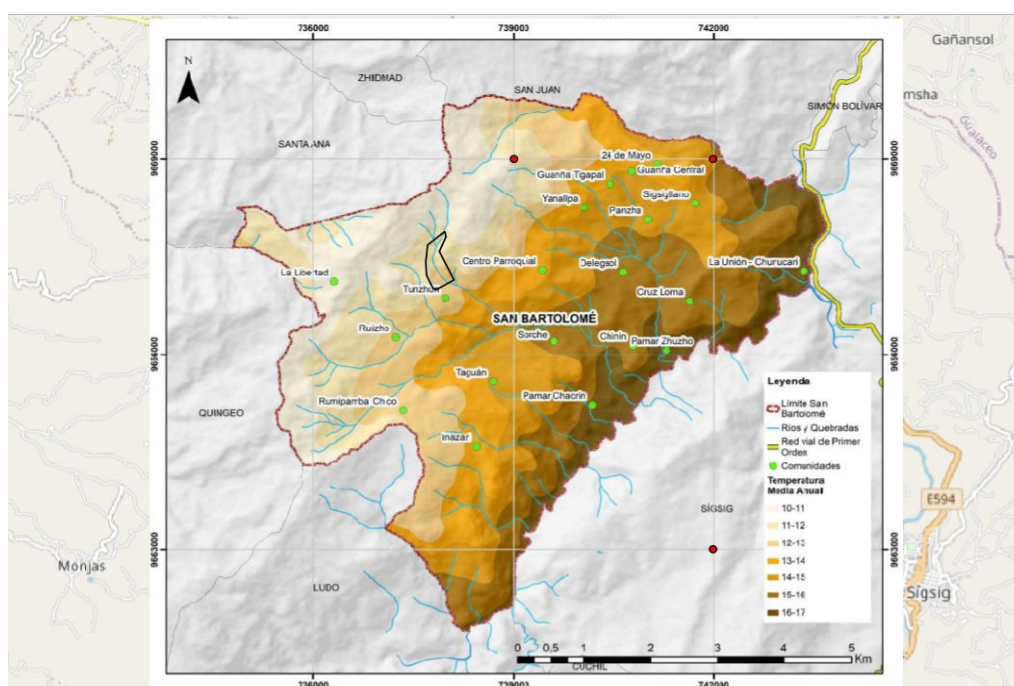
Fuente: (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de San Bartolomé, 2024) - Elaboración propia, 2025.

El término *isotérmico* hace referencia a un régimen térmico con escasa variación anual de temperatura, donde la diferencia entre los meses más cálidos y fríos es menor a 5 °C. Según la USDA Soil Taxonomy (2014), *“los regímenes isotérmicos son característicos de zonas tropicales altas, donde las temperaturas del suelo permanecen relativamente constantes a lo largo del año, con promedios entre 15 °C y 22 °C”*. En estos ambientes, la estabilidad térmica favorece el desarrollo de ecosistemas húmedos y la actividad biológica del suelo.

Para el cantón Sígsig, las temperaturas históricas (1981 - 2015) oscilan entre 8,1 °C y 16 °C, observándose un ligero incremento térmico en las proyecciones de cambio climático bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, con anomalías promedio entre 0,5 °C y 1 °C.

En la zona de estudio (Tunzhun), localizada dentro del régimen isotérmico, las temperaturas promedio se sitúan entre 12 °C y 13 °C, condiciones típicas de las estribaciones interandinas húmedas. Esta estabilidad térmica, combinada con una topografía de pendientes medias, favorece la infiltración y recarga hídrica, aunque también puede incidir en la persistencia de humedad en los materiales del depósito de relaves, aspecto relevante en la evaluación del riesgo ambiental.

Figura 15. Georreferenciación - Temperatura del área de estudio



Fuente: (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de San Bartolomé, 2024) - Elaboración propia, 2025.

2.4.7. Amenazas.

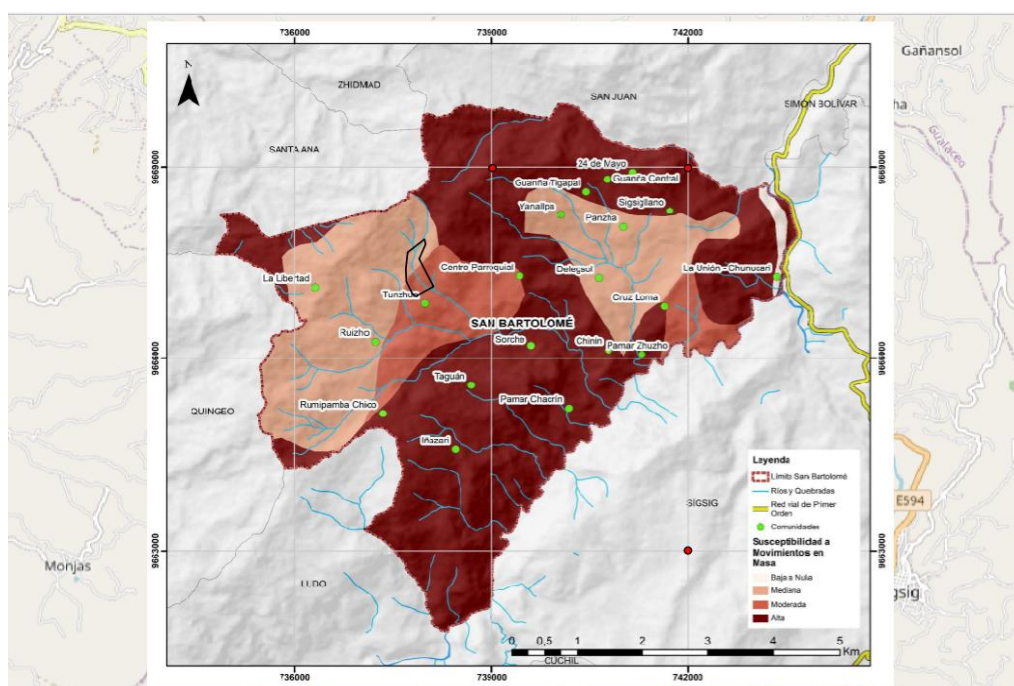
San Bartolomé presenta una alta susceptibilidad a deslizamientos y movimientos de masa, resultado de su topografía abrupta, su composición geológica reciente y las condiciones climáticas húmedas propias de los Andes Orientales. De acuerdo con la Secretaría de Gestión de Riesgos del Ecuador (Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos de Ecuador, 2025), el territorio parroquial se clasifica en cuatro niveles de susceptibilidad: baja (0,67%), media (27,58%), moderada (10,01%) y alta (61,74%), abarcando la totalidad de su superficie. Esta distribución evidencia que más del 70% del territorio presenta condiciones potencialmente inestables, lo que convierte a los deslizamientos en una de las amenazas naturales más relevantes para la parroquia.

El comportamiento de los movimientos de masa en la zona está directamente relacionado con la geología local, compuesta principalmente por rocas volcánicas fracturadas, materiales coluviales y arcillas meteorizadas, los cuales presentan baja

cohesión y alta plasticidad. Estas características facilitan la inestabilidad de laderas, especialmente durante periodos de lluvia intensa o saturación prolongada del suelo.

A los factores geológicos se suman causas antrópicas que incrementan la vulnerabilidad del territorio, como la deforestación, la expansión agrícola y ganadera sobre pendientes, el mal manejo del suelo, la falta de drenaje superficial adecuado, y la apertura de caminos rurales sin criterios de estabilidad. Según la SGR (2023), estos procesos han generado un deterioro progresivo de la cobertura vegetal, reduciendo la capacidad del suelo para absorber y regular la escorrentía superficial.

Figura 16. Georreferenciación - Amenaza por movimiento de masa del área de estudio



Fuente: (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de San Bartolomé, 2024) - Elaboración propia, 2025.

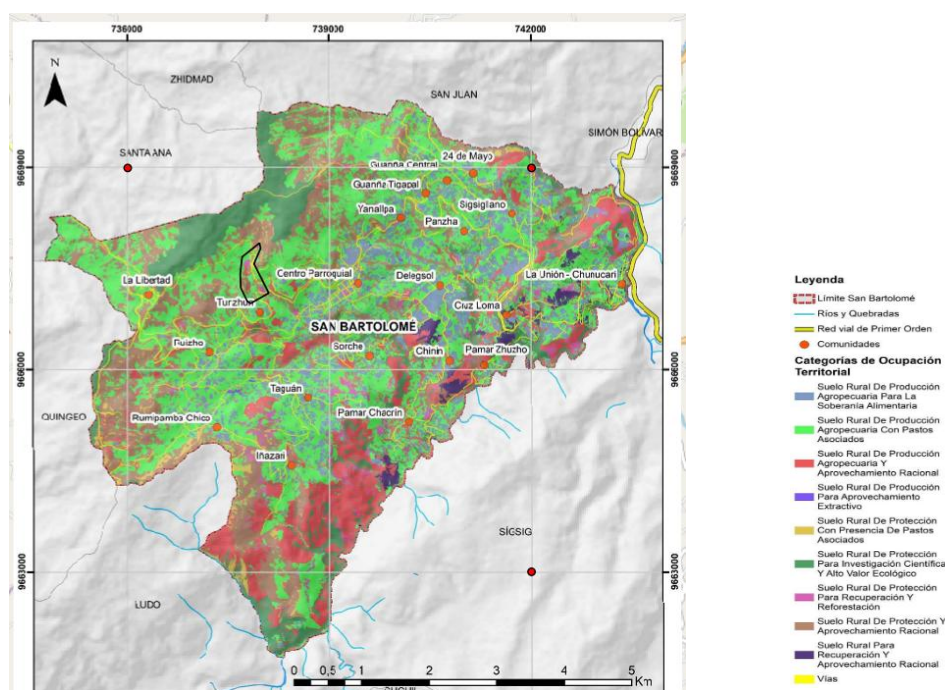
La zona de estudio (Tunzhun) se encuentra clasificada dentro de un nivel de susceptibilidad moderado a movimientos de masa. Esta condición se explica por su ubicación en laderas de pendiente media, compuestas por materiales arcillosos y depósitos coluviales, los cuales tienden a perder estabilidad bajo condiciones de

saturación. Dicha característica constituye un factor determinante para el análisis de riesgo ambiental asociado al depósito de relaves mineros abandonado, donde la alteración de la estructura del suelo podría favorecer procesos de erosión o deslizamiento local.

2.5. Ocupación Territorial.

Según la información publicada por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Sígsig, las categorías de ocupación del suelo se establecen mediante Polígonos de Intervención Territorial que clasifican el espacio parroquial según su vocación productiva, ecológica y de protección. La cartografía del PDOT evidencia una distribución heterogénea del territorio, con un claro predominio de actividades agropecuarias.

Figura 17. Georreferenciación - Ocupación territorial del área de estudio



Fuente: (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de San Bartolomé, 2024) - Elaboración propia, 2025.

Entre las categorías establecidas, destaca el Suelo Rural de Producción Agropecuaria con Pastos Asociados, que representa la mayor superficie de la parroquia con 1404,21 ha, equivalentes al 39,15 % del territorio. Esta amplia extensión confirma la

importancia de los pastizales como base productiva local. En segundo lugar, se ubica el Suelo Rural de Protección para Investigación Científica y Alto Valor Ecológico, el cual comprende 366,85 ha (10,23 %), destinado a la conservación de ecosistemas con valor ambiental estratégico.

Le siguen otras categorías relevantes como el Suelo Rural de Producción Agropecuaria y Aprovechamiento Racional, que abarca 426,55 ha (11,89 %), y el Suelo Rural de Producción Agropecuaria para la Soberanía Alimentaria, con 362,05 ha (10,09 %). Asimismo, el Suelo Rural de Protección para Recuperación y Reforestación cubre 144,69 ha (4,03 %), mientras que otras categorías, como el Suelo Rural de Protección con Presencia de Pastos Asociados (82,53 ha; 2,30 %) y el Suelo Rural de Producción para Aprovechamiento Extractivo (2,20 ha; 0,06 %), representan proporciones menores del territorio (Gobierno Autónomo Descentralizado del Síg sig, 2025).

En conjunto, esta configuración demuestra que San Bartolomé es una parroquia predominantemente rural, donde la producción agropecuaria y la conservación ambiental conforman los usos del suelo más extendidos. La zonificación permite orientar el manejo territorial hacia actividades compatibles con la capacidad del ecosistema, integrando producción, protección y recuperación de áreas estratégicas.

En el caso específico de esta investigación, el sector Tunzhun, donde se localiza el área de estudio, se encuentra clasificado dentro de la categoría Suelo Rural de Producción Agropecuaria con Pastos Asociados, la más representativa de toda la parroquia.

2.5.1. Actividad minera en San Bartolomé.

La explotación en San Bartolomé (Parroquia Síg sig) comenzó en 1976 con el ingreso de la compañía FILIPINA BENGUET CORP. Para ello, se establecieron

instalaciones claves, como oficinas administrativas, laboratorios de análisis de minerales y áreas de atención, además de un campamento para el personal. El objeto principal de la compañía era la extracción y beneficio de yacimientos del mineral plata (Ag).

La creación de empleos mostró el alcance del proyecto, pues se estima que más de 300 individuos participarán en las operaciones, distribuidos en dos turnos continuos, uno diurno y otro nocturno; esto es una muestra del tamaño y la rapidez de la creación de empleos mostró el alcance del proyecto, esto es una muestra del tamaño y la rapidez de las actividades. Esta salida abrupta dejó campamentos desiertos, instalaciones industriales inactivas y, sobre todo, una relavera sin las medidas adecuadas de gestión ni cierre técnico, convirtiéndola en un pasivo ambiental de alta preocupación (Mora & Reiban, 2024).

Figura 18. *Instalaciones abandonadas de la mina San Bartolomé*



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Las parroquias de San Bartolomé y Santa Ana enfrentaron problemas relacionados con la disponibilidad de agua para consumo humano. En 1978, se emprendió una gestión comunitaria que logró, de manera parcial, abastecer del recurso hídrico a

aproximadamente 1.000 habitantes (alrededor de 165 familias), a través de una captación inicial ubicada en la parroquia Santa Ana. Con el tiempo, otros sistemas de agua potable en San Bartolomé comenzaron a utilizar esta misma fuente.

Paralelamente, la región experimentó una deforestación significativa, agravada por una actividad minera subterránea intensiva, llevada a cabo mediante túneles excavados en territorio de San Bartolomé. Según testimonios de trabajadores de la zona, dichas excavaciones extendieron los límites de la mina Armenonic, alcanzando incluso los sectores de Cuncay o Sigsigcocha, dentro de Santa Ana. Estas áreas coinciden con los principales cursos de agua de la parroquia y las vertientes del río Gordeleg (Nieto, 2022)

La experiencia minera en San Bartolomé refleja un patrón recurrente en el contexto nacional: proyectos extractivos que, inicialmente presentados como motores de desarrollo económico y generación de empleo, terminan generando impactos ambientales y sociales de largo plazo tras el cese de sus operaciones. En este caso, el legado de la actividad minera no se limita a la presencia de estructuras físicas abandonadas, sino que incluye un relave que representa un riesgo latente tanto para la comunidad como para el entorno natural. Este pasivo ambiental ejerce una presión creciente sobre la calidad del ecosistema local y compromete la seguridad y el bienestar de las poblaciones cercanas (Aldaz, 2024).

Figura 19. *Instalaciones de la mina San Bartolomé*



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Según el Diario El Comercio (2012), la antigua operación minera localizada en la parroquia San Bartolomé se encuentra aproximadamente a una hora de distancia de la ciudad de Cuenca. El acceso vial de primer orden hacia la zona presenta pendientes pronunciadas. Al final del trayecto, es posible observar edificaciones abandonadas voluminosas construcciones de color blanco hechas en bloque que habrían funcionado como oficinas administrativas, comedor y laboratorios durante la etapa operativa del proyecto.

La concesión minera fue inicialmente explotada por la empresa filipina **BENGUET CORPORATION** hacia 1976 y, posteriormente, por la compañía canadiense **ARMENONIC** a partir de 1992, ambas centradas en la extracción de plata. Sin embargo, ambas operaciones cesaron con el tiempo, dejando el complejo en completo abandono.

En la actualidad, las instalaciones muestran un deterioro estructural generalizado. Se observan túneles cubiertos por vegetación, colapso de entibados de madera, restos de estructuras de hormigón y chatarra metálica correspondiente a antiguos equipos. Además, se evidencian suelos húmedos con tonalidades anaranjadas y presencia de grietas superficiales, lo que podría estar asociado a procesos de oxidación de minerales o afectación ambiental. Durante su fase activa, Armenonic llegó a emplear aproximadamente a 300 trabajadores provenientes de comunidades cercanas (Diario El Comercio, 2012).

En 1993, la empresa minera Armenonic se declaró en quiebra, dejando inconclusos los trabajos en la mina San Bartolomé. De forma inmediata, el Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias realizó un análisis del agua presente en el sitio. El estudio reveló una coloración plomiza plateada, altos niveles de contaminación por desechos industriales y la ausencia de un sistema adecuado para el tratamiento de aguas residuales. Como consecuencia, se generaron pasivos ambientales significativos que afectaron tanto a la biodiversidad local como a los habitantes de la zona. Cabe destacar que la empresa no implementó un plan de remediación ambiental para mitigar los impactos ocasionados (Diario El Comercio, 2012)

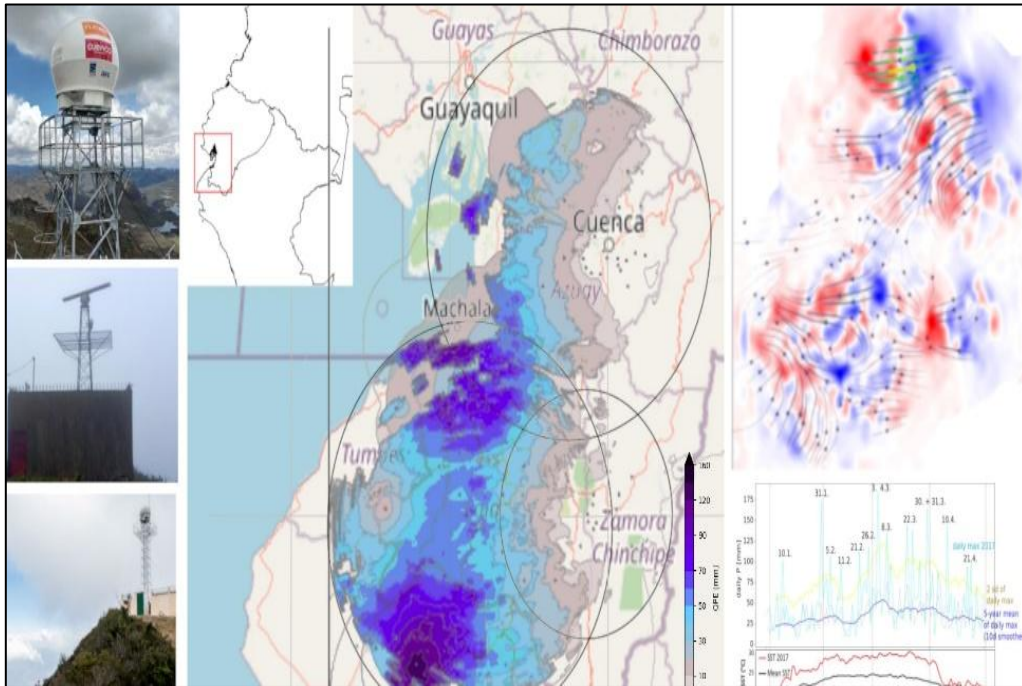
2.5.2. Fundamentos del sensoramiento remoto

El sensoramiento remoto es, básicamente, una forma de obtener información de la superficie terrestre sin tener que estar ahí físicamente. En vez de tocar o medir directamente, se usan sensores que capturan la energía que los objetos reflejan o emiten, dentro de este campo, hay dos tipos de sensores principales:

Activos, como el LiDAR o el radar SAR, que generan su propia señal y luego miden lo que regresa.

Para saber qué tan útil es un dato remoto, se consideran varias resoluciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal. Cada una afecta qué tan adecuado es ese dato para cierto tipo de análisis (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015)

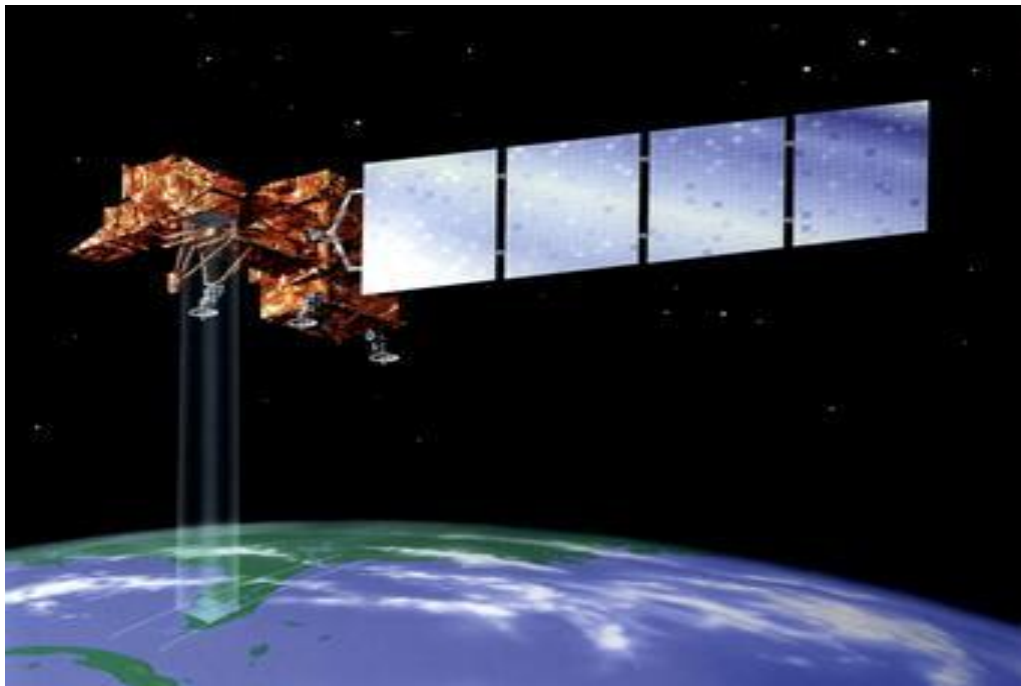
Figura 20. *Productos de radar, campos de viento y series de precipitación*



Adaptado de: Tomado de (Rollenbeck, Orellana, Bendix, & Rodriguez, 2022)

Pasivos, como las cámaras RGB o multiespectrales, que dependen de fuentes externas de energía (usualmente el sol).

Figura 21. *Sensor pasivo ETM+ Satélite LandSat*



Fuente: Adaptado de: (USGS, 2025)

Ahora bien, los drones han revolucionado este campo, sobre todo en áreas como la ingeniería y el monitoreo ambiental. Gracias a ellos, obtener datos de alta resolución se ha vuelto más accesible. Los drones multirrotor son muy útiles cuando se necesita maniobrabilidad o trabajar en espacios pequeños, mientras que los de ala fija cubren áreas más grandes y por más tiempo. Lo interesante es que se pueden equipar con distintas herramientas como cámaras de todo tipo de uso.

CAPITULO III

3. Metodología

El estudio se desarrolla en el sector Tunzhun, parroquia San Bartolomé, en un área de aproximadamente 33,6 hectáreas ubicada a 2.790 m s. n. m. El terreno presenta pendientes marcadas y un relieve irregular que favorecen procesos erosivos, en un entorno donde predomina el uso agropecuario del suelo y la presencia de cuerpos de agua y un reservorio para riego.

En la zona se observan estructuras mineras abandonadas y una relavera en desuso, la cual constituye el principal foco de análisis por su deterioro y su localización en áreas de alta pendiente, factores que incrementan su potencial de inestabilidad.

A poca distancia pasa la vía principal que conecta Cuenca con San Bartolomé, una ruta estratégica para la movilidad local. Su proximidad a zonas susceptibles la convierte en un elemento clave dentro de la vulnerabilidad del área.

3.1. Materiales y métodos empleados

La metodología aplicada en esta investigación se basa en un enfoque integral para el análisis de riesgos, utilizando principalmente herramientas de fotogrametría aérea, teledetección y análisis espacial. Estas técnicas permitirán caracterizar las condiciones actuales de la relavera minera en abandono, así como identificar posibles amenazas, zonas vulnerables y niveles de exposición en su entorno más cercano.

El diseño metodológico prioriza criterios de precisión y coherencia espacial, además de asegurar la reproducibilidad de los resultados. Para ello, se adoptan las recomendaciones técnicas establecidas por la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección, específicamente en lo relacionado con el levantamiento de datos geoespaciales mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV).

3.1. Materiales

3.1.1. Equipos y software utilizados

Tabla 2.

Equipos y software empleados durante el levantamiento y procesamiento fotogramétrico.

Categoría	Descripción
Dron	DJI Mini 3, con cámara RGB (sensor FC3682_6.7, Resolución 4000x2250 px, focal 6.72 mm).
Planificación de vuelo	Aplicación DroneLink, utilizada para automatizar trayectorias de vuelo y controlar el solape entre imágenes capturadas.
Procesamiento fotogramétrico	Pix4Dmapper, utilizado para calibración de imágenes, generación de nube de puntos, MDT/MDS y ortomosaico.
Análisis SIG	QGIS versión 3.40, utilizado para el modelamiento geomorfológico y el análisis de pendiente, curvatura y niveles de riesgo.
Hardware	Laptop con procesador AMD Ryzen 5-7430U 16Gb RAM 256Gb de almacenamiento, pantalla 15.6" FHD, sistema operativo Windows 11 Home W11H.
Sistema de referencia	WGS 84 / UTM zona 17S, con alturas ortométricas sobre el geoide EGM 2008.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

3.1.2. Parámetros técnicos del levantamiento

En la realización del levantamiento fotogramétrico utilizando un dron multirrotor, equipada con una videograbadora. Por otro lado, la planificación del vuelo se realiza mediante una misión automatizada, y todo el procesamiento posterior se llevó a cabo en Pix4Dmapper. A continuación, se detalla los siguientes parámetros.

Tabla 3.*Materiales y métodos empleados*

Parámetro	Valor / Configuración
Área cubierta	0.336 km ² (equivalente a 33.6 ha)
Altura de vuelo	70 metros sobre el nivel del terreno (AGL)
Resolución (GSD)	4.91 centímetros por píxel
Solape frontal / lateral	80 % frontal / 75 % lateral
Número de imágenes	256 fotografías con georreferenciación automática
Densidad nube de puntos	32.6 puntos por metro cúbico
Tiempo total de procesamiento	47 minutos
RMS (X, Y, Z)	0.53 m (X)/ 0.54 m (Y) / 1.95 m (Z)

Fuente: Elaboración propia, 2025.

3.1.3. Sistema de coordenadas y referencia

Los productos geoespaciales se trabajan usando el marco de referencia SIRGAS Ecuador, y se proyectaron en el sistema WGS 84 / UTM zona 17S (EPSG:32717). En cuanto a las alturas, se expresaron como alturas ortométricas, referidas al geoide EGM2008. Esta configuración permite mantener la coherencia hidrológica y se alinea con las normas cartográficas vigentes del IGM (Instituto Geográfico Militar).

3.1.4. Precisión fotogramétrica y validación del MDT

Durante el procesamiento de las imágenes se utiliza el software Pix4Denterprise (versión 4.5.6). En general, se obtuvo un Ground Sampling Distance (GSD) promedio de 4,91 cm/píxel, lo que dio una cobertura total de aproximadamente 0,336 km² (equivalente a unas 33,59 hectáreas) dentro del área de estudio. Todas las imágenes 256 en total fueron calibradas y georreferenciadas con éxito. El error medio de reproyección fue bastante bajo, de solo 0,165 píxeles, lo que indica que el ajuste en bloque fue bastante consistente.

Respecto a la estabilidad geométrica, las incertidumbres relativas en la posición de las cámaras durante el ajuste estuvieron en rangos aceptables: unos 0,12 m en X, 0,28 m en Y, 0,07 m en Z (estos valores corresponden a los promedios). Además, la dispersión fue baja, con una desviación estándar que no superó los 0,17 m. También se calculó el error RMS en la geolocalización de las imágenes, arrojando valores de 0,53 m en X, 0,54 m en Y y 1,95 m en Z. Estos resultados reflejan con bastante claridad la precisión absoluta que se logró con el GNSS a bordo, aunque hay que destacar que no se usaron puntos de control terrestre (GCPs) tridimensionales.

Tanto el Modelo Digital del Terreno (MDT) como el Modelo Digital de Superficie (MDS) se generaron con resoluciones de celda ajustadas al GSD: el DSM con una resolución de aproximadamente 4,91 cm/píxel y el DTM con una resolución cinco veces mayor. Durante este proceso se aplicaron filtros para reducir el ruido y suavizar las superficies.

Luego, se hizo una revisión visual detallada de estos productos apoyándonos en el ortomosaico y en los modelos de sombreado para verificar que los taludes de la relavera fueran continuos, que no aparecieran artefactos sistemáticos, y que las pendientes principales estuvieran correctamente representadas. Bajo estos criterios, se consideró que la calidad del MDT era lo suficientemente buena para los análisis de pendientes, curvaturas y susceptibilidad a movimientos en masa que se abordaron en este estudio. Con estos insumos y herramientas listos, se llevaron a cabo los pasos metodológicos que se explican a continuación.

3.2. Métodos

3.2.1. Enfoque y diseño metodológico

Esta investigación es aplicada, de tipo descriptivo-explicativo, con un diseño no experimental, transversal y enfocado como estudio de caso, específicamente en la relavera Tunzhun San Bartolomé.

Para el desarrollo, se combinaron técnicas como la observación directa, la captura de datos y el procesamiento geoespacial, todo en línea con las recomendaciones de levantamiento fotogramétrico definidas por Pix4D y ASPRS. Estas guías sugieren un solape mínimo del 75 % y una resolución adecuada al objetivo del análisis, aspectos que se respetan durante el proceso.

3.2.2. Fases de la investigación

Fase I. Revisión documental y planificación

- En esta etapa inicial, se realiza una revisión detallada de la documentación existente, incluyendo antecedentes geológicos, hidrológicos y las normativas aplicables al sitio.
- Luego, se procede a delimitar el área de estudio utilizando Google Earth Pro, lo que permitió identificar de forma preliminar los límites y características del terreno.
- También se evalúa los accesos disponibles y posibles obstáculos que podrían afectar el trabajo en campo.
- Finalmente, se diseña el plan de vuelo en la plataforma DroneLink, definiendo parámetros clave como la altura de vuelo, el GSD (Ground Sample Distance), los solapes frontales y laterales, así como las franjas de cobertura necesarias para lograr un levantamiento preciso.

Fase II. Adquisición y procesamiento fotogramétrico

a) Captura de imágenes aéreas:

- El levantamiento se llevó a cabo utilizando un dron DJI Mini 3, operado bajo condiciones climáticas estables y sin presencia de viento, lo que permitió una ejecución segura y eficiente.
- Durante el vuelo, se capturaron un total de 256 imágenes georreferenciadas, abarcando aproximadamente 33,6 hectáreas con una resolución de 4.91 cm/píxel (GSD).
- La georreferenciación se basó exclusivamente en los metadatos GPS del dron, ya que no se utilizaron puntos de control terrestre (GCPs) en esta fase.

b) Procesamiento digital (Pix4Dmapper):

El flujo se desarrolló en tres etapas principales:

1. Calibración y orientación:

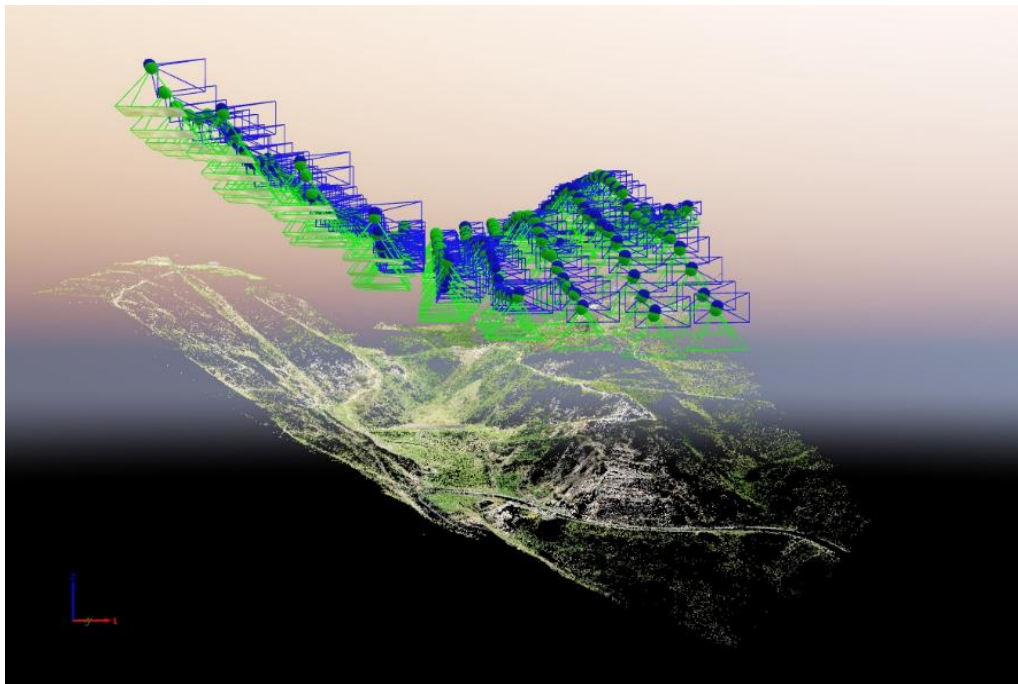
- Se logró calibrar el 100 % de las imágenes (256 de 256).
- El error medio de reproyección fue de 0.165 píxeles, dentro de los márgenes óptimos.
- La diferencia entre los parámetros iniciales y optimizados fue de apenas 0.03 %, lo que refleja un ajuste robusto y confiable del modelo.

2. Nube de puntos y malla 3D:

- Se genera una nube de puntos densa mediante un proceso de densificación multiescala, obteniendo un total de aproximadamente 16,9 millones de puntos, lo que equivale a una densidad media de 32,6 puntos por metro cúbico.
- A partir de esta nube, se construye una malla 3D texturizada en color RGB, que permitió visualizar con gran detalle la morfología del área.

A continuación, se muestra un producto intermedio generado mediante fotogrametría: una nube de puntos dispersa obtenida con Pix4Dmapper. Esta nube refleja con detalle cómo está distribuido el relieve del terreno y las estructuras que se observan en la superficie. Es una representación precisa y útil para entender características visibles del área.

Figura 22. *Nube de puntos dispersa (Sparse Point Cloud)*



Fuente: Elaboración propia, 2025 - Nube de puntos (Pix4Dmapper)

3. Modelos digitales y ortomosaico:

A continuación, se elaboran los productos cartográficos clave:

- Un Modelo Digital de Superficie (MDS) con una resolución equivalente a $1 \times \text{GSD}$ (4,91 cm/píxel).
- Un Modelo Digital del Terreno (MDT) con suavizado, a una resolución de $5 \times \text{GSD}$ (25 cm/píxel).
- Un ortomosaico en formato GeoTIFF, acompañado por su versión en KML, compatible con Google Maps o similar para fácil visualización.

- Generación de curvas de nivel primarias con equidistancia de 10 metros y secundarias a 1 metro, derivadas directamente del MDT
- Finalmente, análisis de pendientes basado en información del MDT.

Fase III. Validación, análisis espacial y modelamiento de riesgo

a) Validación de calidad:

El proyecto muestra una alta consistencia interna:

- En promedio, los valores RMS fueron de 0.53 m en X, 0.54 m en Y y 1.95 m en Z, lo que indica una precisión bastante aceptable.
- Además, el error de reproyección interna fue menor a 0.2 píxeles, cumpliendo con los estándares de precisión establecidos por Pix4D en 2023.

b) Análisis geoespacial (SIG):

Los productos se procesan en QGIS, lo que permite generar varios mapas clave de:

- Pendiente, curvatura del terreno.
- Acumulación de flujo y drenaje.

También se elabora una clasificación de zonas con alta susceptibilidad a deslizamientos, enfocándose especialmente en aquellas con pendientes mayores a 30°. Para este estudio se utilizó la clasificación de pendientes de **(FAO, 2006)** la cual contempla ocho rangos fisiográficos expresados en porcentaje. Estos valores fueron convertidos a grados y posteriormente agrupados en cuatro clases simplificadas (baja, media, alta y muy alta) con el fin de facilitar el análisis de susceptibilidad.

Tabla 4

Clasificación de pendiente.

<i>Clase de pendiente</i>	<i>Rango en grados (°)</i>	<i>Correspondencia con FAO</i>
Baja	$\leq 5.71^\circ$	0–10 % (plano a moderado)
Media	$5.71^\circ - 16.70^\circ$	10–30 % (moderadamente inclinado a inclinado)
Alta	$16.70^\circ - 30.96^\circ$	30–60 % (fuertemente inclinado)
Muy alta	$> 30.96^\circ$	>60 % (muy escarpado)

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Con el análisis espacial realizado en SIG, se produjeron capas como pendiente, curvatura y flujo de agua, que ayudan a identificar zonas donde se concentra la escorrentía y áreas potencialmente inestables.

Todos estos insumos se combinarán para construir un mapa de amenaza y vulnerabilidad específico para la zona de la relavera Tunzhun de San Bartolomé.

c) Evaluación de amenazas y vulnerabilidad

La evaluación del riesgo se realiza siguiendo el Instructivo para elaborar el diagnóstico de riesgos (SIGR-E, 2017), que establece el nivel de riesgo a desastres (NRD), por cada amenaza de origen natural o antrópico.

$$\mathbf{NRD = NEA \times NV}$$

Donde el nivel de riesgo resulta de combinar el Nivel de Exposición a la Amenaza (NEA) con el Nivel de Vulnerabilidad (NV). El NEA se determinó a partir de las condiciones físicas del terreno observadas en el mapa integrado pendiente, procesos erosivos, materiales volcánicos alterados y la influencia de la Falla Tucto, mientras que el NV se asignó según los elementos expuestos presentes en el área, como viviendas, vías, relavera y zonas de uso productivo.

Ambos parámetros se valoran de forma cualitativa y cuantitativa en niveles bajo (1), medio (2) y alto (3). El producto obtenido genera valores entre 1 y 9, reclasificados según la escala oficial del SIGR-E: riesgo bajo (1–2), medio (3–4), alto (6) y muy alto (9). Esta clasificación permite interpretar de manera estandarizada la interacción entre amenaza y vulnerabilidad.

Los valores calculados se organizan en matrices que sintetizan el nivel de riesgo asignado a cada elemento y sector del polígono, constituyendo la base para el diagnóstico técnico del área y para la interpretación final del riesgo por remoción en masa. Estas matrices permiten una lectura integrada del riesgo al combinar los productos generados en SIG con las observaciones realizadas en campo, ofreciendo una caracterización más precisa y contextualizada del comportamiento del terreno.

Fase IV. Validación, análisis espacial y modelamiento de riesgo

La formulación de las estrategias de aprovechamiento y gestión se realizó comparando los niveles de riesgo obtenidos con la ocupación territorial definida por el GAD Municipal del Sígsig y con la taxonomía de suelos del PDOT parroquial de San Bartolomé. Para ello, se identificaron las unidades de suelo presentes en el área de estudio (Inceptisoles, Molisoles y Andisoles) y las categorías de uso establecidas en el PDOT (Suelo Rural de Producción Agropecuaria con Pastos Asociados y Suelo Rural para Aprovechamiento Racional).

El procedimiento consistió en superponer el mapa de la zona de estudio con el mapa de ocupación territorial y el mapa de suelos, con el fin de evaluar la compatibilidad entre el riesgo y la vocación del suelo. Posteriormente, se determinaron los usos permitidos y las restricciones de acuerdo con el nivel de riesgo presente en cada sector.

3.3. Síntesis metodológica

El enfoque metodológico combina varias técnicas: teledetección, fotogrametría con structure-from-motion (SfM) y análisis SIG. El objetivo es crear datos geoespaciales muy detallados y precisos, que sirvan para entender la forma del terreno y hacer un seguimiento en el tiempo (Westoby et al, (2012). Para asegurarse de que la calidad de estos datos sea la adecuada, se sigue lo que dicen los estándares del ASPRS sobre exactitud posicional en la segunda edición.

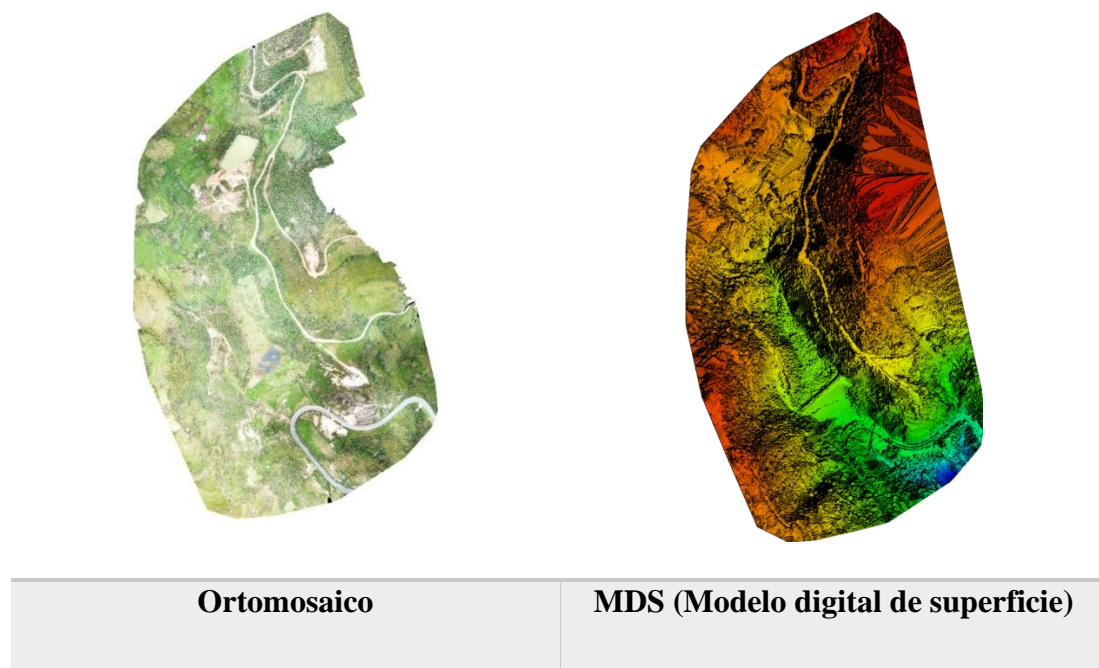
Estos estándares definen diferentes tipos de precisión (horizontal, vertical y tridimensional) y explican cómo medirlos con RMSE. Las versiones más recientes, de 2023 y 2024, han actualizado estas guías y añadido buenas prácticas (Abdullah, 2023). Además, muchos estudios han demostrado que, cuando se combinan productos fotogramétricos con herramientas SIG, se mejora mucho la evaluación de amenazas naturales, sobre todo en zonas complicadas (Van Westen, 2012).

CAPITULO IV

4. Resultados

El presente capítulo integra y analiza los productos fotogramétricos generados para la caracterización del sector Tunzhun, en la parroquia San Bartolomé. A partir del procesamiento de las imágenes capturadas con dron se obtuvieron tres insumos fundamentales: el Ortomosaico fotogramétrico, el Modelo Digital de Superficie (MDS) y el Modelo Digital del Terreno (MDT). Estos productos permiten describir con precisión el estado actual del terreno, su configuración geomorfológica y las alteraciones generadas por la presencia de la relavera minera en abandono.

Figura 23. *Ortomosaico y Modelo digital de superficie MDS*



Fuente: Elaboración propia, 2025 - Reporte (Pix4Dmapper)

El ortomosaico proporciona una representación continua y de alta resolución del área de estudio, facilitando la identificación visual de taludes, cortes, caminos, zonas de erosión y acumulaciones de material. Por su parte, el MDS refleja las elevaciones totales registradas por el sensor incluyendo vegetación, estructuras y micro relieves, lo que permite comprender la rugosidad y variaciones superficiales que influyen en la dinámica

del terreno. A través del filtrado y clasificación de la nube de puntos se obtuvo el MDT, el cual representa exclusivamente la superficie del terreno y constituye la base para los análisis de pendientes, susceptibilidad y estabilidad superficial desarrollados posteriormente.

Es relevante mencionar que las condiciones actuales del área no responden únicamente a procesos naturales. Los patrones observados en el ortomosaico, así como las irregularidades detectadas en el MDS y MDT, evidencian la influencia de intervenciones antrópicas vinculadas a la antigua actividad minera. Diversos estudios señalan que los depósitos de residuos mineros y escombreras pueden presentar condiciones de inestabilidad asociadas a la variación de sus propiedades geotécnicas y a la presencia de agua, lo que incrementa la susceptibilidad a procesos de falla y deslizamiento cuando no se implementan medidas de control adecuadas (Supandi, 2021).

Siguiendo el enfoque metodológico de la Secretaría de Gestión de Riesgos del Ecuador, el análisis parte de la identificación de amenazas y elementos vulnerables, para posteriormente estimar el nivel de riesgo mediante la relación entre amenaza (NEA), vulnerabilidad (NV) y daño esperado. Sobre esta base, el capítulo desarrolla la interpretación de los resultados obtenidos, con el fin de reconocer sectores críticos y aportar insumos técnicos para la gestión territorial y la toma de decisiones en el entorno de la relavera.

4.1. Modelo Digital del Terreno (MDT)

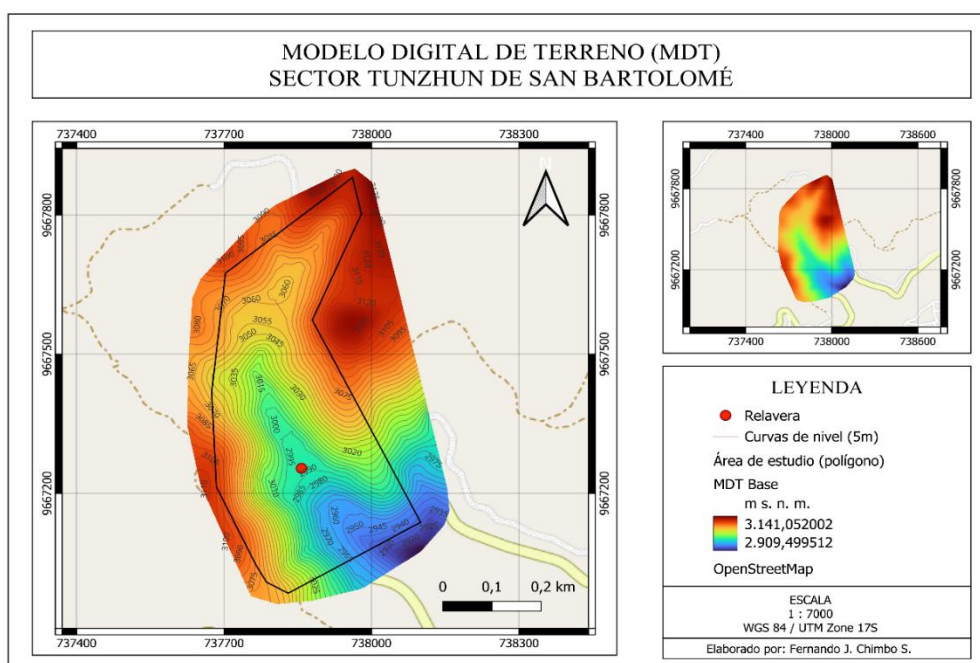
El Modelo Digital del Terreno (MDT), generado a partir de fotogrametría aérea, permitió caracterizar con alta precisión la topografía del sector Tunzhun. Los resultados evidencian un relieve marcadamente accidentado, con laderas de fuerte pendiente, escarpes y micro depresiones que funcionan como zonas de acumulación de escorrentía superficial. En varios tramos del polígono de estudio, las pendientes superan los umbrales

críticos, especialmente en las inmediaciones de la relavera y a lo largo de la vía principal, lo que configura un entorno geomorfológico poco favorable para la estabilidad de los taludes.

Para evaluar la susceptibilidad del terreno, se aplicó la clasificación de pendientes de la FAO, la cual distingue cuatro rangos: baja, media, alta y muy alta. La mayoría del polígono se concentra en las categorías alta y muy alta, en concordancia con los datos derivados del MDT. Este patrón confirma que el relieve constituye un factor condicionante primario en los procesos de inestabilidad. Las pendientes pronunciadas, en combinación con materiales volcánicos alterados y suelos poco desarrollados, aumentan la propensión a la pérdida de equilibrio, especialmente durante episodios de lluvias intensas y saturación hídrica. Estas condiciones favorecen la ocurrencia de procesos de remoción en masa y fenómenos de erosión acelerada.

Desde un enfoque geotécnico, las laderas que sostienen la relavera están compuestas por depósitos piroclásticos alterados, caracterizados por baja cohesión y un elevado grado de meteorización. Esto conlleva una reducción significativa en la resistencia al corte cuando se incrementa el contenido de humedad. Bajo este escenario, la combinación de fuertes pendientes, litologías volcánicas alteradas y suelos jóvenes con alta erodabilidad, sitúa al depósito de relaves en un contexto geotécnico vulnerable. Esta situación incrementa el riesgo de deslizamientos superficiales, erosión regresiva y deterioro progresivo de los taludes de soporte.

Figura 24. *Modelo digital de terreno (MDT)*



Fuente: Elaboración propia, 2025 - QGIS

La configuración topográfica observada es coherente con el sustrato geológico predominante: Unidad Nonadel (ENo). Esta unidad está compuesta por brechas y tobas piroclásticas, areniscas volcánicas y flujos andesítico–basálticos que han experimentado un nivel avanzado de alteración. Estos materiales volcánicos presentan texturas heterogéneas, baja cohesión interna y una marcada susceptibilidad a la meteorización física y química. Cuando se saturan con agua, tienden a desagregarse, reduciendo de forma considerable su resistencia al corte. La composición piroclástica, combinada con una estructura alterada, convierte a esta unidad en un sustrato geotécnicamente débil, susceptible a fenómenos de deslizamientos superficiales, erosión acelerada y desestabilización de taludes.

Sobre este sustrato se desarrollan suelos predominantes del orden Inceptisoles, Molisoles y Andisoles, característicos de zonas andinas sometidas a fuertes procesos erosivos. Los Inceptisoles se distinguen por su escaso desarrollo estructural, textura

variable y limitada cohesión, lo que incrementa su sensibilidad a la erosión en pendientes pronunciadas. Los Molisoles, aunque más fértiles, pueden presentar agregados poco estables cuando se forman sobre material piroclástico meteorizado. Al norte del área de estudio, los Andisoles, derivados de cenizas volcánicas, muestran alta porosidad y capacidad de retención de agua, lo que reduce su resistencia al corte bajo saturación. La combinación de un sustrato piroclástico alterado y suelos inmaduros o altamente porosos crea condiciones propicias para la inestabilidad de las laderas, especialmente durante periodos de intensas precipitaciones.

A este escenario se suma la presencia de la Falla Tucto, cuyo trazo atraviesa directamente el área de estudio. Esta estructura tectónica genera fracturamientos y zonas de debilidad dentro del macizo rocoso, facilitando la infiltración de agua y la pérdida de cohesión interna. La interacción entre la falla, los materiales volcánicos alterados y las pendientes elevadas aumenta la probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa. El MDT confirma, además, que la topografía canaliza las aguas superficiales hacia zonas en las que coinciden pendientes fuertes, materiales inestables y fracturación estructural, condiciones que explican la presencia de múltiples procesos erosivos y de inestabilidad.

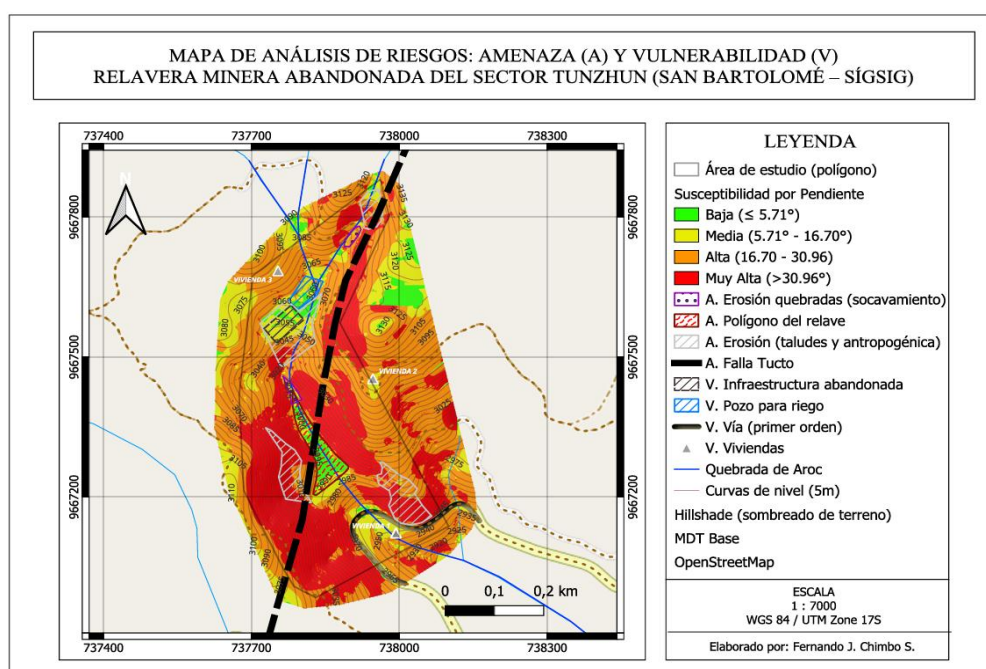
En conjunto, el análisis geomorfológico, geológico y edáfico revela que el sector Tunzhun posee una predisposición intrínseca a la inestabilidad, la cual se manifiesta en la recurrencia de procesos erosivos, deslizamientos superficiales y deformaciones asociadas a taludes naturales y artificiales.

4.2. Mapa integrado de susceptibilidad, amenaza y vulnerabilidad

El mapa desarrollado representa una herramienta clave, ya que reúne en un solo documento la información relacionada con la susceptibilidad del terreno, las amenazas

presentes y los elementos vulnerables. Al integrar estos aspectos, se facilita una comprensión más completa del comportamiento del territorio, entendiendo que no se trata de factores aislados, sino de un sistema interrelacionado. En este sistema, tanto las condiciones físicas del entorno como las actividades humanas interactúan de manera directa, influyendo significativamente en la configuración del riesgo.

Figura 25. Mapa de amenaza y vulnerabilidad



Fuente: IGM - Elaboración propia, 2025 – Instituto Geográfico Militar (IGM) – QGIS.

La evaluación de la susceptibilidad del terreno se realizó conforme a la clasificación de pendientes establecida por la FAO, la cual define cuatro rangos: baja, media, alta y muy alta. En el área de estudio, se observa una concentración significativa en las categorías alta y muy alta, lo que se corresponde con los valores obtenidos a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT). Este hallazgo ratifica que el relieve constituye un factor determinante en la inestabilidad del terreno. Las pendientes marcadas tienden a favorecer la pérdida de estabilidad, especialmente en materiales volcánicos alterados y

suelos jóvenes, cuya cohesión se ve aún más comprometida bajo condiciones de lluvia intensa o saturación hídrica. Estos factores aumentan de forma considerable la probabilidad de desencadenamiento de procesos de remoción en masa.

En cuanto a la susceptibilidad, el análisis basado en el MDT muestra que las clases alta y muy alta se concentran en las laderas donde se localizan la relavera, los taludes de la vía principal y las zonas de uso agropecuario en pendientes pronunciadas. Sobre estas unidades se superponen amenazas claramente identificadas: erosión activa en quebradas, donde la escorrentía superficial socava la base de los taludes y desencadena procesos de erosión regresiva; y erosión en taludes, tanto naturales como antrópicos, asociada a cortes de vías y a antiguas operaciones mineras. La presencia de la Falla Tucto se reconoce como un elemento estructural de primer orden, ya que su trazo coincide con sectores de mayor pendiente y erosión, aportando fracturamiento y facilitando la infiltración de agua, lo que debilita aún más el macizo rocoso y los suelos suprayacentes.

En términos de vulnerabilidad, el mapa permite identificar viviendas asentadas en laderas inestables, tramos de la vía principal que atraviesan corredores de erosión y deslizamientos, infraestructuras mineras en desuso ubicadas sobre taludes degradados y zonas de pastoreo y uso agropecuario situadas en pendientes fuertes. La coincidencia espacial entre áreas de alta y muy alta susceptibilidad, amenazas activas y elementos expuestos críticos indica que la relavera no constituye un foco de riesgo aislado, sino que forma parte de un corredor de inestabilidad que afecta tanto a la infraestructura vial como a la ocupación habitacional y a los usos productivos del suelo en el entorno inmediato.

4.3. Cuantificación del riesgo mediante la matriz (Amenaza × Vulnerabilidad)

La valoración del riesgo se desarrolla aplicando la expresión **Riesgo = Amenaza × Vulnerabilidad**, siguiendo los lineamientos metodológicos del Instructivo para elaborar el diagnóstico de riesgos del SIGR-E (Secretaría de Gestión de Riesgos, s. f.).

Para ello, tanto la amenaza como la vulnerabilidad se clasificaron en niveles bajo (1), medio (2) y alto (3), asignados en función de las características físicas del terreno y de los elementos expuestos identificados en el mapa integrado. Esta asignación permitió construir una matriz de evaluación numérica que constituye la base para determinar el nivel de riesgo.

El producto entre los valores de amenaza y vulnerabilidad generó resultados comprendidos entre 1 y 9, los cuales fueron reclasificados de acuerdo con la escala cromática oficial establecida por el SIGR-E. En esta clasificación, los valores 1 y 2 corresponden a riesgo bajo, 3 y 4 a riesgo medio, 6 a riesgo alto, y 9 a riesgo muy alto, representados mediante los colores verde, amarillo, naranja y rojo, respectivamente. Esta codificación facilita la interpretación visual del riesgo y permite armonizar los resultados con los estándares nacionales.

La construcción de la matriz permitió integrar de manera sistemática los diferentes niveles de amenaza y vulnerabilidad observados en el territorio, generando una representación cuantitativa del riesgo que complementa el análisis cualitativo realizado previamente. Este procedimiento no solo facilita la comparación entre sectores o elementos expuestos, sino que además proporciona un criterio objetivo para priorizar intervenciones y establecer medidas de reducción de riesgo.

Los valores obtenidos para cada sector o elemento se presentan posteriormente en tablas específicas, donde se refleja la clasificación final del riesgo según el rango numérico y el color correspondiente. De esta manera, la matriz actúa como un instrumento de síntesis que traduce información espacial y temática en un diagnóstico coherente, consistente con la metodología del SIGR-E y adecuado para sustentar la toma de decisiones en el área de estudio.

4.4.1 Matriz base de riesgo (SIGR-E)

Esta matriz sintetiza la estructura oficial utilizada por el SIGR-E para establecer el nivel de riesgo a partir de la combinación entre amenaza y vulnerabilidad. Su función es servir como referencia metodológica para interpretar los valores obtenidos en el análisis cuantitativo, permitiendo clasificar el riesgo en rangos comparables a nivel nacional mediante una escala cromática estandarizada.

Tabla 5. Matriz base de riesgo (SIGR-E)

AMENAZA	VULNERABILIDAD		
	Baja (1)	Medio (2)	Alta (3)
Baja (1)	1 – Bajo	2 – Bajo	3 – Medio
Media (2)	2 – Bajo	4 – Medio	6 – Alto
Alta (3)	3 – Medio	6 – Alto	9 – Muy alto

Fuente: Elaboración propia, 2025 – Instructivo para evaluación de riesgos SIGR-E

A partir de esta matriz es posible determinar, de forma objetiva, si un elemento expuesto presenta riesgo bajo, medio, alto o muy alto en función del producto entre los valores asignados a la amenaza y la vulnerabilidad.

4.4.2. Matriz aplicada al área de estudio

Con base en los valores de amenaza identificados en el mapa integrado y en los niveles de vulnerabilidad asignados a cada elemento expuesto, se construyó la matriz aplicada para el área de estudio. Esta matriz constituye una representación cuantitativa del comportamiento del riesgo dentro del polígono, sintetizando en un solo cuadro los resultados numéricos y su equivalente cualitativo según la escala cromática del SIGR-E. Los valores obtenidos reflejan el grado de interacción entre las condiciones físicas del

terreno (pendiente, erosión, geología, suelos y falla) y la sensibilidad de los elementos presentes en el área evaluada.

Nomenclatura

- **NEA:** Nivel de exposición a la amenaza.
- **NV:** Nivel de vulnerabilidad.
- **NRD:** Nivel de riesgos a desastres.

Tabla 6. Matriz aplicada al área de estudio.

ELEMENTO EVALUADO	NEA	NV	NRD	NIVEL
Vivienda 1 (Sur)	3	3	9	Muy alto
Vivienda 2 (Centro)	3	3	9	Muy alto
Vivienda 3 (Norte)	3	3	9	Muy alto
Vía principal	3	3	9	Muy alto
Relavera	3	3	9	Muy alto
Infraestructura de minera en abandono	3	2	6	Alto
Pozo de riego	3	2	4	Medio
Vías secundarias	2	2	4	Medio
Zonas de pastoreo	3	2	6	Medio

Fuente: Elaboración propia, 2025 – Instructivo para evaluación de riesgos SIGR-E

La matriz permite identificar con claridad los puntos críticos que requieren intervención prioritaria y distinguirlos de los elementos con riesgo medio o bajo, facilitando el proceso de toma de decisiones.

4.4.3. Matriz sectorial del polígono.

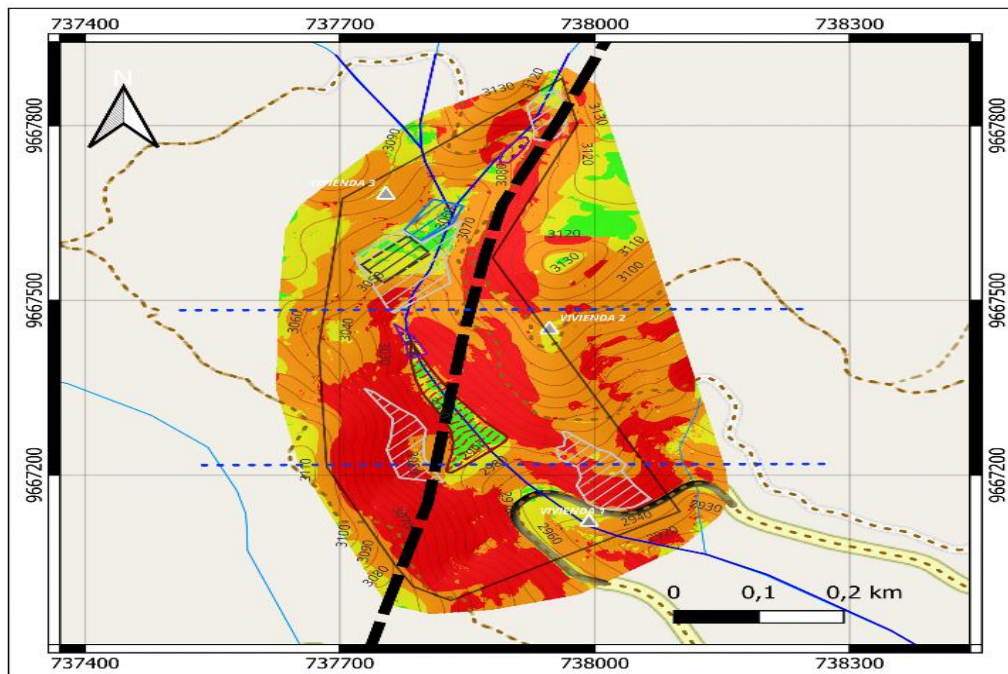
La matriz sectorial complementa el análisis por elementos expuestos al valorar el comportamiento del riesgo de manera integrada en cada zona del polígono. Los sectores

norte, central y sur fueron delimitados considerando su homogeneidad geomorfológica y la distribución espacial de la amenaza.

En la zona norte, el riesgo alto se presenta principalmente en laderas de fuerte pendiente, donde existen viviendas aisladas y caminos secundarios. En cambio, en los sectores central y sur, el nivel de riesgo se eleva a muy alto, especialmente en el área de la relavera y el tramo más empinado de la vía principal. Allí, la presencia de taludes erosionados, cortes en las laderas y una mayor acumulación de escorrentía superficial agravan notablemente las condiciones de inestabilidad.

Los resultados obtenidos muestran que el riesgo predominante en todos los sectores es alto o muy alto, evidenciando que la inestabilidad del terreno no responde a un fenómeno puntual, sino a un patrón territorial continuo y persistente.

Figura 26. *Mapa sectorial del polígono.*



Fuente: IGM - Elaboración propia, 2025 – Instituto Geográfico Militar (IGM) - QGIS

Tabla 7. Matriz sectorial del área de estudio

SECTOR ÁREA DE ESTUDIO	NEA	NV	NRD	NIVEL
Norte	2	3	6	Alto
Centro (Relavera)	3	3	9	Muy alto
Sur	3	3	9	Muy alto

Fuente: Elaboración propia, 2025 – Instructivo para evaluación de riesgos SIGR-E

Este comportamiento se explica por la combinación de pendientes pronunciadas, procesos erosivos activos, suelos jóvenes y materiales volcánicos alterados, junto con la influencia estructural de la Falla Tucto, lo que convierte al área de estudio en un espacio altamente susceptible a eventos de remoción en masa.

Desde una perspectiva geodinámica, las áreas clasificadas con riesgo alto y muy alto coinciden con zonas donde se evidencian procesos como deslizamientos superficiales, erosión regresiva en quebradas, formación de cárcavas y posibles rutas de filtración hacia la quebrada Sorche. En estos sectores, la pendiente acentúa el efecto gravitacional sobre los esfuerzos del terreno, mientras que la presencia de suelos con baja cohesión como los Inceptisoles y materiales piroclásticos alterados limita notablemente la resistencia al corte. A ello se suma la acción erosiva que socava la base de los taludes, y una humedad casi constante, tanto en el depósito de relaves como en las laderas cercanas, lo cual contribuye aún más a disminuir la estabilidad del terreno. La confluencia de estos factores justifica la concentración de niveles de riesgo elevados en el entorno inmediato de la relavera y a lo largo del eje vial principal.

En cuanto a las implicancias territoriales, este corredor de inestabilidad representa una amenaza directa para las viviendas ubicadas aguas abajo del depósito, así como para la vía principal que cumple funciones clave de acceso y evacuación. También

compromete las áreas de uso agropecuario asentadas sobre laderas inestables. Un evento de remoción en masa o una falla parcial del depósito podría cortar el tránsito, aislar a la población de forma temporal, afectar la infraestructura de riego y arrastrar sedimentos con posibles cargas contaminantes hacia la quebrada Sorche y los suelos agrícolas. Este escenario agrava el riesgo sobre los medios de vida de la comunidad, la calidad del recurso hídrico y la funcionalidad ambiental de la microcuenca. Por ello, se refuerza la urgencia de implementar medidas de estabilización y control de drenaje en las zonas identificadas con riesgo alto y muy alto.

4.5. Diagnóstico técnico de riesgos

Este diagnóstico integra de manera articulada la información obtenida del Modelo Digital del Terreno (MDT), el mapa consolidado de susceptibilidad amenaza y vulnerabilidad, así como los resultados del análisis matricial de riesgo bajo el enfoque del SIGR-E. Todo ello se ha interpretado en función de las condiciones físicas y funcionales específicas del sector Tunzhun.

Los resultados señalan que el entorno inmediato de la relavera en estado de abandono conforma un sistema territorial de alta inestabilidad. En este convergen factores geomorfológicos críticos, materiales geológicos de baja resistencia y una notable exposición de elementos sensibles, configurando un escenario estructuralmente frágil.

En el ortomosaico generado a partir de fotogrametría aérea se distingue un cuerpo de agua con forma sub-rectangular. Llama la atención su color azul oscuro, no del todo uniforme, y una mancha ocrácea en el centro que contrasta fuertemente con el entorno. Además, se notan algunas zonas verdosas en los bordes. Esta combinación de colores puede estar asociada tanto a la presencia de compuestos metálicos precipitados como al

crecimiento de biomasa acuática, condiciones que suelen darse cuando hay contaminación o procesos de eutrofización. No se observa, al menos en la imagen, ninguna señal clara de una geomembrana de protección (como bordes visibles, pliegues o anclajes).

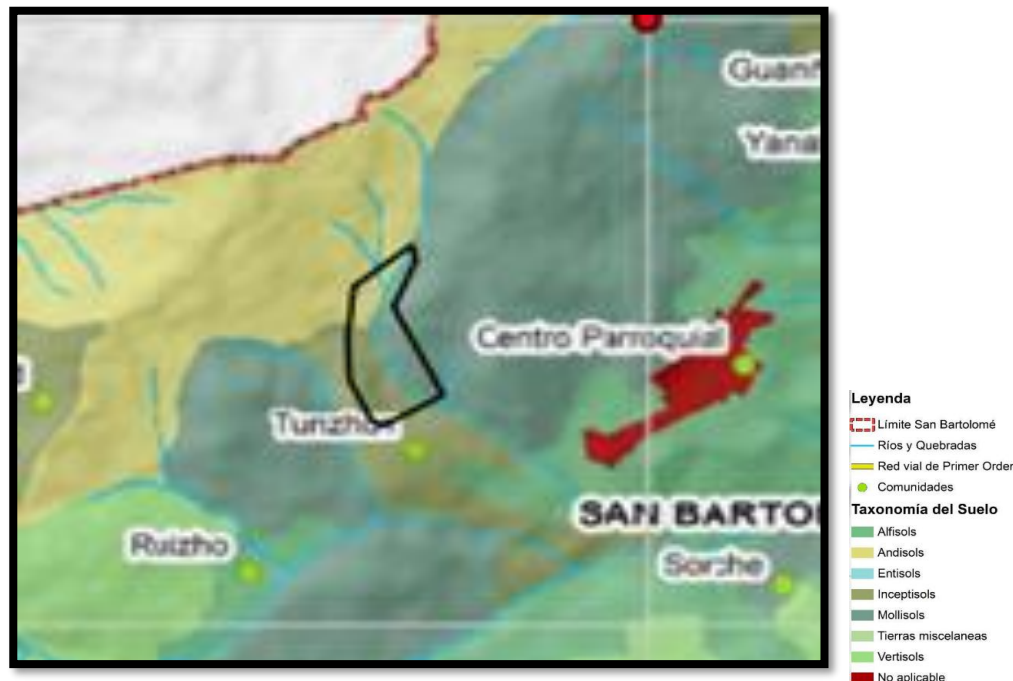
Alrededor del depósito se ven taludes con cortes bastante rectos que modifican la forma natural de la ladera. Estos taludes están expuestos, probablemente porque el proyecto fue abandonado sin llevar a cabo un cierre geotécnico adecuado. En inspecciones de campo y en las imágenes más detalladas se han identificado grietas con aperturas visibles y zonas donde ya empieza a aparecer erosión. Estos indicios apuntan a una posible inestabilidad en los taludes y, en algunos casos, podrían anticipar movimientos de masa.

Desde la perspectiva geomorfológica, el MDT revela predominancia de pendientes clasificadas como altas y muy altas, con inclinaciones superiores a los $16,7^{\circ}$, alcanzando en varios puntos más de $30,9^{\circ}$. Estas pendientes están asociadas a laderas abruptas y escarpes que exceden los umbrales críticos definidos para la estabilidad. Esta condición propicia la aparición de procesos como deslizamientos superficiales, erosión regresiva y socavamiento de microcuencas, con una marcada concentración en las zonas central y sur del polígono, precisamente donde se ubica la relavera sobre un talud degradado, altamente expuesto a la escorrentía.

Geológicamente, el área se sustenta sobre materiales piroclásticos alterados pertenecientes a la Unidad Nonadel, compuestos por brechas y tobas volcánicas de baja cohesión y pobre comportamiento ante la infiltración hídrica. Estos materiales sirven de base a suelos del tipo Inceptisol, de formación joven, alta erosividad y limitada capacidad estructural. En sectores específicos, particularmente hacia el centro y sur, se identifican

Molisoles, suelos más evolucionados y fértiles, mientras que hacia el norte se detecta un enclave menor de Andisoles.

Figura 27. *Taxonomía del suelo en el área de estudio.*



Fuente: Elaboración propia, 2025 – PDOT (GAD San Bartolomé)

A pesar del valor agrícola de estos suelos, su estabilidad geotécnica se ve comprometida por la presencia de la Falla Tucto, la cual incrementa la fracturación del macizo rocoso y agrava la inestabilidad general.

En cuanto a la vulnerabilidad, esta se acentúa por la localización de elementos expuestos sin infraestructura de mitigación. Varias viviendas se sitúan sobre laderas activas o en su cercanía inmediata; la vía principal discurre al pie de taludes inestables, expuesta a escorrentías y arrastre de materiales; y la relavera, abandonada, concentra materiales finos altamente susceptibles a remoción, localizados en un corredor natural de inestabilidad. Si bien algunos suelos presentan condiciones aptas para el pastoreo, su ubicación en zonas de alta amenaza limita su aprovechamiento y representa un reto sustantivo para la planificación territorial.

El análisis cuantitativo, realizado mediante matrices de riesgo, determina que gran parte del polígono se encuentra en categorías de riesgo alto ($R = 6$) y muy alto ($R = 9$). El sector norte se clasifica como de riesgo alto, mientras que las zonas central y sur donde se encuentra la relavera alcanzan el nivel más crítico, como consecuencia de una exposición alta ($NEA = 3$) combinada con una vulnerabilidad también elevada ($NV = 3$). Este patrón de riesgo evidencia una condición sistémica, más que aislada, de inestabilidad territorial, donde convergen geología frágil, suelos erosionables, pendientes extremas y presencia de infraestructura expuesta.

En síntesis, los hallazgos confirman que el sector Tunzhun es altamente susceptible a procesos de remoción en masa. La seguridad de su población y la funcionalidad de su vía principal dependen directamente de la implementación de medidas técnicas de estabilización, así como de un manejo del uso del suelo coherente con la capacidad real de soporte del sistema. Esta comprensión sustenta las estrategias de aprovechamiento y gestión propuestas en el marco del objetivo específico 4.

4.6. Recomendaciones para el aprovechamiento y gestión del espacio

El cruce entre los niveles de riesgo obtenidos, la ocupación territorial definida por el GAD Municipal del Sígsig y la taxonomía de suelos del PDOT parroquial de San Bartolomé permite definir lineamientos de uso y manejo diferenciados para el área de estudio. El polígono se encuentra mayoritariamente clasificado como Suelo Rural de Producción Agropecuaria con Pastos Asociados, con presencia de Inceptisoles, Molisoles y un pequeño enclave de Andisoles, lo que combina alta fertilidad con elevada fragilidad física frente a la erosión y la inestabilidad de laderas.

Figura 28. *Ocupación territorial del área de estudio*



Fuente: - Elaboración propia, 2025 – Ocupación territorial (PDOT Sígsig)

En las zonas con Molisoles ubicadas en sectores de riesgo alto y muy alto, la estructura granular estable y el alto contenido de materia orgánica confieren un notable potencial productivo; sin embargo, su localización sobre laderas de pendiente pronunciada limita la viabilidad de un uso agrícola intensivo. En estas áreas, el aprovechamiento más adecuado corresponde a pastoreo extensivo controlado, con cargas animales moderadas, rotación de potreros y prácticas de conservación de suelos (barreras vivas, revegetación de taludes, exclusión temporal de áreas degradadas), evitando la mecanización y la remoción profunda que puedan detonar procesos de erosión acelerada.

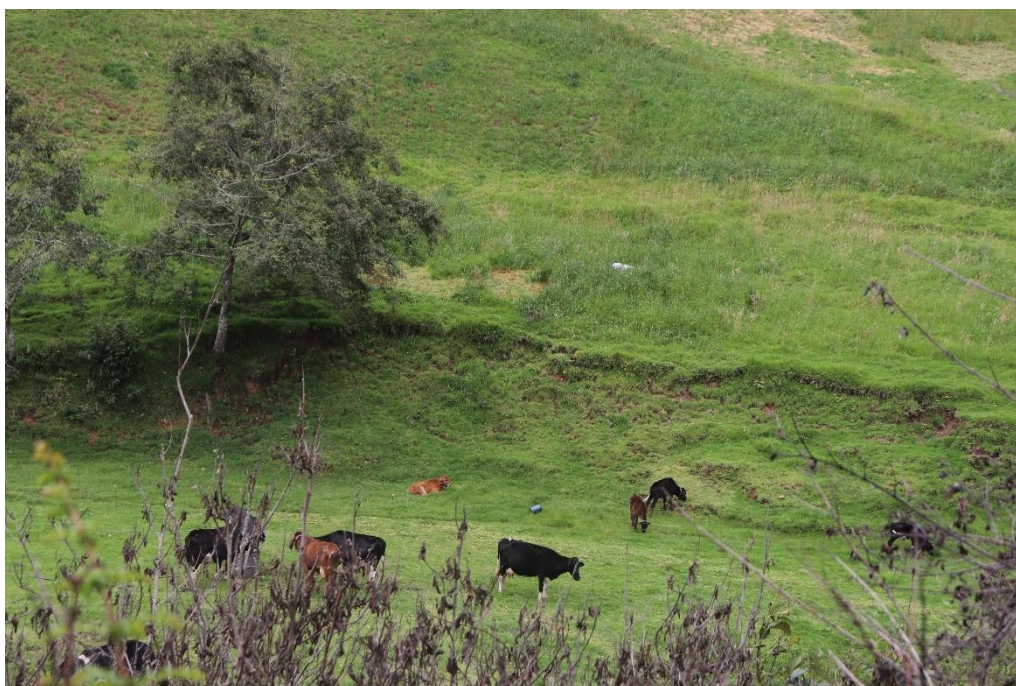
En las unidades con Andisoles, especialmente en el sector norte, se recomienda un manejo aún más conservador, priorizando usos de bajo impacto y prácticas de protección de la cobertura vegetal, dada la alta porosidad y la susceptibilidad a la degradación estructural de estos suelos. Por su parte, los Inceptisoles en pendientes medias y altas deben gestionarse bajo esquemas de uso restringido, evitando cambios

bruscos en la cobertura y minimizando intervenciones que incrementen la escorrentía superficial.

En términos de ordenamiento territorial y gestión de pasivos mineros, las áreas clasificadas con riesgo muy alto (NRD = 9), particularmente la relavera y los taludes adyacentes a la vía y a las viviendas, deben considerarse no edificables y destinadas exclusivamente a acciones de estabilización, recuperación ambiental y monitoreo continuo. Cualquier uso productivo en estas unidades sería incompatible con la capacidad real de soporte del sistema y con los principios de prevención y precaución en materia de gestión del riesgo. A corto plazo, se recomienda implementar medidas de drenaje y encauzamiento de escorrentías, obras menores de protección de taludes y señalización de zonas inestables; a mediano y largo plazo, la estabilización estructural del depósito, la revegetación con especies nativas y el establecimiento de un programa de monitoreo participativo deberían orientar la reconversión del área hacia un uso compatible con su fragilidad geomorfológica.

Dado lo anterior, se recomienda implementar un sistema de monitoreo periódico que permita verificar la evolución de la inestabilidad en la relavera y en los taludes adyacentes. Este sistema debería incluir comparaciones sucesivas entre Modelos Digitales del Terreno, levantamientos topográficos repetidos y, en caso de ser viable, la instalación de instrumentación geotécnica básica (inclinómetros, hitos de control o marcas superficiales) que permita registrar desplazamientos con mayor precisión. Estas acciones facilitarían la identificación temprana de deformaciones, la caracterización del tipo de movimiento de masa potencialmente activo y la toma oportuna de decisiones orientadas a la reducción del riesgo.

Figura 29. *Suelo Rural de Producción Agropecuaria con Pastos Asociados*



Fuente: Elaboración propia, 2025

En la parte norte del área, donde se identifica la presencia de Andisoles, se recomienda un manejo aún más conservador. Este tipo de suelo, derivado de cenizas volcánicas, presenta alta porosidad, pero baja densidad aparente, lo que lo hace susceptible a la pérdida de estructura si es sometido a compactación o disturbios intensivos. Su potencial productivo es alto, pero únicamente bajo esquemas de manejo delicado, como pastoreo moderado, cultivo de especies perennes de raíz profunda o prácticas agroecológicas de bajo impacto. Cualquier intervención en esta zona debe considerar la fragilidad del material y la amenaza inherente que presenta la pendiente.

Respecto a la relavera abandonada, clasificada como zona de riesgo muy alto, se recomienda orientarla exclusivamente hacia acciones de estabilización y recuperación ambiental. La conformación de taludes menos abruptos, la instalación de drenajes superficiales que reduzcan la saturación hídrica, el uso de geomallas biológicas y la revegetación con especies nativas de raíces profundas constituyen medidas prioritarias.

Este espacio no es apto para ningún tipo de uso productivo; su función futura debe ser la de un área de protección y amortiguamiento, destinada a disminuir progresivamente la amenaza y limitar la exposición humana.

La vía principal, ubicada en un corredor de alta amenaza, requiere medidas de gestión que garanticen su funcionalidad sin incrementar la inestabilidad del terreno. Entre estas se incluyen el manejo de drenajes, cunetas revestidas, disipadores de energía y refuerzo vegetal de taludes. Paralelamente, las viviendas asentadas en zonas de riesgo muy alto deben incorporarse a un plan de gestión comunitaria del riesgo, que incluya monitoreo permanente de fisuras, señalización de zonas inestables y procedimientos de evacuación preventiva. Estas acciones fortalecen la resiliencia local y contribuyen a una ocupación más segura del territorio.

Figura 30. *Vía principal Cuenca – San Bartolomé*



Fuente: Elaboración propia, 2025

En conjunto, el aprovechamiento futuro del área de estudio debe orientarse hacia un uso agropecuario, ecológicamente responsable y físicamente seguro, manteniendo la cobertura vegetal, evitando intervenciones profundas del terreno y priorizando la reducción del riesgo mediante la estabilización de los puntos críticos. La integración de las capacidades productivas del suelo (Molisoles y Andisoles) con los resultados del análisis de riesgo permite definir un enfoque de gestión territorial que privilegie la seguridad de la población, la sostenibilidad ambiental y la conservación de la funcionalidad del paisaje rural.

CAPITULO V

4. Conclusiones

La investigación permitió desarrollar una caracterización detallada de la relavera abandonada en el sector Tunzhun, parroquia San Bartolomé, a partir de un conjunto de productos fotogramétricos de alta resolución y ortomosaico, el Modelo Digital del Terreno y nube de puntos integrados dentro de un entorno SIG. Esta información, ha procesada, reveló un relieve complejo, dominado por pendientes elevadas, materiales volcánicos y volcano-sedimentarios de baja cohesión, y una superficie con presencia constante de cuerpos de agua, en algunos sectores con evidentes rasgos pantanosos. La configuración conjunta de estas condiciones geomorfológicas, geotécnicas e hidrológicas permitió identificar procesos activos de erosión, deformaciones superficiales y patrones de escurrimiento que afectan directamente la estabilidad del depósito y su entorno inmediato.

El mapa de susceptibilidad, amenaza y vulnerabilidad delimitó con claridad las zonas de mayor riesgo. Estas se concentran en los taludes más empinados, especialmente donde se acumulan láminas de agua o convergen escorrentías superficiales desde las partes altas de la cuenca. En estos sectores se observaron evidencias de erosión regresiva, cárcavas en formación y posibles vías de filtración hacia quebradas adyacentes, lo que aumenta tanto la probabilidad de remociones en masa como el arrastre de sedimentos potencialmente contaminantes. La cercanía de áreas agrícolas y tramos de infraestructura vial a estas zonas inestables incrementa significativamente el nivel de exposición, consolidando un escenario de riesgo alto a muy alto para el entorno.

La integración de datos geomorfológicos y fotogramétricos con la matriz SIGR-E ratifica que la relavera de Tunzhun se encuentra en una condición de riesgo inaceptable, tanto por su configuración física como por la exposición de elementos vulnerables. Esta

conclusión se alinea con lo observado en estudios internacionales, donde las relaveras presentan tasas de falla mayores que las de presas de agua convencionales, lo que subraya la urgencia de aplicar criterios técnicos rigurosos para su manejo, cierre y monitoreo. En el caso de Tunzhun, la ausencia de un cierre técnico adecuado y de un sistema de monitoreo ambiental ha derivado en un pasivo minero (causa perjuicio) con implicaciones serias para la seguridad territorial y ambiental.

En relación con los objetivos de la investigación, se logró cumplir el propósito general de evaluar y caracterizar los riesgos asociados a la relavera en abandono en Tunzhun, cantón Sígsig.

El primer objetivo específico, enfocado en generar un MDT de alta resolución, se alcanzó con resultados precisos. El modelo captó con nitidez los rasgos del terreno: taludes, escarpes menores, micro depresiones y cauces temporales, elementos clave para los análisis de estabilidad del terreno. Este levantamiento abarcó una superficie aproximada de 33,6 hectáreas y generó una base confiable para la modelización posterior de pendientes, curvaturas y drenajes.

Respecto al segundo objetivo, orientado a identificar áreas con susceptibilidad a procesos de remoción en masa, los resultados del análisis morfométrico mostraron sectores con pendientes superiores a $16,7^{\circ}$ (moderadamente fuerte a fuerte), llegando en zonas críticas a superar los $30,9^{\circ}$ considerados de riesgos elevado de erosión e inestabilidad. Estas áreas se ubican principalmente en los bordes del depósito, en taludes laterales y en laderas con viviendas dispersas, donde se conjugan pendientes pronunciadas, materiales poco consolidados y escorrentía concentrada una combinación que favorece deslizamientos, fallas de taludes y transporte de sedimentos hacia la red hídrica.

El tercer objetivo, vinculado con la evaluación de la vulnerabilidad física y social, puso en evidencia que los elementos más expuestos son las viviendas ubicadas aguas abajo, segmentos clave de la vía de acceso, y zonas agrícolas asentadas en terrenos con inestabilidad. La integración de esta exposición con los niveles de amenaza mediante la matriz SIGR-E reveló que una porción significativa del área de estudio se ubica en rangos de riesgo elevado, situación que, desde el enfoque de la gestión del riesgo, es difícilmente justificable si se prioriza la seguridad poblacional y la protección de medios de vida rurales.

En cuanto al cuarto objetivo, centrado en proponer estrategias de gestión y uso del suelo, se concluye que el área no puede destinarse homogéneamente a actividades productivas sin tomar en cuenta las restricciones impuestas por su inestabilidad. Incluso en suelos relativamente fértiles como los Inceptisoles y Molisoles, la fragilidad del entorno obliga a limitar usos intensivos. Se recomienda evitar nuevas construcciones, minimizar cargas sobre taludes y priorizar acciones de estabilización, control de escorrentía y revegetación con especies adaptadas a pendientes inestables. En zonas de riesgo medio podrían considerarse usos restringidos como sistemas silvopastoriles o de silvicultura, siempre bajo monitoreo geotécnico y con criterios de reducción del riesgo.

Cabe señalar algunas limitaciones. El análisis se basa en un levantamiento puntual y no incorpora una serie temporal que permita evaluar la evolución dinámica de los procesos. Además, la caracterización del depósito se apoyó principalmente en datos geométricos; no se realizaron ensayos geotécnicos in situ ni mediciones hidrogeológicas detalladas. Tampoco se ejecutaron muestreos geoquímicos, por lo que el riesgo químico se evaluó con base en estudios previos.

A partir de estos resultados, es prioritario complementar el diagnóstico con estudios geotécnicos e hidrogeológicos que permitan ajustar modelos de estabilidad,

refinar parámetros de diseño y priorizar intervenciones. Sería pertinente realizar ensayos de laboratorio y pruebas in situ para determinar la resistencia de los materiales y el comportamiento del nivel freático ante eventos climáticos extremos. Asimismo, se recomienda establecer un sistema de monitoreo continuo que combine campañas periódicas de fotogrametría aérea con instrumentación específica piezómetros, inclinómetros, pluviómetros y sensores de desplazamiento para detectar a tiempo cualquier cambio relevante en la estabilidad del sistema.

Finalmente, se plantea la necesidad de formular un plan integral de cierre y remediación del pasivo minero. Este debería incluir medidas de drenaje, estabilización física (como reperfilado de taludes y construcción de bermas), revegetación con especies nativas y acciones para reducir la generación de drenaje ácido. En áreas con riesgo alto o muy alto, se debe evitar todo nuevo desarrollo o uso intensivo, mientras que en zonas de riesgo medio podrían explorarse opciones de aprovechamiento bajo condiciones estrictas de monitoreo y control.

En síntesis, la experiencia de evaluación en Tunzhun demuestra el valor de integrar tecnologías geoespaciales, análisis fotogramétrico y criterios técnicos rigurosos para abordar los riesgos de relaveras en abandono. Esta metodología no solo ofrece diagnósticos detallados y confiables, sino que fortalece las capacidades para la gestión del territorio en contextos complejos, articulando ciencia, técnica y responsabilidad social en la búsqueda de soluciones sostenibles.

Referencias Bibliográficas

- Abdullah, Q. (2023). Positional Accuracy Standars. Obtenido de <https://www.ingentaconnect.com/content/asprs/pers/2023/00000089/00000010?utm>
- Aldaz, F. (2024). Análisis comparativo de interpolaciones geoestadísticas de concentraciones de metales pesados, en la parroquia San Bartolomé, Cantón Sígus, provincia del Azuay. Trabajo de Titulación, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador. Recuperado el 12 de septiembre de 2025, de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/14251/1/19772.pdf>
- American Society for Photogrammetry. (2015). Positional Accuracy Standards for digital geospatial data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.
- Antolinez, C. (Septiembre-Octubre de 2023). La gestión de riesgos en la minería: identificación de peligros y controles esenciales . Protección&Seguridad, 411(1), 20-26. Recuperado el 18 de septiembre de 2025, de <https://ccs.org.co/wp-content/uploads/2024/01/Gestion-de-riesgos-en-la-mineria-PS-411.pdf>
- Azam, S., & Li, Q. (2010). Tailing Dam Failures.
- Balarezo, P. (2023). Diseño de explotación minera subterránea en la producción de minerales de la Empresa minera La Escondida-2022. Tesis, Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica, Ica, Perú. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://repositorio.unica.edu.pe/server/api/core/bitstreams/df1ea4de-731e-4842-a545-2454ef929cd9/content>
- Banco Central del Ecuador. (2025). Obtenido de <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ReporteMinero072025.pdf>
- Best, M. G. (2003). Igneous and Metamorphic Petrology. Oxford: Wiley-Blackwell.
- Blasco, A. (2025). Minería a cielo abierto, deforestación y salud en la amazonía sur del Ecuador. Caso Tundayme, Proyecto Mirador. Tesis de Maestría, Universidad Andina Simón Bolívar, Quito, Ecuador. Recuperado el 5 de octubre de 2025, de <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/10545/1/T4619-MCCSD-Blasco-Mineria.pdf>
- Bustamante, D. (2022). Optimización y levantamiento topográficos aplicados a stocks de mineral mediante uso de fotogrametría con Dron Phantom 4 en una mina superficial

de hierro en la costa Sur del Perú. Tesis, Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú. Recuperado el 19 de septiembre de 2025, de <https://n9.cl/a9wh0o>

- Cabrera, C. (2023). Propuesta de diseño y factibilidad económica para la explotación de la fase II de la concesión minera Llatcón, Cuenca-Azuay. Trabajo de Graduación, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://core.ac.uk/download/629981641.pdf>
- Carrasco, S., & Chiaradia, B. (2023).
- Cas, R., Giordano, G., & Wright, R. (2008). Volcanic Successions: Modern and Ancient. Londres: Springer.
- Chand, K., Faroot, M., Koner, R., Fisssha, Y., Cheepurupalli, N., Saidani, T., & Ikeda, H. (2025). Monitoreo y gestión de la recuperación de minas a cielo abierto para un futuro sostenible mediante tecnología de drones: una revisión . Drones , 9(9), 601. doi:<https://doi.org/10.3390/drones9090601>
- Chimborazo, F., & Espejo, M. (2021). Ventajas de la implementación de modelos 3D utilizando drones para el diseño de redes de distribución. Proyecto Técnico con Enfoque Social, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Recuperado el 19 de septiembre de 2025, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21357/1/UPS-CT009387.pdf>
- Constitución de la República del Ecuador. (2008).
- Cristóbal, C. (2023). Aplicación de la fotogrametría con drones para movimiento de tierras en las unidades Atacocha y El Porvenir la comañia Nexa Resources. Tesis, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco, Perú. Recuperado el 18 de septiembre de 2025, de http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/3514/1/T026_71234009_T.pdf
- Cuesta, A. (2021). Identificación de una metodología para levantamiento de pasivos ambientales mineros de áridos y pétreos aplicable al Distrito Metropolitano de Quito. Trabajo de Titulación Modalidad Propuesta Tecnológica, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. Recuperado el 5 de octubre de 2025, de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/24285>
- Delgado Fernandez, E., León Peralta, M., Canto Guamán, C., & Guzmán Juárez, M. (2023). Efecto de la actividad minera sobre la biodiversidad en un sector del cantón Paquisha, provincia de Zamora Chinchipe-Ecuador. La Granja: Revista de Ciencias de

la Vida, 93-106. Obtenido de

<https://lagranja.ups.edu.ec/index.php/granja/article/view/4943?>

- Diario El Comercio. (1 de mayo de 2012). Diario El Comercio. Recuperado el 6 de octubre de 2025, de Diario El Comercio: <https://goo.su/myX9Yg>
- Ecuador, M. d. (2017). Libro 2.1 – Instructivo para elaborar el Diagnóstico SIGR-E. Quito, Ecuador: Ministerio de Educación del Ecuador. Obtenido de https://educacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/05/Libro2.1-Instructivo-para-elaborar-el-Diagnostico_SIGR-E.pdf
- especificado., M. d.-n. (2016). Instructivo para elaborar el Diagnóstico. SIGR-E (Libro 2.1) (Libro 2.1 del sistema SIGR-E (“Sistema Integral de Gestión de Riesgos Escolares”) ed., Vols. Libro 2.1 del sistema SIGR-E (“Sistema Integral de Gestión de Riesgos Escolares”)). Quito, Ecuador. Obtenido de https://educacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/05/Libro2.1-Instructivo-para-elaborar-el-Diagnostico_SIGR-E.pdf
- Estupiñan, R., Romero, P., García, M., Garcés, D., & Valverde, P. (2021). La minería en Ecuador. Pasado, presente y futuro. ESPOL, 132(4), 533-549. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8248269>
- FAO. (2006). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Guidelines for Soil Description (4th ed.).
- Ferencz-Appel, A., García de Marina, H., Arriola-Valverde, S., & Rimolo-Donadio, R. (Octubre de 2021). Metodología para la implementación de misiones fotogrametría autónomas con plataformas UAS de ala fija. Tecnología en Marcha, 34(Especial), 3-12. doi:10.18845/tm.v34i5.5906
- Fisher, R. V., & Schmincke, H.-U. (2012). Pyroclastic Rocks ((2da edición) ed.). Berlín / Heidelberg: Springer.
- Flores, G. (2021). Guía de buenas prácticas para el transporte terrestre en carreteras de concentrado de minerales. Trabajo de Fin de Especialización, Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://goo.su/vbTKw>
- Flores, V., & Niemes, M. (2021). Diseño del método de explotación de un cuerpo mineralizado en subniveles para conexión con frente de avance en el Proyecto Minero Bosque de Oro. Proyecto Integrador, Escuela Superior Politécnica del Litoral , Guayaquil, Ecuador. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de

<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/52304/1/T-70605%20FLORES%20-%20NIEMES.pdf>

- Gaona, P., & Vaca, N. (2023). El sector minero en el Ecuador: desde la perspectiva de la teoría de juegos no cooperativos y repetidos. Trabajo de Titulación, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. Recuperado el 4 de octubre de 2025, de <https://goo.su/Q18KFcY>
- García, H. (2023). Obtenido de Prevención de riesgos laborales en la minería .
- Geocom. (2020). Aplicaciones de la fotogrametría aérea en minería: Experiencias a partir del uso de drones. Obtenido de Geocom Chile: <https://www.geocom.cl/blogs/news/aplicaciones-de-la-fotogrametria-aerea-en-mineria-experiencias-a-partir-del-uso-de-drones>
- Gobierno Autónomo Descentralizado. (2024). Situación política. Obtenido de <https://www.sigsig.gob.ec/sobre-el-sigsig/>
- Gobierno Autónomo Descentralizado del Sígsig. (2025). Obtenido de <https://www.sigsig.gob.ec/datos-generales-del-gad/>
- Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de San Bartolomé. (2024). Obtenido de Ubicación geográfica: https://gpsanbartolome.gob.ec/azuay/ubicacion-geografica/?utm_source
- Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de San Bartolomé. (2024). Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial PDOT. Parroquia San Bartolomé.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de San Bartolomé. (2024). Obtenido de GAD Parroquial San Bartolomé: https://gpsanbartolome.gob.ec/azuay/wp-content/uploads/2024/10/18_10_2024_PDOT_SB.pdf
- Gómez-Zurdo, R. (2021). Aplicación de la fotogrametría con drones al control deformacional de estructuras y terreno. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Recuperado el 18 de septiembre de 2025, de https://oa.upm.es/69713/1/RUBEN_SANCHO_GOMEZ_ZURDO.pdf
- Gómez-Zurdo, R., Galán, D., González-Rodrigo, B., Marchamalo, M., & Martínez, R. (Enero-Marzo de 2021). Aplicación de la fotogrametría con drones al control deformacional de estructuras y terreno. Informes de Construcción, 73(561), e379. doi:<https://doi.org/10.3989/ic.77867>

- González, R., Paredes, M., & Soto, L. (2023). Evaluación de relaves mineros mediante drones y sensores térmicos en San Juan, Argentina. *Revista Andina de Geociencias*, 17(2), 77-94.
- González, R., Paredes, M., & Soto, L. (2023). *Revista Andina de Geociencias*, 77-94.
- González, R., Paredes, M., & Soto, L. (2023). Evaluación de relaves mineros mediante drones y sensores térmicos en San Juan, Argentina. *Revista Andina de Geociencias*, 17(2), 77-94.
- González, R., Paredes, M., & Soto, L. (2023). Evaluación de relaves mineros mediante drones y sensores térmicos en San Juan, Argentina. *Revista Andina de Geociencias*, 77-94.
- Google Earth. (2025). Google Earth. Recuperado el 4 de octubre de 2025, de Google Earth: https://www.google.com/maps/@-3.0066872,-78.8604312,1568m/data=!3m1!1e3?entry=tu&g_ep=EgoyMDI1MTAwMS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D
- Google Earth Pro. (2025). Google Earth Pro. Obtenido de Google Earth Pro.
- GreenWorld, J. (2020). Evaluación comparativa de métodos de levantamiento topográfico en minería: Estación Total y Fotogrametría con RPAS y GPD Diferencial. *GreenWorld Journal*. Obtenido de https://www.greenworldjournal.com/_files/ugd/dac1d8_04835f40ea38424cada4b1b1fa11bfcc.pdf
- Health, N. I. (2022). Office of dietary supplements.
- Hermoso, P. (2023). Prevención de riesgos laborales en la minería: industrias extractivas subterráneas. Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Valladolid, Palencia, España. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/62688/TFG-L3672.pdf?sequence=1>
- Hidalgo, E. (2023). Propuesta de diseño de una guía de procesos para la pequeña minería en el Ecuador basada en los principios de la economía circular. Tesis de Maestría, Universidad Andina Simón Bolívar, Quito, Ecuador. Recuperado el 19 de septiembre de 2025, de <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/9305/1/T4071-MGCI-Hidalgo-Propuesta.pdf>
- INIGEMM. (2017). Mapa geológico del cantón Sigsig, escala 1:100 000. Quito: Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico.

- Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. (2017). Obtenido de Informe geológico de la Parroquia San Bartolomé.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2020). Anuario meteorológico 2020.
- Internacional Organization for Standardization. (2018). Risk management guidelines.
- Jara, E. (2025). Aplicación de técnicas de fotogrametría con drones para la detección y cuantificación de deterioro de pavimentos y su posible aplicación en evaluación de pavimentos aeroportuarios. Informe de Habilitación Profesional, Universidad de Concepción, Campus Los Angeles, Las Angeles, Chile. Recuperado el 19 de septiembre de 2025, de <https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/95aea63b-7b4f-47e3-b34f-6ae967528383/content>
- Kim, Y., & Sanderson, D. (2004). Journal of Structural Geology. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.08.002>
- Lara, F. (2 de febrero de 2025). IDE. (P. Económica, Editor, & Enfoque, Productor) Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de IDE: <https://perspectiva.ide.edu.ec/investiga/wp-content/uploads/2025/05/Perspectiva-2025-05-2.pdf>
- León, M. (2022). Análisis de susceptibilidad de riesgos por deslizamiento de tierra mediante fotogrametría con drones, en la parroquia Belisario Quevedo, Bosque Antenas del Pichincha. Trabajo de Titulación, Universidad Politecnica Salesiana, Quito, Ecuador. Recuperado el 12 de septiembre de 2025, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22543/4/UPS%20-%20TTS787.pdf>
- Li, Y., Zheng, C., Fang, D., Zhang, L., & Xiao, Z. (2025). A novel method for dry beach monitoring with high precision.
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). Interpretación de imágenes con sensores remotos.
- Maldonado, D. (2022). Propuesta de diseño de explotación subterránea para la extracción de oro en el área minera Patricia, El Guabo- El Oro. Trabajo de Graduación, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/12378/1/17905.pdf>
- Matías, R. (2020). Aplicación de un dron para mejorar los procesos productivos en minería Chinalco Perú S.A, Morococha 2020. Trabajo de Investigación, Universidad Continental, Huancayo, Perú. Recuperado el 12 de septiembre de 2025, de

https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8698/4/IV_FIN_110_TI_Matias_Ayma_2020.pdf

- Matos, K. (2022). Aplicación del método de explotación corte y relleno ascendente semimecanizado para mejorar la productividad en la veta Ximena en los niveles 18 y 19 en la ECM Gestión Minera Integral SAC Compañía Minera Alpayana. Tesis, Universidad Continental, Huancayo, Perú. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12583/3/IV_FIN_110_TE_Matos_Rojas_2022.pdf
- Matute, E., & Medina, R. (Enero-Junio de 2025). La actividad minera y sus consecuencias en el Ecuador. *Metanoia: Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Universidad Regional Autónoma de los Andes*, 11(1), 139-154. doi:<https://doi.org/10.61154/metanoia.v11i1.3847>
- Méndez, W. (2024). Diseño de investigación para la optimización del uso de drones de despegue y aterrizaje vertical equipado con baterías vetavoltaicas y conectividad 5G terrestre y satelital para mejorar la respuesta rapida en la seguridad ciudadana. Trabajo de Graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado el 19 de septiembre de 2025, de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0736_EO.pdf
- Meza Canto, B., & Castilla Rojas, M. (2024). Obtenido de Evaluación de riesgo ambiental en la minera abandonada Cobre Cata Acaril.
- Meza, B., Castilla, B., & Iannacone, J. (31 de agosto de 2025). Riesgo ambiental en una minera abandonada Peruana mediante indices de calidad de suelo y bioindicadores. *Revista Politécnica*, 56(1), 105-120. Recuperado el 18 de septiembre de 2025, de https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/2383
- Ministerio de Ambiente y Energía. (2020). Plan Nacional de Desarrollo del Sector Minero 2020–2030.
- Ministerio de Industria, E. y. (2020). Aplicación de fotogrametría y modelación 3D en geología y minería: El granito de Cufre. Montevideo, Uruguay: Dirección Nacional de Minería y Geología. Obtenido de https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/01_Aplicacion_de_fotogrametria_y_modelacion_3d_en_geologia_y_mineria_el_granito_de_cufre_0.pdf

- MINSUS. (2025). Pasivos ambientales mineros – MINSUS. Obtenido de Pasivos ambientales mineros – MINSUS: <https://minsus.net/pasivos-ambientales-mineros/>
- Mora, D., & Reiban, J. (2024). Recuperación metalúrgica de minera en la relación de San Bartolomé mediante flotación selectiva. Trabajo de Graduación, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador. Recuperado el 12 de septiembre de 2025, de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/14552/1/20070.pdf>
- Nieto, F. (2022). La participación comunitaria en la gestión del agua: como aporte para el desarrollo local sostenible en la parroquia Santa Ana. Trabajo de Titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Recuperado el 5 de octubre de 2025, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23688/1/UPS-CT010160.pdf>
- Ortir-Jaya, D., Suárez-Marino, E., Cornejo-Aguilar, J., & Huera-Castro, D. (2023). La libre explotación minera, la tutela judicial efectiva, la seguridad jurídica y un ambiente sano. Iustitia Socialis. Revista Arbitrada de Ciencias Jurídicas, VIII(1), 307-318. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9114708.pdf>
- Oviedo-Anchuria, R., Moina-Qimbí, E., Naranjo-Morán, J., & Barcos-Arias, M. (2017). Contaminación por metales pesados en el sur de Ecuador asociada a la actividad minera. Revista Bionatura, 2(4), 437-447. doi:10.21931/RB/2017.02.04.5
- Paguay, P. (2023). Beneficios de la actividad económica minera y su incidencia en el PIB del Ecuador periodo 2011-2020. Trabajo de Titulación, Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador. Recuperado el 19 de septiembre de 2025, de <https://goo.su/JSqrb>
- Pillajo Portero, K. (2024). La explotación minera y el derecho de la naturaleza en la provincia de Napo. Riobamba, Ecuador: Universidad Nacional de Chimborazo. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/13620?>
- Pineda, B. (2021). Supervisión y ejecución de actividades de fotogrametría con Wingtraone Drone y acompañamiento a campo para estudio de suelos. Tesis, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia. Recuperado el 18 de septiembre de 2025, de <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/11961/Trabajo%20de%20grado.pdf?sequence=1>

- Quispe, J. A. (2021). Modelo de vulnerabilidad ambiental en zonas de relaves abandonados utilizando SIG y fotogrametría. *Revista Peruana de Medio Ambiente*, 14(3), 88-102.
- Ramírez, F., & Torres, A. (2022). Aplicación de drones en el monitoreo estructural de depósitos de relaves en Zacatecas. *Revista Mexicana de Geotecnia*, 11(2), 33-50.
- Rauhala, A., Tuomela, A., Davids, C., & Rossi, P. (2017). UAV Remote Sensing Surveillance of a Mine Tailings Impoundment in Sub-Arctic Conditions. doi:<https://www.mdpi.com/2072-4292/9/12/1318>
- Rollenbeck, R., Orellana, J., Bendix, J., & Rodriguez, R. (2022). Remote sensing. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/rs14040824>
- Sánchez, A. (2020). Desechos sólidos peligrosos generados en la planta de tratamiento y beneficio de minerales Rumicuri. Trabajo de Titulación, Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador. Recuperado el 12 de septiembre de 2025, de https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/SANCHEZ%20LEON%20ADRIANA%20ESTEFANIA_compressed.pdf
- Sangoluisa, C. (2023). Análisis comparativo del impacto económico de la minería en el Ecuador y Perú. Trabajo de Fin de Maestría, Universidad de Otavalo, Otavalo, Ecuador. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://repositorio.uotavalo.edu.ec/server/api/core/bitstreams/903f5c00-51f8-418f-837e-834e964748e3/content>
- Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos de Ecuador. (2025). Niveles de alertas y declaratorias vigentes. Obtenido de <https://goo.su/sUBfzEB>
- Sibson, R. (1982). Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental.
- Silva, A. (2020). Evaluación de relaves mineros mediante fotogrametría aérea en Atacama. *Boletín Técnico de Ingeniería Minera*, 9, 25-41.
- Soria-Maldonado, F., & Cáceres-Romero, H. (abril de 2022). La minera ilegal y sus efectos en la vulneración de los desechos de la naturaleza. *Polo del Conocimiento*, 7(4), 1650-1664. doi:10.23857/pc.v7i4.3910
- Sphiwe, E. (septiembre de 2023). Riesgos físicos de las minas abandonadas: una revisión de casos de sudáfrica. Elsevier. *Las industrias extractivas y la sociedad*, 15, 101285. doi:<https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101285>

- Steinmann, G. (1997). Estratigrafía y evolución volcánica del sur del Ecuador. Quito: Servicio Geológico Nacional.
- Supandi, S. (2021). Geotechnical profiling of a surface mine waste dump using geoelectrical method. Open Geosciences, 13(1). Obtenido de <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/geo-2020-0234/html>
- Terrones, I., & Chalan, M. (2021). Análisis de riesgos que afectan a la seguridad y salud ocupacional del personal minero en labores subterráneas, Cajamarca 2021 . Tesis, Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú. Recuperado el 18 de septiembre de 2025, de <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/30576/Chalan%20Gallardo%2c%20Miguel%20Angel%20-%20Terrones%20Vargas%2c%20Imer%20Edwin.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Thielen, D., Ramoni Perazzi, P., Puche, M., & Márquez, M. (2023). Effect of extreme El Niño events on the precipitation of Ecuador. Obtenido de <https://nhess.copernicus.org/articles/23/1507/2023/>
- Torres, F., & Lliguisaca, J. (2023). Diseño e implementación de un sistema de reconocimiento autónomo para el sector rural mediante un drone . Trabajo de Titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Recuperado el 19 de septiembre de 2025, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/25978/1/UPS-CT010684.pdf>
- Torrijo, A., & Garzón, R. (2024). A Case Study of a Macro-Landslide in the High Mountain Areas of the Ecuadorian Andes: “La Cría” at the Azuay Province (Ecuador). Obtenido de <https://www.mdpi.com/2073-445X/13/12/2047>
- Twiss, R. J., & Moores, E. M. (2007). Structural Geology. Nueva York: W.H. Freeman and Company.
- U.S Geological Survey. (2025). Mineral commodity summaries.
- USGS. (2025). U.S. Geological Survey. Obtenido de U.S. Geological Survey: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7-extended-science-mission>
- Valencia, F. (2017). Zonificación de contaminación por metales pesados en San Bartolomé. Universidad del Azuay, 2(11), 133-138. Recuperado el 12 de septiembre de 2025, de <https://revistas.uazuay.edu.ec/index.php/memorias/article/download/58/52/139>

- Van Westen, C. (2012). Remote Sensing and GIS for natural hazards assessment and disaster risk management. Obtenido de https://filetransfer.itc.nl/pub/westen/PDF_files/2012%20vanWesten%20Treatise%20in%20Geomorphology.pdf
- Vera, M. (2021). Análisis de la participación del sector minero y su incidencia en el crecimiento del Ecuador. Trabajo de Titulación, Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador. Recuperado el 19 de septiembre de 2025, de <https://cia.uagraría.edu.ec/Archivos/VERA%20GOMEZ%20MIRIAM%20TANIA.pdf>
- Vilela-Pincay, W., Espinosa-Encarnación, M., & Bravo-González, A. (Julio-Diciembre de 2020). La contaminación ambiental ocasionada por la minería en la provincia de El Oro. *Estudios de la Región*, 8(8), 216-233.
doi:<https://doi.org/10.32719/25506641.2020.8.8>
- Westoby, M. J., Brasington, J., J., & Glasser, N. (2012). Obtenido de https://pure.aber.ac.uk/ws/files/4916016/Westoby_et_al._GEOMORPH_2012_Accepted.pdf?utm_source
- Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., & Reynolds, J. (2012). Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications.
doi:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12004217?via%3Dihub>
- Yu, D., Tang, L., & Chen, C. (2020). Three dimensional numerical simulation of mud flow from a tailing dam failure across complex terrain.
doi:<https://doi.org/10.5194/nhess-20-727-2020>