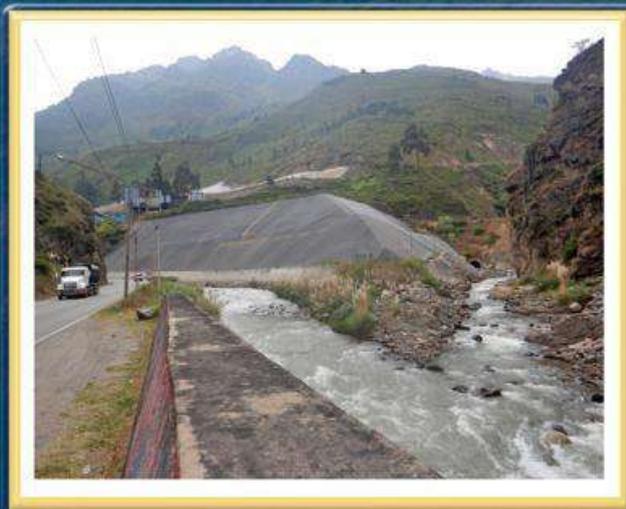


DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A7515

EVALUACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS EN EL SECTOR TAMBORAQUE Y ALREDEDORES

Departamento: Lima
Provincia: Huarochirí
Distrito: San Mateo



JULIO
2024

EVALUACIÓN DE PELIGROS GEOLÓGICOS EN EL SECTOR TAMBORAQUE Y ALREDEDORES

Distrito San Mateo, provincia Huarochirí, departamento Lima



Elaborado por la
Dirección de Geología
Ambiental y Riesgo
Geológico del
INGEMMET

Equipo de investigación:

Norma Luz Sosa Senticala

Julio César Lara Calderón

Mauricio Antonio Núñez Peredo

Referencia bibliográfica

Sosa, N., Lara, J., Núñez, M. (2024) *Evaluación de peligros geológicos en el sector Tamboraque y alrededores*. Distrito San Mateo, provincia Huarochirí, departamento Lima. Lima: INGEMMET, Informe Técnico A7515, 82p.

ÍNDICE

RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Objetivos del estudio	7
1.2. Antecedentes y trabajos anteriores	8
1.3. Aspectos generales	10
a) Ubicación	10
b) Población	11
c) Accesibilidad	11
d) Clima	13
e) Uso de suelo	13
f) Zonificación sísmica	14
2. DEFINICIONES	15
3. ASPECTOS GEOLÓGICOS	18
3.1. Unidades litoestratigráficas	18
3.1.1. Grupo Rímac (P-r)	18
3.1.2. Depósitos Cuaternarios	19
a) Depósito coluvio-deluvial (Q-cd)	19
b) Depósito coluvial (Qh-co)	20
c) Depósito proluvio-aluvial (Q-pa)	21
d) Depósito fluvial (Q-fl)	21
e) Depósitos antrópicos (Q-an)	23
4. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	24
4.1. Pendientes del terreno	24
4.2. Índice topográfico de humedad	25
4.3. Unidades geomorfológicas	29
4.3.1. Geformas de carácter tectónico degradacional y erosional	29
4.3.2. Geformas de carácter depositacional y agradacional	30
5. PELIGROS GEOLÓGICOS	37
5.1. Deslizamientos en el sector Tamboraque	38
Características visuales de los deslizamientos	42
5.1.1. Análisis de perfil del deslizamiento	45
5.2. Derrumbe y caída de rocas en el cerro Tamboraque y alrededores	47
5.3. Erosión de laderas en el cerro Tamboraque y alrededores	48
5.4. Erosión fluvial en el río Rímac y la quebrada Parac/Aruri	49

5.5. Factores condicionantes	51
5.6. Factores desencadenantes	53
6. SIMULACIÓN DE FLUJOS DE DETRITOS CON FLO2D	55
6.1. Análisis de datos	55
6.2. Análisis de resultados	59
7. CONCLUSIONES	72
8. RECOMENDACIONES	74
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
ANEXO 1: MAPAS	78

RESUMEN

El presente informe técnico es el resultado de la evaluación de peligros geológicos en el sector Tamboraque y alrededores (distrito San Mateo, provincia Huarochirí, departamento Lima). Con este trabajo, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – Ingemmet, cumple con una de sus funciones que consiste en brindar asistencia técnica en peligros geológicos para los tres niveles.

En el contexto litológico se observa, que la zona de estudio está compuesta por substratos rocosos volcánicos de tipo andesitas masivas y secuencias tobáceas medianamente a muy fracturadas y moderadamente a altamente meteorizadas del Grupo Rímac. También se identificaron depósitos coluvio-deluviales originados por deslizamientos; depósitos proluvio-aluviales; depósitos fluviales; depósitos coluviales originados por derrumbes y caídas de rocas; así como depósitos antrópicos que corresponden a los relaves 1-2 y Triana.

En relación a las geoformas identificadas, se tienen montañas en roca volcánica con pendiente del terreno muy fuerte o escarpado (25° - 45°) a muy escarpado ($>45^{\circ}$), donde se ubican geoformas de tipo piedemonte coluvio deluvial con pendiente moderada (5° - 15°) a fuerte (15° - 25°) del terreno. Además, existen subunidades de vertiente coluvial de detritos con pendiente del terreno muy fuerte o escarpado (25° - 45°) a muy escarpado ($>45^{\circ}$), así como vertiente con depósito de deslizamiento con pendiente del terreno moderada (5° - 15°) a fuerte (15° - 25°).

Los peligros geológicos identificados en el sector Tamboraque y alrededores, corresponden a movimientos en masa, tipo: deslizamiento, flujo de detritos, caída de rocas y derrumbe; peligros geohidrológicos, tipo: erosión fluvial; así como otros peligros geológicos, tipo: erosión de laderas (cárcavas).

El deslizamiento antiguo identificado al este de los relaves 1-2 mide aproximadamente $117\,468\text{ m}^2$ (12 ha), entre 178 m a 445 m de ancho y 491 m de desnivel entre la escarpa principal y el pie del deslizamiento. Además, la longitud de la escarpa principal mide 598 m, con salto principal variable entre 10 a 20 m y saltos secundarios entre 2 m a 6 m.

Los factores condicionantes que originan peligros geológicos en la zona de estudio, son la presencia de depósitos inconsolidados pertenecientes a movimientos en masa antiguos y recientes, ubicados sobre macizo rocoso muy fracturado y meteorizado. Además, la presencia de montañas modeladas en roca volcánica con pendiente del terreno muy fuerte o escarpado (25° - 45°) a muy escarpado ($>45^{\circ}$), así como las modificaciones de los taludes a través de los cortes de carreteras (carretera central, vía férrea, operaciones mineras, entre otros), generando inestabilidad del terreno.

Los factores que desencadenaron el deslizamiento en el 2008 fue la infiltración de aguas de riego en suelos permeables, proveniente de los terrenos adyacentes; la sobrecarga de los depósitos de relaves 1-2, así como el recrecimiento de la misma; y la carga dinámica producida por el paso del ferrocarril (aproximadamente 150 Ton por vagón). Actualmente podría reactivarse por sismos o lluvias de gran intensidad-corta duración, o de moderada intensidad-larga duración.

Para la Quebrada Parac/Aruri y río Rímac se realizaron escenarios de simulaciones de flujos de detritos, de acuerdo a la realidad geodinámica que presenta el área de estudio, la concentración volumétrica de sedimentos y caudales máximos estimados del análisis hidrológico, con los siguientes resultados:

El escenario realizado en la Quebrada Parac/Aruri, muestra la afectación directa de ~1,135 m de la vía férrea, un puente, una labor minera, 500 m de tocha carrozable, una alcantarilla, ~640 m de la carretera central, la hidroeléctrica de Huanchor y la posible afectación del relave minero Triana, como consecuencia de un embalse y la posterior rotura del dique sobre el que se encuentra la vía del ferrocarril central.

El escenario para el río Rímac la simulación del flujo de detritos muestra como consecuencia de un posible desembalse, a partir del represamiento que se produciría al activarse un deslizamiento en la margen derecha del río Rímac, con la afectación directa de ~100 m de la vía férrea, 2 viviendas, 2 puentes, ~1,055 m de la Carretera Central, instalaciones del campamento de la Unidad Minera Coricancha e instalaciones de la central hidroeléctrica de Huanchor.

La zona evaluada presenta movimientos en masa, siendo los principales los deslizamientos del cerro Tamboraque y el flujo de detritos de la quebrada Parac/Aruri. Por las condiciones geológicas, geomorfológicas y geodinámicas que se mencionan líneas arriba, se considera como **Zona crítica y de Peligro Alto**, los eventos podrían reactivarse ante lluvias excepcionales y sismos.

Finalmente, se brindan recomendaciones que deben ser tomadas en cuenta por las autoridades competentes, las cuales consisten principalmente en: realizar el monitoreo geodésico y topográfico de los depósitos de relaves 1-2 y Triana, así como el deslizamiento antiguo; realizar charlas de sensibilización y concientización sobre el peligro al que se encuentran expuestos los pobladores del distrito de San Mateo y otros sectores asentados en la parte baja del sector Tamboraque; realizar el desquinche de las rocas sueltas en las laderas del cerro Tamboraque y alrededores; realizar trabajos de descolmatación y limpieza del cauce principal de la Quebrada Parac/Aruri, especialmente después de épocas de avenida y evitando procesos de erosión fluvial aguas arriba del depósito de relaves Triana; entre otras.

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (Ingemmet), ente técnico-científico desarrolla a través de los proyectos y actividades de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR), la ACTIVIDAD 11: “Servicio de Asistencia Técnica de Peligros Geológicos a Nivel Nacional”, la cual contribuye con entidades gubernamentales en los tres niveles de gobierno mediante el reconocimiento, caracterización y diagnóstico del peligro geológico en zonas con elementos vulnerables que pudieran verse afectados.

En atención a los oficios N° 1025-2023/MINEM-DGAAM, 0037-2024/MINEM-DGAAM y 0253-2024/MINEM-DGAAM, emitidos por la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros del Ministerio de Energía y Minas; el oficio N° 008838-2023-DP/SSG derivado por la Secretaría General del Ministerio de Energía y Minas; y en el marco de las competencias del Ingemmet, se realiza una nueva evaluación de peligros geológicos en el sector Tamboraque y alrededores ubicados en el distrito San Mateo, provincia Huarochirí, departamento Lima.

La Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del Ingemmet, designó a los Ingenieros Norma Sosa, Julio Lara y Mauricio Núñez para realizar dicha evaluación de peligros.

La evaluación de peligros en mención, se basa en: la recopilación y análisis de información existente de trabajos anteriores realizados por el Ingemmet, los datos obtenidos durante el trabajo de campo (puntos de control GPS, fichas de inventario y fotografías), la cartografía geológica, geomorfológica y geodinámica realizada en gabinete, así como en la simulación de flujos de detritos utilizando el software Flo2d.

Este informe se pone a consideración de la Municipalidad Distrital de San Mateo, la Asociación Frente Único de Desarrollo de Huachipa-FUDE HUACHIPA, la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros del Ministerio de Energía y Minas, la Secretaría General del Ministerio de Energía y Minas, el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED) y el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), a fin de proporcionar información técnica de la inspección, conclusiones y recomendaciones que contribuyan con la reducción del riesgo de desastres en el marco de la Ley 29664.

1.1. Objetivos del estudio

El presente trabajo tiene como objetivos:

- a) Identificar, tipificar y caracterizar los peligros geológicos que se presentan en el sector de Tamboraque y alrededores, que eventualmente comprometen la seguridad física de personas, viviendas, obras de infraestructura y vías de comunicación en la zona de influencia de los eventos.
- b) Determinar las causas de origen de los peligros geológicos identificados.
- c) Emitir recomendaciones para la mitigación de los riesgos asociados a los peligros geológicos identificados.

1.2. Antecedentes y trabajos anteriores

Existen trabajos previos y publicaciones del Ingemmet, que incluyen el área de estudio correspondiente al sector de Tamboraque y alrededores, relacionados a temas de geología, geodinámica externa y evaluación de peligros geológicos, los cuales se mencionan en el cuadro 1 y se describen a continuación:

- a) Boletín N° 29, Serie C, Geodinámica e Ingeniería geológica: “Estudio de Riesgos Geológicos del Perú - Franja N° 4” (Ingemmet, 2006). En base a este trabajo elaborado a escala regional y considerando el área de estudio del presente informe, en la quebrada Parac/Aruri se identificaron dos deslizamientos. Asimismo, el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa muestra que la zona evaluada en este estudio se asienta en terrenos de susceptibilidad muy alta a estos procesos.
- b) Informe técnico N° A6505 “Evaluación geológica del área afectada por deslizamiento de tierras en Tamboraque” (Zavala *et al.*, 2008). De acuerdo con este informe, la cartografía geomorfológica-geodinámica permitió diferenciar depósitos y procesos de movimientos en masa antiguos, así como evidencias de movimientos activos, relacionados a un proceso de deslizamiento. La infiltración natural de aguas de lluvia y de riego, así como la actividad antrópica (recrecimiento de relaves, paso del tren) han “detonado” y acelerado el proceso tanto en las laderas naturales, línea férrea y canchas de relave. Debido a los factores detonantes ya mencionados, los materiales superficiales (incluido las relaveras), sufrieron un reacomodo formándose superficies discontinuas de asentamientos (agrietamientos y asentamientos en el terreno con desplazamientos máximos verticales de 0,16 m y horizontales de 0,11 m, respectivamente.
- c) Opinión Técnica “Comentarios al informe: Ingeniería de detalle para el cierre de los depósitos de relaves N° 1, 2 y la extensión sur de Tamboraque U.M. Coricancha, elaborado por SRK Consulting para NYRSTAR Coricancha S.A.” (Ingemmet, 2016). El trabajo indica que, los registros de piezómetros instalados en la zona confirman que la napa freática (alimentada por filtraciones de lluvias y riegos en la parte media y baja de la ladera del cerro Tamboraque) se encuentra relativamente profunda con respecto al nivel de cimentación de los depósitos de relaves, y se ubica por debajo del contacto con el basamento de roca.
El estudio elaborado por SVS (2014), concluyó que el remanente de relaves de dichos depósitos es físicamente estable y que efectuar el retiro de la totalidad de los relaves sería contraproducente para la estabilidad de la ladera inferior del cerro Tamboraque. Recomienda minimizar el uso de agua de riego en la ladera media inferior del cerro Tamboraque, continuar con el monitoreo geotécnico del área que fue afectada e iniciar los trabajos de cierre del remanente de los depósitos de relaves N° 1 y 2.
- d) Informe “Estabilidad de las laderas del cerro Tamboraque” (Fidel, 2016). El informe indica que, el INGEMMET, por intermedio de la Dirección de Geología

Ambiental y Riesgo Geológico, resalta la importancia de la continuación del monitoreo geotécnico actual y la implementación del monitoreo post cierre en temas de estabilidad física, estabilidad geoquímica, hidrogeológica y biológica. También considera que los trabajos realizados, desde el año 2008 a la actualidad, en el área de estudio, confirman la estabilidad actual del cerro Tamboraque.

- e) Informe Técnico N° A6755 realizado por “Evaluación de las defensas ribereñas del depósito de relaves Triana (SRK Consulting, 2016)” (Fidel, 2017). El objetivo del informe fue evaluar, según las competencias de INGEMMET, el informe “Evaluación de las defensas ribereñas del depósito de relaves Triana” preparado por SRK Consulting (Perú) S.A y entregado a NCSA a fines de 2016.

Según este informe, el río Rímac puede generar situaciones de riesgo, por ello que se planteó la construcción de una estructura de contención de concreto armado, a lo largo de la margen izquierda del río, colindante con el depósito Triana.

La quebrada Parac/Aruri genera situaciones de riesgo, por ello se planteó una estructura de protección de concreto ciclópeo a lo largo de la margen derecha del río colindante con el depósito Triana.

El dique debajo de la vía férrea fue construido por gravas areno arcillosas, un material permeable, susceptible a infiltraciones y a un posible colapso. La geodinámica de la zona indica que este evento podría represar al río Rímac originando un huaico de mayores proporciones.

En caso se retire el terraplén y se amplíe la sección del cauce del río Aruri a 10 m, las estructuras y medidas planteadas en este informe soportarían el paso de una avenida extraordinaria de 500 años.

- f) Boletín N° 76, serie C, geodinámica e ingeniería geológica: “Peligro geológico en la región Lima” (Luque *et al.*, 2020). De acuerdo con el mapa de zonas críticas por peligros geológicos, elaborado en este estudio, se tiene identificado como zona crítica el sector Tamboraque (distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí), el cual puede ser afectado por caída de rocas, deslizamientos y derrumbes.

De igual manera, se cuenta con un mapa regional de susceptibilidad por movimientos en masa, a escala 1: 500 000 (Luque *et al.*, 2020). Considerando este mapa, el área de estudio presenta terrenos con susceptibilidad alta y muy alta a la ocurrencia de movimientos en masa (figura 1). Entendiéndose por susceptibilidad a movimientos en masa como la propensión que tiene determinada zona a ser afectada por un determinado proceso geológico (movimiento en masa), expresado en grados cualitativos y relativos.

- g) Boletín N° 29, serie L, Actualización Carta Geológica Nacional (Escala 1: 50 000): “Geología del cuadrángulo de Matucana (hojas 24k2, 24k3, 24k4) (Mamani *et al.*, 2021). Este estudio realizado a escala 1: 50 000 muestra que en la zona de estudio existen depósitos fluvio-aluviales y rocas pertenecientes al Grupo Rímac (andesitas verdes y violáceas con brechas y volcanoclásticos).

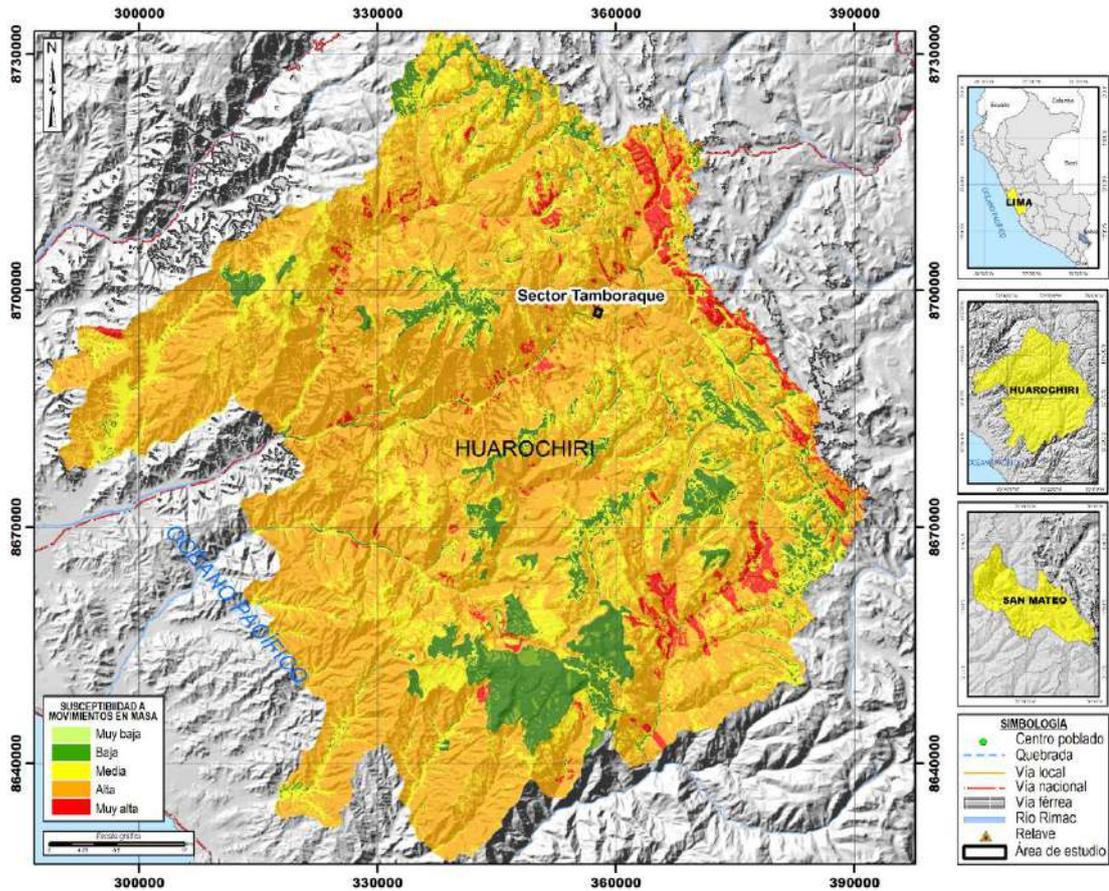


Figura 1. Susceptibilidad por movimientos en masa en el sector Tamboraque y alrededores (Luque *et al.*, 2020).

1.3. Aspectos generales

a) Ubicación

El sector Tamboraque, geográficamente, se sitúan en la confluencia del río Rímac con la quebrada Parac/Aruri. Políticamente pertenecen al distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí, departamento de Lima (figura 2).

Se encuentran a 2,5 Km aproximadamente de la localidad de San Mateo, frente a la Central Hidroeléctrica San Mateo de Huanchor.

Las coordenadas UTM (WGS84-Zona 18s) del área de estudio se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Coordenadas del área de evaluación

Vértice	UTM - WGS84 - Zona 18L		Geográficas	
	Este	Norte	Latitud	Longitud
1	357000	8698000	-11.774927°	-76.312440°
2	358510	8698003	-11.774964°	-76.298584°
3	358510	8696500	-11.788553°	-76.298648°
4	357000	8696499	-11.788498°	-76.312504°
COORDENADA CENTRAL DE LA ZONA EVALUADA O EVENTO PRINCIPAL				
Sector Tamboraque	358199	8697160	-11.782572°	-76.301473°

b) Población

Según el Censo Nacional 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas, la distribución poblacional en el distrito de San Mateo asciende a 4245 habitantes y 1871 viviendas censadas; sin embargo, el sector Tamboraque alberga una población de 49 habitantes y 35 viviendas.

Cuadro 3. Distribución poblacional de Tamboarque.

Distrito	Poblado	Población	Vivienda
San Mateo	Tamboraque	49	35

c) Accesibilidad

El acceso al sector Tamboraque (distrito San Mateo, provincia Huarochirí, departamento Lima), se realiza mediante el sistema vial metropolitano y provincial de Lima.

El recorrido total desde la sede central del Ingemmet (distrito San Borja) hasta el sector evaluado, es de 101 km aproximadamente, por un tiempo estimado de 3 h aproximadamente, siguiendo la ruta detallada en el cuadro 2.

Cuadro 2. Rutas y accesos a las áreas evaluadas.

Ruta	Tipo de vía	Distancia (km)	Tiempo estimado
San Borja (Lima) – Sector Tamboraque	Asfaltada	101	3 h

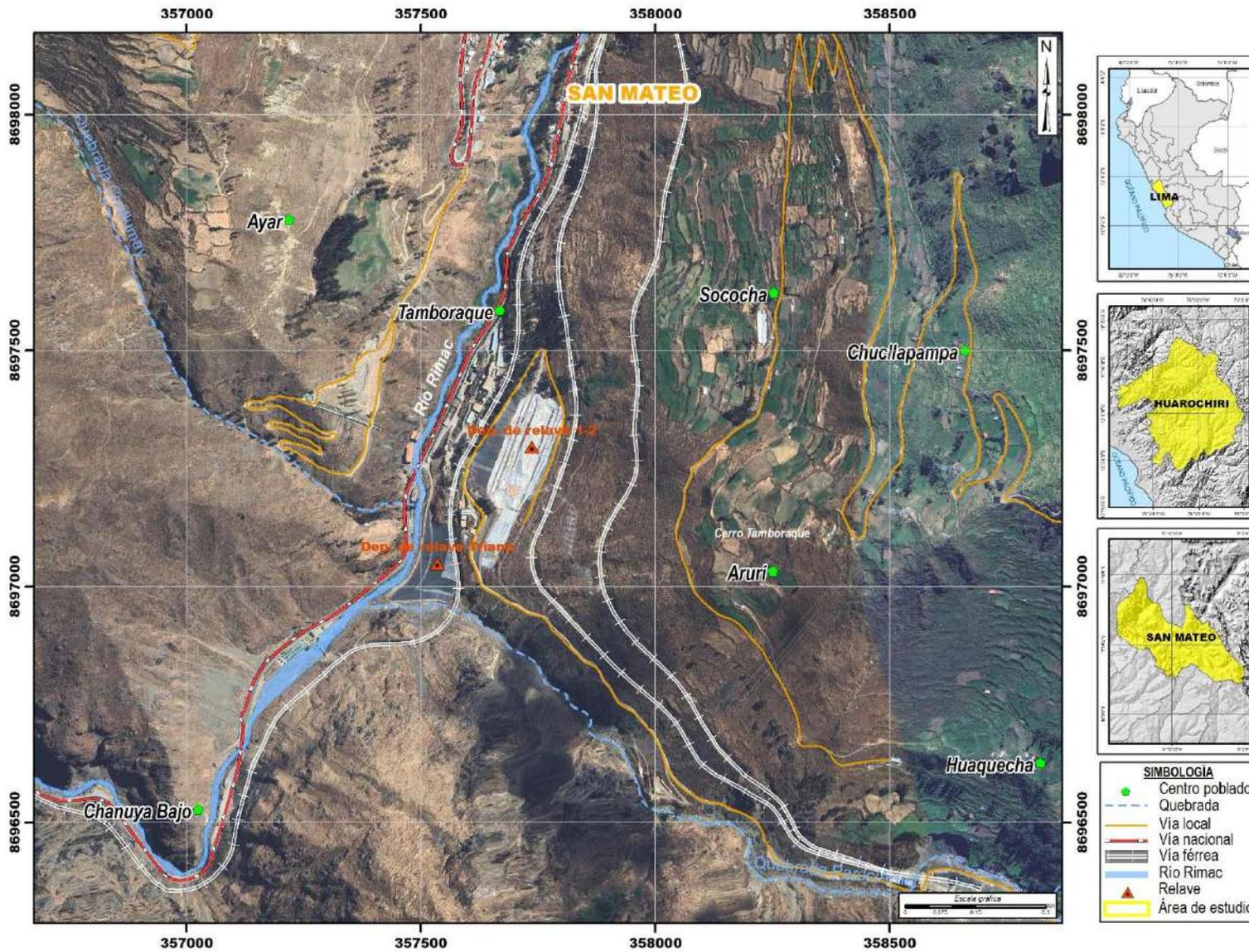


Figura 2. Ubicación del sector Tamboraque y alrededores.

d) Clima

De acuerdo con el Mapa climático del Perú, elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI, la zona de estudio presentan un clima de tipo semiseco, frío y con invierno seco. El mapa en mención indica que, durante el año este tipo de clima se caracteriza por presentar, en promedio, temperaturas máximas de 13°C a 17°C de y temperaturas mínimas de -7°C a 5°C. Además, los acumulados anuales de precipitación varían de 200 mm a 700 mm aproximadamente.

Según la información pluviométrica de la estación San José de Parac/Aruri (figura 3), se tienen registros históricos de precipitación máxima de 24 horas (Pmax24h). En base a esta información, se tiene registro desde el año 1979 hasta el 2015, siendo la precipitación máxima de hasta 29.1 mm en el año 1984, mientras que en el año 1992 se registró una precipitación máxima de hasta 13 mm.

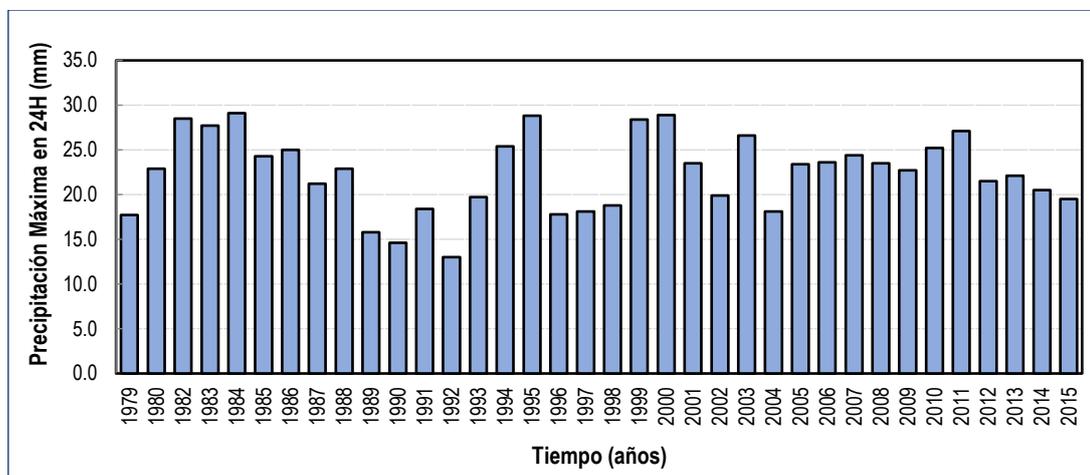


Figura 3. Histograma del registro histórico de la Estación San José de Parca. Fuente: (SENAMHI-ANA).

e) Uso de suelo

En el área de estudio las laderas están compuestas por suelos coluviales, deluviales y residuales. Sus espesores van desde superficiales hasta cerca de 40 a 50 m. Cubren un substrato rocoso volcánico escarpado a abrupto. Algunas remociones antiguas se presentan escalonados en pequeñas terrazas y espesores variables de suelo. Estos terrenos son aprovechados con cultivos de secano y/o riego por gravedad, y generalmente son de alfalfa.

Las áreas con bosques y plantaciones naturales son escasas, y solo se aprecian algunas zonas de las laderas que han sido forestadas, principalmente en las laderas medias inferiores. Se distinguen también grandes modificaciones en sus taludes, tanto por la construcción de carretera, línea férrea, así como por la disposición de relaves por la actividad minera. Muchos cortes y modificaciones de taludes en trazos y desarrollos de carretera, carretera afirmada que conduce a San José de Parac, reservorios y canal.

En relación al uso del suelo, la ladera del cerro Tamboraque y alrededores, está

ocupada parcialmente por la actividad agrícola, con algunos sectores eriazos en la parte superior, y sectores con disposición de residuos mineros, de la Unidad Minera Coricancha; en la parte inferior prima la zona industrial, metalúrgica hasta cerca del pie del valle.

f) Zonificación sísmica

El área de estudio se ubica en la Zona 3 (sismicidad alta), figura 4, localizada principalmente en la margen occidental de la Cordillera de los Andes, determinándose aceleraciones de 0.35 g (cuadro 3).

La zonificación propuesta, se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y atenuación de estos con la distancia epicentral, así como la información neotectónica. A cada zona se asigna un factor Z según se indica en el cuadro 3. Este factor se interpreta como la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años. El factor Z se expresa como una fracción de la aceleración de la gravedad (DS N° 003-2016-VIVIENDA).

Cuadro 3. Factores de zona Z

Zona	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

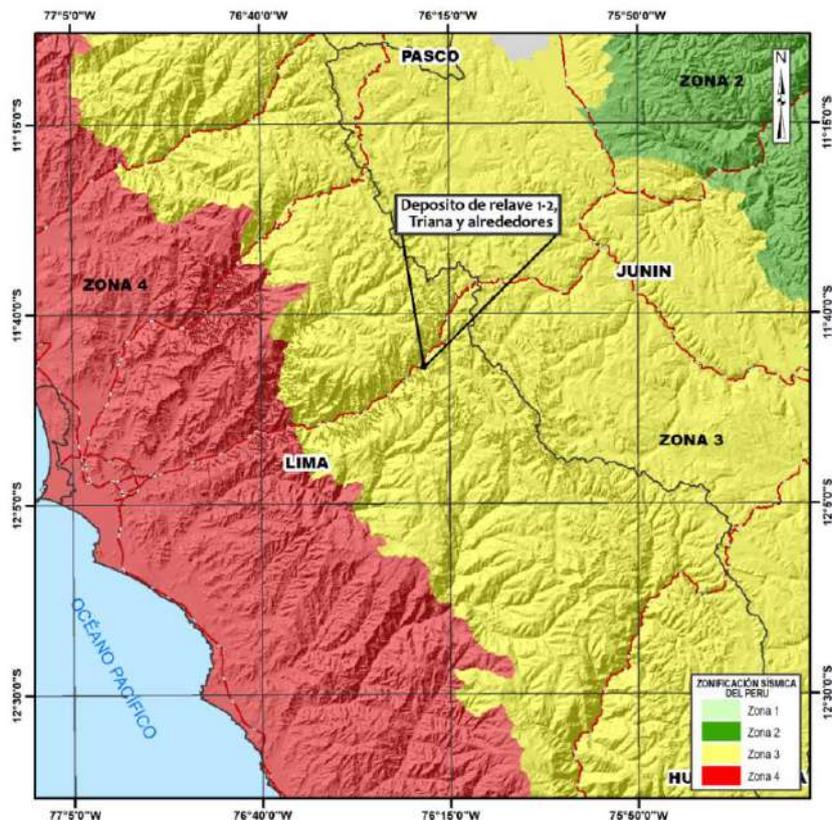


Figura 4. Zonificación sísmica del Perú.

Fuente: Norma sismorresistente NTE 030 del MVCS (2016).

2. DEFINICIONES

El presente informe técnico está dirigido a entidades gubernamentales en los tres niveles de gobierno, así como personal no especializado, no necesariamente geólogos. En el informe se desarrollan terminologías y definiciones vinculadas a la identificación, tipificación y caracterización de peligros geológicos, para la elaboración de informes y documentos técnicos en el marco de la gestión de riesgos de desastres. La terminología técnica utilizada, tiene como base el libro: "Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas" desarrollado en el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (2007), donde participó la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del Ingemmet. Los términos y definiciones se detallan a continuación:

Actividad de un movimiento en masa: Se refiere a tres aspectos generales del desplazamiento en el tiempo de la masa de material involucrado: el estado, la distribución y el estilo de la actividad. El primero describe la regularidad o irregularidad temporal del desplazamiento; el segundo describe las partes o anexos de la masa que se encuentran en movimiento; y el tercero indica la manera como los diferentes movimientos dentro de la masa contribuyen al movimiento total. El estado de actividad de un movimiento en masa puede ser: activo, reactivado, suspendido, inactivo latente, inactivo abandonado, inactivo estabilizado e inactivo relicto (WP/WLI, 1993).

Movimiento en masa activo: Movimiento en masa que actualmente se está moviendo, bien sea de manera continua o intermitente.

Movimiento en masa reactivado: Movimiento en masa que presenta alguna actividad después de haber permanecido estable o sin movimiento por algún periodo de tiempo.

Movimiento en masa suspendido: Movimiento en masa que se desplazó durante el último ciclo anual de las estaciones climáticas, pero que en el momento no presenta movimiento (Varnes, 1978).

Movimiento en masa antiguo: Movimiento en masa en el cual la masa de suelo o roca actualmente no presenta movimiento, o que no presenta evidencias de movimientos en el último ciclo estacional (WP/WLI, 1993).

Agrietamiento: Formación de grietas causada por esfuerzos de tensión o de compresión sobre masas de suelo o roca, o por desecación de materiales arcillosos.

Caída: Movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera. El material se desplaza por el aire, golpeando, rebotando o rodando (Varnes, 1978). Se clasifican en caídas de rocas, suelos y derrumbes.

Caída de rocas: Tipo de caída producido cuando se separa una masa o fragmento de roca y el desplazamiento es a través del aire o caída libre, a saltos o rodando.

Condicionante: se refiere a todos aquellos factores naturales o antrópicos que condicionan o contribuyen a la inestabilidad de una ladera o talud, pero que no constituyen el evento detonante del movimiento.

Cárcava: tipo de erosión concentrada en surcos que se forma por el escurrimiento de las aguas sobre la superficie de las laderas.

Cohesión: parámetro de resistencia de un suelo que expresa la fuerza por la cual las moléculas homogéneas de un cuerpo se adhieren unas con otras (Holtz y Kovacs, 1991).

Derrumbe: Son desprendimientos de masas de roca, suelo o ambas, a lo largo de superficies irregulares de arranque o desplome como una sola unidad, que involucra desde pocos metros hasta decenas y centenas de metros. se presentan en laderas de montañas de fuerte pendiente y paredes verticales a subverticales en acantilados de valles encañonados. También se presentan a lo largo de taludes de corte realizados en laderas de montaña de moderada a fuerte pendiente, con afloramientos fracturados y alterados de diferentes tipos de rocas; así como en depósitos poco consolidados.

Deslizamiento: Movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla (Cruden y Varnes, 1996). Según la forma de la superficie de falla se clasifican en traslacionales (superficie de falla plana u ondulada) y rotacionales (superficie de falla curva y cóncava).

Deslizamiento rotacional: Tipo de deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava. Los deslizamientos rotacionales muestran una morfología distintiva caracterizada por un escarpe principal pronunciado y, un contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal.

Detonante (sin.: disparador, desencadenante, gatillante): Acción o evento natural o antrópico, que es la causa directa e inmediata de un movimiento en masa. Entre ellos pueden estar, por ejemplo, los terremotos, la lluvia, la excavación del pie de una ladera y la sobrecarga de una ladera.

Erosión: Parte del proceso denudativo de la superficie terrestre que consiste del arranque y transporte de material de suelo o roca por un agente natural como el agua, el viento y el hielo, o por el hombre. De acuerdo con el agente, la erosión se puede clasificar en eólica, fluvial, glaciár, marina y pluvial. Por su aporte, de acuerdo a las formas dejadas en el terreno afectado se clasifica como erosión en surcos, erosión en cárcavas y erosión laminar.

Erosión de laderas: Se manifiesta a manera de láminas, surcos y cárcavas en los terrenos. Un intenso patrón de estos tipos de erosiones se denomina tierras malas o bad lands. Este proceso comienza con canales muy delgados cuyas dimensiones, a medida que persiste la erosión, pueden variar y aumentar desde estrechas y poco profundas (< 1 m) hasta amplias y de varios metros de profundidad.

Flujo: Movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978). Existen tipos de flujos como flujos de lodo, flujos de detritos (huaicos), avalanchas de rocas y detritos, crecida de detritos, flujos secos y lahares (por actividad volcánica).

Flujo de detritos (huaico): Flujo con predominancia mayor de 50% de material grueso (bloques, gravas), sobre los finos, que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada.

Formación geológica: es una unidad litoestratigráfica formal que define cuerpos de rocas caracterizados por sus propiedades litológicas comunes (composición y estructura) que las diferencian de las adyacentes.

Macizo rocoso Es el conjunto de material de roca in situ y sus discontinuidades. La presencia de discontinuidades de diverso tipo confiere al macizo un carácter heterogéneo y un comportamiento no continuo, condicionado por la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad de los cuales dependen el comportamiento geomecánico e hidráulico del mismo.

Meteorización: Se designa así a todas aquellas alteraciones que modifican las características físicas y químicas de las rocas y suelos. La meteorización puede ser física, química y biológica. Los suelos residuales se forman por la meteorización in situ de las rocas subyacentes.

Movimientos en masa: son procesos que incluyen todos aquellos movimientos ladera abajo, de una masa de rocas o suelos por efectos de la gravedad. En el territorio peruano, los tipos más frecuentes corresponden a caídas, deslizamientos, flujos, reptación de suelos, entre otros.

Peligro geológico: es un proceso o fenómeno geológico que podría ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales.

Susceptibilidad: propensión que tiene una determinada zona a ser afectada por un determinado proceso geológico, expresado en grados cualitativos y relativos. Los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos geodinámicos son intrínsecos (la geometría del terreno, la resistencia de los materiales, los estados de esfuerzo, el drenaje superficial y subterráneo, y el tipo de cobertura del terreno) y los detonantes o disparadores de estos eventos son la sismicidad y la precipitación pluvial.

Talud: Superficie artificial inclinada de un terreno que se forma al cortar una ladera, o al construir obras como por ejemplo un terraplén.

Zona crítica: Zona o área con peligros potenciales de acuerdo a la vulnerabilidad asociada (infraestructura y centros poblados), que muestran una recurrencia, en algunos casos, entre periódica y excepcional. Pueden presentarse durante la ocurrencia de lluvias excepcionales y puede ser necesario considerarlas dentro de los planes o políticas nacionales, regionales y/o locales sobre prevención y atención de desastres.

Zona de arranque: Zona de despegue, zona de desprendimiento. Área dentro de la cual el material desplazado se encuentra por debajo de la superficie original del terreno.

3. ASPECTOS GEOLÓGICOS

El análisis geológico de la zona de estudio se elaboró teniendo como base el Boletín N° 29, serie L, actualización Carta Geológica Nacional (escala 1: 50 000): "Geología del cuadrángulo de Matucana (hojas 24k2, 24k3, 24k4) (Mamani et al., 2021). Este estudio realizó la cartografía geológica a escala 1: 50 000, y muestra que en la zona de estudio afloran rocas pertenecientes al Grupo Rímac, así como depósitos aluviales y fluviales.

De igual manera, esta información se complementó con trabajos de interpretación de imágenes de satélite, vuelos de dron y observaciones en campo.

3.1. Unidades litoestratigráficas

Las unidades litoestratigráficas identificadas durante los trabajos de campo en la zona de estudio corresponden a rocas volcánicas del Grupo Rímac (Eoceno medio-Oligoceno) y depósitos del Cuaternario (**Anexo 1: Mapa 1**).

3.1.1. Grupo Rímac (P-r)

Esta unidad fue reconocida por Steinmann (1930), quien identificó, como Formación Rímac, a los afloramientos volcánicos del valle superior del río Rímac. Posteriormente, Salazar (1983) redefinió como Grupo Rímac a un conjunto de rocas volcánicas y sedimentarias. Palacios *et al.* (1992) describió bajo este nombre a rocas volcánicas principalmente piroclásticas y sedimentarias.

Litológicamente, está constituido por secuencias alternadas de lavas de composición andesítica, de coloración gris a gris violácea y textura porfirítica¹, gruesos niveles de depósitos piroclásticos de bloques y ceniza, de coloración gris blanquecina y gris verdosa, depósitos consolidados de cenizas rojizas y niveles estratificados de conglomerados y areniscas tobáceas (Mamani *et al.*, 2021).

Durante la inspección técnica, se identificaron afloramientos de andesitas masivas de coloración gris a gris violácea y textura porfirítica, medianamente a muy fracturadas, distinguiéndose por sectores entre tres a cuatro familias de fracturas. También estas unidades están moderadamente a altamente meteorizadas, por ejemplo, en la parte alta de los depósitos de relaves 1-2 (figura 5), así como en la margen derecha de la quebrada Parac/Aruri.

¹ Algunas rocas volcánicas tienen una mezcla de minerales de grano grueso rodeados por una matriz de material de grano fino en una textura llamada porfirítica. Los cristales grandes se llaman fenocristales. La textura porfirítica indica que el cuerpo de magma se sometió a un historial de enfriamiento de múltiples etapas, enfriándose lentamente desde lo profundo de la superficie y luego elevándose a una profundidad más superficial o la superficie donde se enfrió más rápidamente.



Figura 5. Afloramientos de andesitas masivas fracturadas y moderadamente meteorizadas. Vista de afloramiento ubicado al este de los depósitos de relaves 1-2.

3.1.2. Depósitos Cuaternarios

a) Depósito coluvio-deluvial (Q-cd)

Corresponde a materiales acumulados por movimientos en masa, como deslizamientos donde el principal agente de transporte ha sido la gravedad y la sobresaturación de los materiales. Se localizan de forma caótica en laderas por acción de la gravedad y acción de las aguas de escorrentía. Están constituidos por bloques y gravas de naturaleza litológica volcánica, angulosos a subangulosos, envueltos en una matriz limosa, acumulados en las laderas del cerro Tamboraque (fotografía 1 y 2), cubriendo el substrato rocoso conformado por rocas volcánicas del Grupo Rímac. Este tipo de depósito por su matriz limosa podría generar nuevos deslizamientos debido a sus propiedades geotécnicas particulares, especialmente en condiciones de lluvia intensa o saturación del suelo.



Fotografía 1. Depósito coluvio-deluvial identificado a un lado de la vía ferrea, donde se observan bloques y gravas de naturaleza volcánica angulosas a subangulosas envueltas en una matriz limosa



Forografía 2. Vista de deposito coluvio deluvial cubierto de vegetación, ubicada en la margen izquierda del río Rímac.

b) Depósito coluvial (Qh-co)

Son depósitos inconsolidados, compuestos por fragmentos de roca angulosos, heterométricos y de naturaleza litológica homogénea, en forma de conos o canchales.

Los bloques más gruesos se depositan en la base y los tamaños menores disminuyen gradualmente hacia el ápice. Carecen o tienen escasa matriz, son sueltos sin cohesión.

Conforman taludes de reposo poco estables y se encuentran acumulados al pie de taludes escarpados.

Este tipo de depósitos corresponden a procesos de caídas de rocas y derrumbes, como los identificados en la zona de estudio (fotografía 3).



Fotografía 3. Depósitos coluviales inconsolidados generados por caídas de rocas en la margen derecha del río Rímac, frente a la represa.

c) Depósito proluvio-aluvial (Q-pa)

Corresponde a secuencias de depósitos proluviales intercalados con niveles aluviales. Estas secuencias están compuestas por conglomerados y areniscas de ambiente continental; además, están dispuestas en forma de abanicos emplazados por el río Rímac. (figura 6). Son depósitos transportados por flujos de detritos o huaicos provenientes de la parte alta y canalizados por el río Rímac.

Se presentan medianamente compactos y son permeables, susceptibles a procesos de erosión fluvial por el río Rímac (ambos márgenes). También se tienen capas de gravas y arenas aluviales, así como niveles de arcillas inorgánicas de plasticidad media-alta, de influencia fluvial o llanura de inundación, conformando terrazas proluvio-aluviales con alturas de hasta 5 m, dispuestas en algunos sectores de la Carretera Central (figura 6).

d) Depósito fluvial (Q-fl)

Litológicamente corresponden a bloques y gravas redondeadas a subredondeadas de diferente composición envueltos en matriz arenosa y arenolimosas. Los bloques y gravas se componen de materiales aflorantes en gran parte del área de drenaje del río Rímac y la quebrada Parac/Aruri, correspondientes a rocas ígneas, volcánicas y, en menor proporción, de materiales sedimentarios.

Los depósitos fluviales identificados en el fondo del río Rímac y la quebrada Parac/Aruri (fotografía 4) son susceptibles a procesos de erosión e inundación en temporada de

lluvias extraordinarias, intensas y/o prolongadas, como las generadas por el Fenómeno El Niño y Yaku.



Figura 6. Vista Depósitos proluvio-aluviales conformado de gravas con bloques subredondeados, imagen del lado izquierda tomada en el 2008, imagen vista derecha tomada en 2024, , ubicada en la margen izquierda del río Rímac.



Fotografía 4. Depósitos fluviales ubicados en la margen izquierda de la quebrada Parac/Aruri. Se observan gravas redondeadas a subredondeadas de diferente composición.

e) Depósitos antrópicos (Q-an)

Corresponde a aquellos depósitos generados por la actividad humana.

Pueden ser de dos tipos:

- 1) Aquellos generados sin un proceso de transformación industrial, entre ellos se tienen las ruinas, desechos, coprolitos; construcciones civiles (terraplenes, diques de presas, enrocados, espigones, etc.)
- 2) los depósitos resultantes de procesos de transformación industrial, entre estos se tienen depósitos de relaves, desechos industriales, escorias, canchas de minerales, escombreras, entre otros.

En el área de estudio estos depósitos corresponden a los relaves de mina 1-2 y Triana, compuestos por arcillas limosas (fotografía 5).



Fotografía 5. Depósitos antrópicos que corresponden a los relaves de minas 1-2 (arriba) y Triana (abajo), ubicados en la margen izquierda del río Rímac, a la altura de la Central Hidroeléctrica de Huanchor.

4. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

Para el análisis geomorfológico, se utilizaron:

- Modelos digitales de terreno de 10 m de resolución (USGS).
- Modelos digitales de resolución 0.15 m obtenidos mediante sobrevuelo con dron.
- Imágenes satelitales para el estudio de la morfometría del relieve.
- Datos obtenidos durante los trabajos de campo.

Como parte de este análisis, se consideraron los rangos de pendientes establecidos por el Ingemmet (pendiente del terreno llano a muy escarpado) y elaborados en base a los modelos digitales del terreno, así como la caracterización de las unidades geomorfológicas en el área de estudio (criterios de control como: la homogeneidad litológica y la caracterización conceptual en base a aspectos del relieve en relación a la erosión, denudación y sedimentación).

4.1. Pendientes del terreno

La pendiente del terreno, es un parámetro importante en la evaluación de procesos por movimientos en masa, actúa como factor condicionante y dinámico en la generación de movimientos en masa.

En el **Anexo 1: Mapa 2**, se presenta el mapa de pendientes de terreno, elaborado en base a la información del modelo de elevación digital (DEM) de 10 m de resolución (USGS) (cuadro 4),

De acuerdo con este mapa y el rango de pendientes del terreno el área de estudio y alrededores presentan principalmente terrenos con pendiente moderada (5°-15°) a muy escarpado (>45°).

Mientras que, las laderas del cerro Tamboraque y alrededores, presentan pendientes que varían desde moderada (5°-15°) a muy escarpada (>45°). Este rango de pendientes es el resultado de una intensa erosión y desgaste de la superficie terrestre, en caso de sismos o cualquier otra vibración facilita la ocurrencia de movimientos en masa como caídas de rocas y/o derrumbes.

Cuadro 4. Rango de pendientes del terreno

Pendiente	Rango	Descripción
0°-1°	Llano	Son terrenos llanos que corresponden a depósitos Cuaternarios. Se distribuyen mínimamente en los cauces del río Rímac y la quebrada Parac/Aruri. Estos terrenos pueden ser susceptibles a procesos de inundación fluvial durante lluvias excepcionales.
1° a 5°	Inclinado-suave	Terrenos planos a ligeramente ondulados que se distribuyen a lo largo de los cauces del río Rímac y la quebrada Parac/Aruri. Estos terrenos están sujetos a inundaciones de tipo fluvial y pluvial (especialmente cuando se presenta el fenómeno de El Niño).

5° a 15°	Moderado	<p>Terrenos con moderada pendiente que presentan buena distribución en las laderas de las montañas, así como en las vertientes con depósitos de deslizamientos y vertientes coluvio-deluviales.</p> <p>Estos terrenos están sujetos a deslizamientos, derrumbes y procesos de erosión de ladera.</p>
15° a 25°	Fuerte	<p>Son pendientes que se distribuyen indistintamente en las laderas de las montañas; a su vez, estas inclinaciones condicionan la erosión de laderas en las vertientes o piedemontes, donde se registran procesos de deslizamientos, y derrumbes.</p> <p>El área de estudio presenta este rango de pendiente, así como las laderas del cerro Tamboraque y alrededores.</p>
25° a 45°	Muy fuerte a escarpado	<p>Terrenos con distribución restringida a la zona de montañas que ocupan áreas muy grandes de la zona de estudio.</p> <p>Las laderas de las montañas en roca volcánica presentan pendiente del terreno muy fuerte a escarpado y en estas zonas se podrían generar procesos como deslizamientos, derrumbes y erosión de laderas.</p>
>45°	Muy escarpado	<p>Ocupa áreas reducidas y distribuidas a lo largo de laderas y cumbres de montañas.</p> <p>Estos terrenos están sujetos a caídas de rocas y derrumbes por la pendiente del terreno muy escarpado.</p> <p>Este rango de pendiente se localiza en toda la zona de estudio y condiciona la ocurrencia de los procesos mencionados anteriormente.</p>

Fuente: Ingemmet (2019).

Cabe precisar que, también se elaboró otro mapa de pendientes y un mapa elevaciones elaborados en base a información del modelo de elevación digital (DEM) de 0.15 m. de resolución obtenido de sobrevuelos de dron para la zona de estudio (figura 7).

De acuerdo con el mapa de pendientes, en área de estudio se tienen principalmente terrenos con pendiente moderada (5°-15°) y muy escarpado (25°-45°), como en los depósitos de relave y laderas de los cerros, respectivamente.

Mientras que, según el mapa de elevaciones, en el área de estudio existen terrenos con alturas entre 2927 a 3301 m s.n.m, como en los cauces del río Rímac y la quebrada Parac/Aruri, respectivamente.

4.2. Índice topográfico de humedad

El índice topográfico de humedad (TWI) permite identificar los lugares potenciales donde se concentra la humedad o las zonas de acumulación de agua de escorrentía superficial. La obtención de este indicador está basada en el análisis morfológico del territorio pudiendo ser utilizado para la elaboración de inventarios de potenciales zonas húmedas o identificar los límites de las láminas de una masa de agua ya existente.

La obtención de este indicador fue realizada mediante una secuencia de análisis de modelos digitales de terreno (MDT) de alta resolución y precisión (obtenido de la fotogrametría del dron) y procesados en SAGA GIS.

En el mapa de acumulación de agua (TWI), figura 8, se observa que desde la parte alta del cerro Tamboraque, por donde desciende acumulación de agua hacia el noroeste - sureste, en dirección al río Rímac y la quebrada Parac/Aruri; la acumulación en algunos puntos es mayor donde predomina el color azul oscuro, el cual se desplaza por la vía férrea, vías, y los depósitos de relaves ubicados en dicha ladera; las mismas que tienden a depositarse y desplazarse mediante el cauce del río y la quebrada mencionada líneas arriba. Estas acumulaciones podrían incrementarse debido a la duración de las precipitaciones pluviales, el cual y podría generar un incremento de la inestabilidad.

De la misma manera en el cerro Pucrchacra y alrededores, ubicada en la margen derecha del río Rímac, se acumulación en algunos puntos de igual manera, esta se desplaza por la hidroeléctrica y discurren directamente al río.

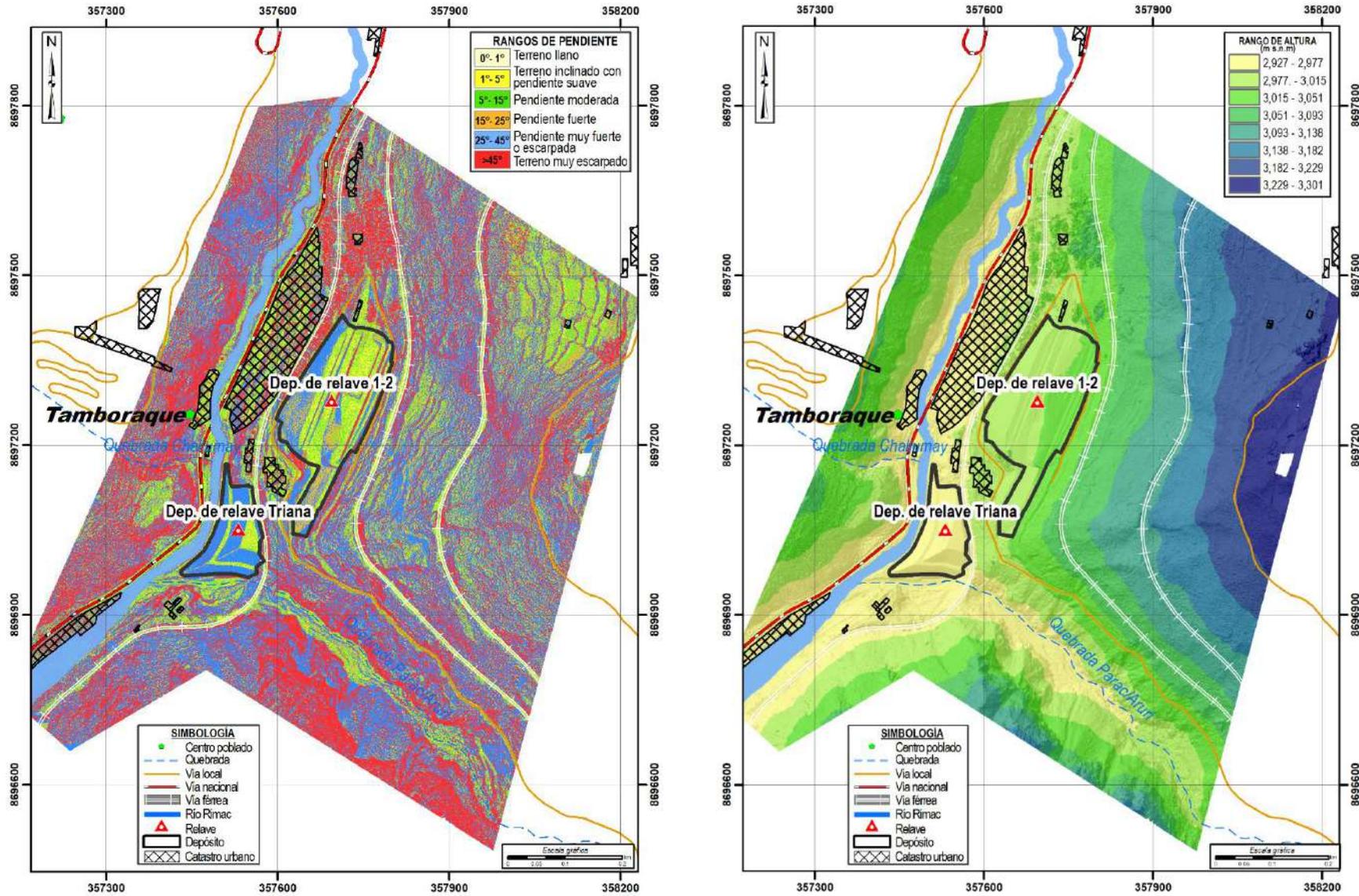


Figura 7. Mapas de pendiente del terreno (lado izquierdo) y elevación del terreno (lado derecho) elaborados en base a la información obtenida del levantamiento fotogramétrico con dron.

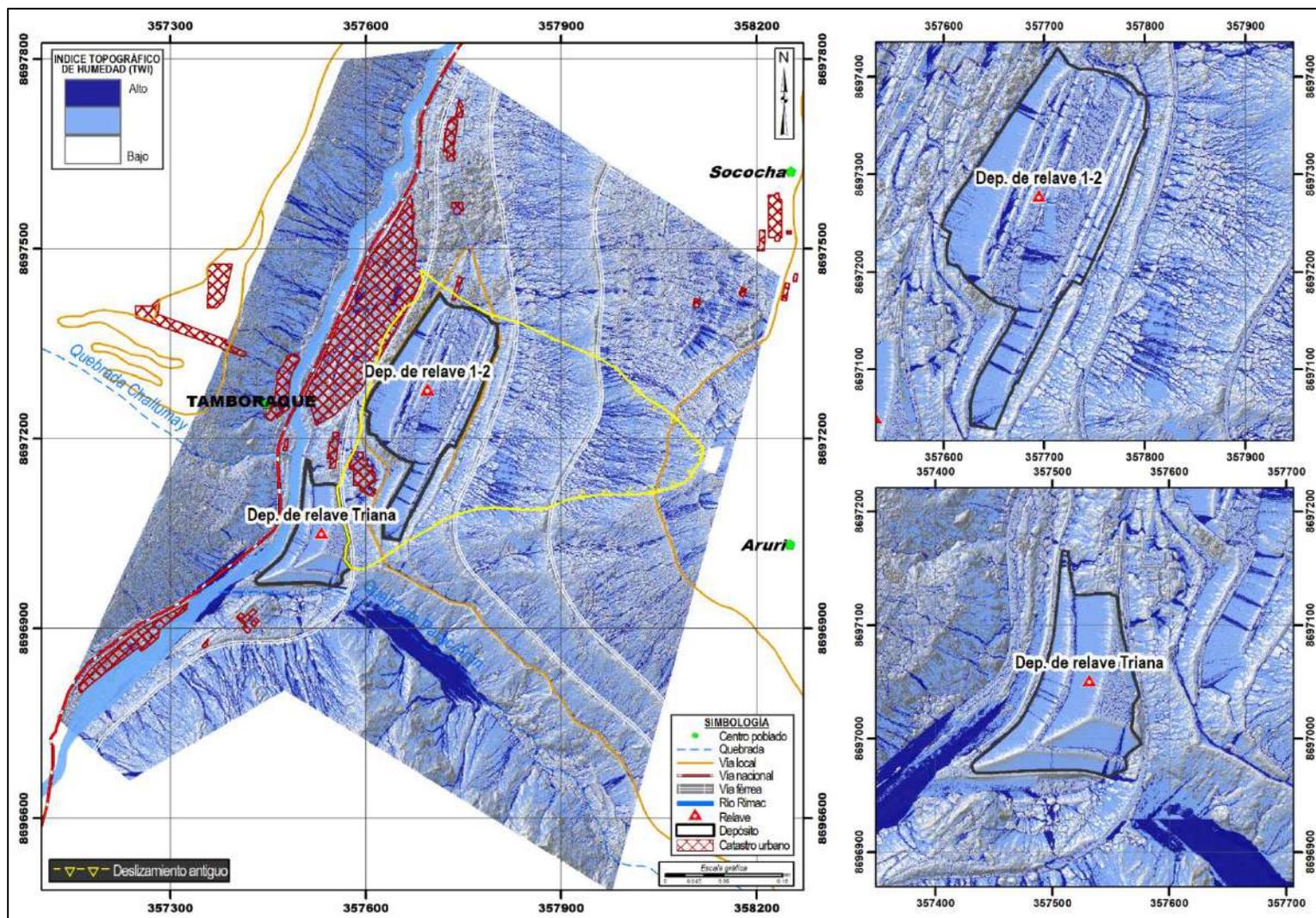


Figura 8. Mapa de la acumulación de agua (TWI) elaborado en base al modelo de elevación digital (DEM) de 0.15 m.

4.3. Unidades geomorfológicas

Para la caracterización de las unidades geomorfológicas en el área de estudio (**Anexo 1: Mapa 3**), se consideraron criterios de control como: la homogeneidad litológica y los aspectos del relieve en relación con la erosión, denudación y sedimentación; además se usó como referencia el mapa geomorfológico regional a escala 1: 250 000 elaborado por el Ingemmet.

En la zona evaluada y alrededores se han diferenciado las siguientes geoformas (Ver cuadro 5).

Cuadro 5. Unidades y subunidades geomorfológicas

Unidades geoformas de carácter tectónico degradacional y erosional	
Unidad	Subunidad
Montaña	Montaña en roca volcánica (RM-rv)
Unidades geomorfológicas de carácter depositacional o agradacional	
Unidad	Subunidad
Piedemonte	Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial (V-cd)
	Vertiente con depósito de deslizamiento (V-dd)
	Vertiente coluvial de detritos (V-co)
Planicie	Terraza proluvio-aluvial (T-pra)
Planicie inundable	Terraza fluvial (T-fl)
Geoformas particulares	Depósito antrópico (Dan)

Fuente: Elaboración propia

4.3.1. Geoformas de carácter tectónico degradacional y erosional

Resultan del efecto progresivo de los procesos morfodinámicos degradacionales, sobre los relieves iniciales originados por la tectónica o sobre algunos paisajes construidos por procesos exógenos agradacionales, estos procesos conducen a la modificación parcial o total de estos a través del tiempo geológico y bajo condiciones climáticas cambiantes (Villota, 2005).

Los paisajes morfológicos, resultantes de los procesos denudativos forman parte de las cadenas montañosas, colinas, superficies onduladas y lomadas. Dentro de este grupo se tiene la siguiente unidad:

A) Unidad de montaña

Se considera dentro de esta unidad a las geoformas con alturas mayores a los 300 m respecto al nivel de base local. Sus laderas presentan un pendiente promedio superior al 30 % (Villota, 2005). Es la unidad o componente de cualquier cadena montañosa y se define como una gran elevación natural del terreno, de diverso origen, con más de 300 m de desnivel, cuya cima puede ser aguda, subaguda, semiredondeada, redondeada o tabular y cuyas laderas regulares,

irregulares a complejas y que presenta un declive promedio superior al 30% (FAO, 1968, citado por Villota, 2005, p. 43).

Subunidad de montaña en roca volcánica (RM-rv)

Corresponde a geformas modeladas en rocas volcánicas del Grupo Rímac. Esta subunidad presenta pendiente del terreno fuerte (15° - 25°) a muy escarpado ($>45^{\circ}$), por ello son relieves susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos, derrumbes y/o caídas de rocas. Estos relieves litológicamente están conformados por andesitas masivas y secuencias tobáceas, de coloración gris a gris violácea y textura porfirítica (figura 8).



Figura 9. Montañas modeladas en rocas volcánicas, al frente del cerro Tamboraque, cuyas laderas presentan pendiente muy fuerte a muy escarpado.

4.3.2. Geformas de carácter depositacional y agradacional

Estas geformas son resultado del conjunto de procesos geomorfológicos a los que se les denomina “agradacionales o constructivos”. Son determinados por fuerzas de desplazamiento, como por agentes móviles, tales como: el agua de escorrentía, los vientos y glaciares. Tienden a nivelar hacia arriba la superficie de la tierra, mediante el depósito de materiales sólidos resultantes de la denudación de terrenos más elevados (Villota, 2005). Dentro de este grupo se tienen las siguientes unidades:

A) Unidad de piedemonte

Los piedemontes corresponden a un conjunto de depósitos conformando una superficie inclinada y disectada que se extiende al pie de sistemas montañosos y que ha sido formada por la depositación sucesiva de materiales transportados por

corrientes de agua desde los terrenos más elevados hacia las zonas más bajas y abiertas (Villota, 1991).

Dentro de esta unidad se tienen las siguientes subunidades:

Subunidad piedemonte coluvio deluvial (P-cd)

Son geoformas originadas por la acumulación intercalada de materiales de origen coluvial (por gravedad) y deluvial (con presencia de agua). Se encuentran interestratificados y no es posible separarlas como unidades individuales.

Están compuestos principalmente por fragmentos líticos de rocas volcánicas heterométricas. Estas geoformas se encuentran ampliamente desarrolladas en las laderas de montañas, con pendientes predominantes de moderada (5°-15°) a fuerte (25°-45°) del terreno, fáciles de remover.

Geodinámicamente, este tipo de geoformas o relieves están asociados a la ocurrencia de movimientos en masa de tipo deslizamiento, como el deslizamiento identificado al este del depósito de relave 1-2 (figura 10).

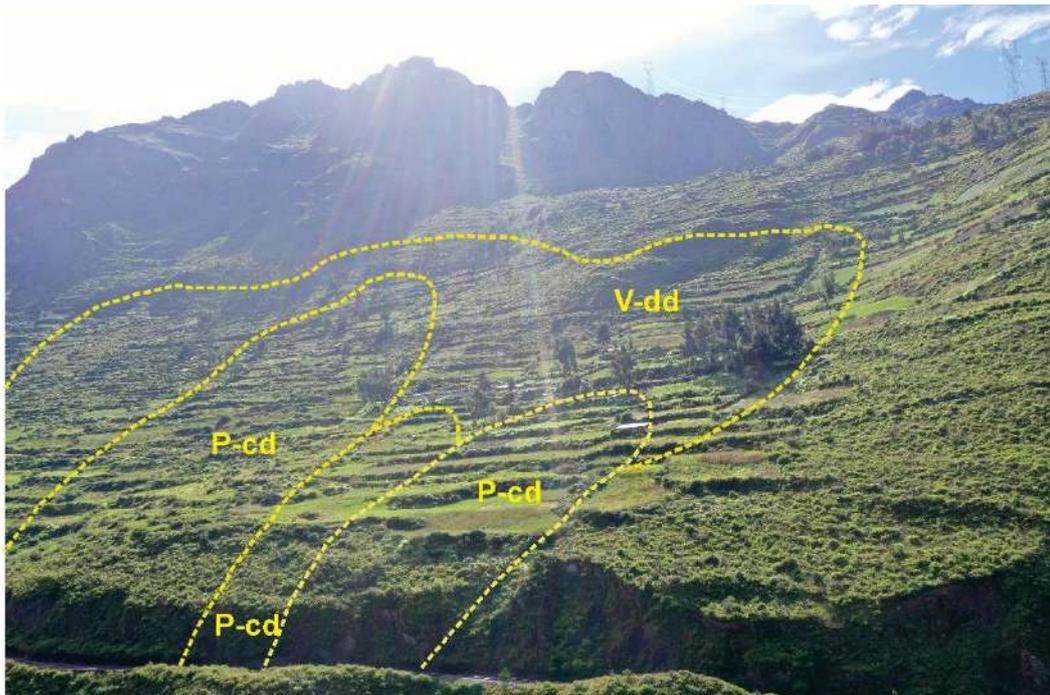


Figura 9. Vista de depósitos coluvio-deluviales, ubicado en el sector Sococha, margen izquierda del río Rimac.

Sub unidad de vertiente con depósito de deslizamiento (V-dd)

Corresponde a las acumulaciones de ladera originadas por procesos de movimientos en masa, prehistóricos, antiguos y recientes, que pueden ser del tipo deslizamientos (en el anterior ya están incluidos, deslizamientos, caídas, avalancha de rocas y/o movimientos complejos. Generalmente su composición litológica es homogénea; con materiales inconsolidados a ligeramente

consolidados, de corto a mediano recorrido relacionados a las laderas superiores adyacentes.

Su morfología es usualmente convexa y su disposición semicircular a elongada en relación a la zona de arranque o despegue del movimiento en masa. Se relacionan con rocas de diferente naturaleza litológica, ya que es posible encontrarlas comprometiendo diferentes tipos de roca. Geodinámicamente se asocia a reactivaciones en los materiales depositados por movimientos en masa antiguos, así como por nuevos aportes de material provenientes de la actividad retrogresiva de eventos activos, presentan pendientes con terrenos moderadas (5° - 15°) a fuertes (15° - 25°).

Subunidad de piedemonte coluvial de detritos (P-c)

Corresponde a las geofomas originados por procesos gravitacionales, varían de pequeños a grandes dimensiones, probablemente detonados por lluvias excepcionales y/o prolongadas o actividad sísmica (figura 11).

Está relacionada a la combinación de geofomas formadas por la acumulación de depósitos de movimientos en masa recientes y acumulaciones de material movilizado por la gravedad que se acumulan lentamente al pie de las montañas. Al dependerse van formando aglomeraciones de bloques sueltos que adoptan una forma semicónica.

Se les denomina conos cuando se presentan como un depósito único, y “talus de detritos” cuando se presentan como varios conos acomodados de forma sucesiva. Los materiales coluviales acomodados al pie de acantilados o laderas tienen un ángulo de reposo de 35° aproximadamente. Por otro lado, cuando los fragmentos presentan tamaños variados, estos se disponen en un patrón selectivo, con los bloques de mayor tamaño hacia la base debido a su mayor momento y a su facilidad para rodar; los fragmentos más pequeños se ubican hacia el ápice del depósito.



Figura 11. Vertiente coluvial de detritos formada por depósitos de caída de rocas, ubicadas en la margen derecha del río Rímac, en las laderas de las montañas en roca volcánica.

B) Unidad de planicie

Corresponde a superficies planas con ligeras onduladas. Está asociada a depósitos aluviales, proluviales y fluviales, limitados en muchos casos por depósitos de piedemonte y laderas de montañas o colinas.

Dentro de esta unidad se tiene la siguiente subunidad:

Sub unidad de terraza proluvio-aluvial (T-pra)

Geoforma de origen denudacional y/o depositacional, formada por la depositación rápida de materiales transportados por flujos que se activan estacionalmente; corresponden a las terrazas ubicadas en ambos márgenes del río Rímac.

Esta constituida por intercalaciones de secuencias de bloques y gravas subredondeadas a subangulosas de litología heterogénea, heterométricos y mal clasificados, envueltos en una matriz arcillosa a limoarcillosa.

Las terrazas presentan alturas que varían de 2.4 m a 8 metros aproximadamente, en la margen izquierda del río Rímac, sobre esta unidad se observaron arboles (figura 12).



Figura 12. Vertiente terraza proluvio-aluvial en ambas márgenes del río Rímac, sobre esta subunidad se observan arboles; los cuales presentan inclinación.

C) Unidad de planicie inundable

Son superficies bajas, adyacentes al fondo del valle de los ríos y al mismo curso fluvial, sujetas a inundaciones recurrentes, ya sean estacionales o excepcionales. Morfológicamente, por lo general se distinguen como terrenos planos compuestos de material gravo-arenoso con limos, no consolidado y removible con cada subida estacional de caudal del río.

Dentro de esta unidad se tiene la siguiente subunidad:

Sub unidad de terraza fluvial (T-fl)

Se caracteriza por presentarse dentro del curso del río Rímac o la quebrada Parac/Aruri. Litológicamente está compuesta por fragmentos rocosos heterogéneos (bolones, cantos gravas, arenas, etc.) que son transportados por la corriente fluvial, y se depositan formando terrazas bajas (figura 13), también conforman la llanura de inundación o el lecho del río y/o quebrada en mención.



Figura 13. Se observa una terraza fluvial en la margen izquierda de la quebrada Para/Aruri. Creo los límites de la terraza no son correctos

D) Unidad de geoformas particulares

Esta geoforma también son resultados de procesos geológicos constructivos, determinados por fuerzas de desplazamiento, como agentes móviles tales como el agua de escorrentía y vientos, que permiten el desarrollo urbanístico y poblacional.

Dentro de esta unidad se tiene la siguiente subunidad:

Sub unidad de depósito antrópico (Dan)

Dentro de esta unidad se consideran las formas resultantes de la modificación o alteración del paisaje por actividades realizadas por el hombre.

Este tipo de geoformas se encuentran, en la zona evaluada, conformando depósitos de relaves, y depósitos asociados a la actividad de la hidroeléctrica, represa y algunas viviendas, ubicadas en ambas márgenes del río Rímac (fotografía 6)

Mientras que, en la quebrada Parac/Aruri se observó un depósito de relave ubicada en la confluencia del río Rímac y aguas arriba, así como una planta de chancado. (figura 14), ubicado entre las coordenadas UTM 8696373 N, 358537 E, con una altitud de 3082 m s.n.m.



Fotografía 6. Vista hacia el noreste, donde se observa depósito originado por actividades realizadas por el hombre (Dan), en ambas márgenes del río Rímac.



Figura 14. Vista de confluencia del río Rímac y la quebrada Para/Aruri, se observa depósito de relave, y aguas arriba se identificó Chancadora de la Unidad Minera Coricancha ubicada en la margen derecha.

5. PELIGROS GEOLÓGICOS

Los peligros geológicos identificados en el sector Tamboraque y alrededores, corresponden a movimientos en masa, tipo: deslizamiento, flujo de detritos o huaico, caída de rocas y derrumbe (Proyecto Multinacional Andino: GCA, 2007) (**Anexo 1: Mapa 1**); así como peligros geohidrológicos de tipo erosión fluvial y otros peligros geológicos como erosión de laderas (cárcavas).

La cartografía geodinámica de la zona de estudio permitió diferenciar procesos de movimientos en masa antiguos y evidencias de movimientos activos, asociados a eventos de tipo deslizamiento, derrumbe y caída de rocas.

En la zona de estudio se identificaron 17 deslizamientos; 9 de estas ubicadas en el cerro Tamboraque, las cuales se detallan en el cuadro 6, se identificaron características topográficas y morfológicas, que indican la existencia de deslizamientos antiguos, el cual fue caracterizado por Zavala *et al.* (2008).

Evidencia de la ocurrencia de estos movimientos en masa, en la zona de estudio, es la presencia de:

- Depósitos de movimientos en masa antiguos originados por deslizamientos, caídas de rocas y derrumbes, identificados en ambas márgenes del Rímac (entre San Mateo y la CC HH de Huanchor) así como en la quebrada Parac/Aruri.
- Geoformas de vertiente o piedemonte asociadas a deslizamientos, caídas de rocas y derrumbes, en ambas márgenes del río Rímac y en la quebrada Parac/Aruri, así como de otras quebradas tributarias.
- Escarpas de deslizamientos antiguos en la ladera del cerro Tamboraque, y zonas de arranque asociadas a depósitos de caídas de rocas y derrumbes, frente al cerro Tamboraque.

La caracterización de estos procesos se realizó en base a la información obtenida durante los trabajos de campo, la cartografía geológica, geomorfológica y geodinámica, la observación y descripción morfométrica in situ. También se utilizaron los puntos de control GPS, las fotografías mediante cámara digital y dron, así como el análisis de imágenes satelitales de alta resolución disponibles en SASPlanet.

Cabe precisar que los peligros geológicos identificados se vienen produciendo por factores condicionantes o intrínsecos, tales como la geometría del terreno, pendiente y el tipo de roca y/o suelo; también asociados a factores desencadenantes o detonantes (lluvias, sismos, actividad antrópica, entre otros).

5.1. Deslizamientos en el sector Tamboraque

Los nueve deslizamientos identificados en el cerro Tamboraque se encuentra entre las cotas 3610 y 2970 m s.n.m. aproximadamente. Presenta una forma triangular, con ápice en la escarpa principal (zona de arranque del deslizamiento), que se abre hacia ambos lados, existiendo en ambos limites la presencia de substrato rocoso (figuras 15 y 16).

En la zona del escarpe principal (parte alta del deslizamiento), se evidencian afloramientos rocosos de tipo andesita, pertenecientes al Grupo Rímac, los cuales se pueden apreciar en los cortes de la vía férrea.

Se realizó un inventario de deslizamientos en el sector Tamboraque y alrededores (figura 17), el cual se detalla en el cuadro 6 y 7.

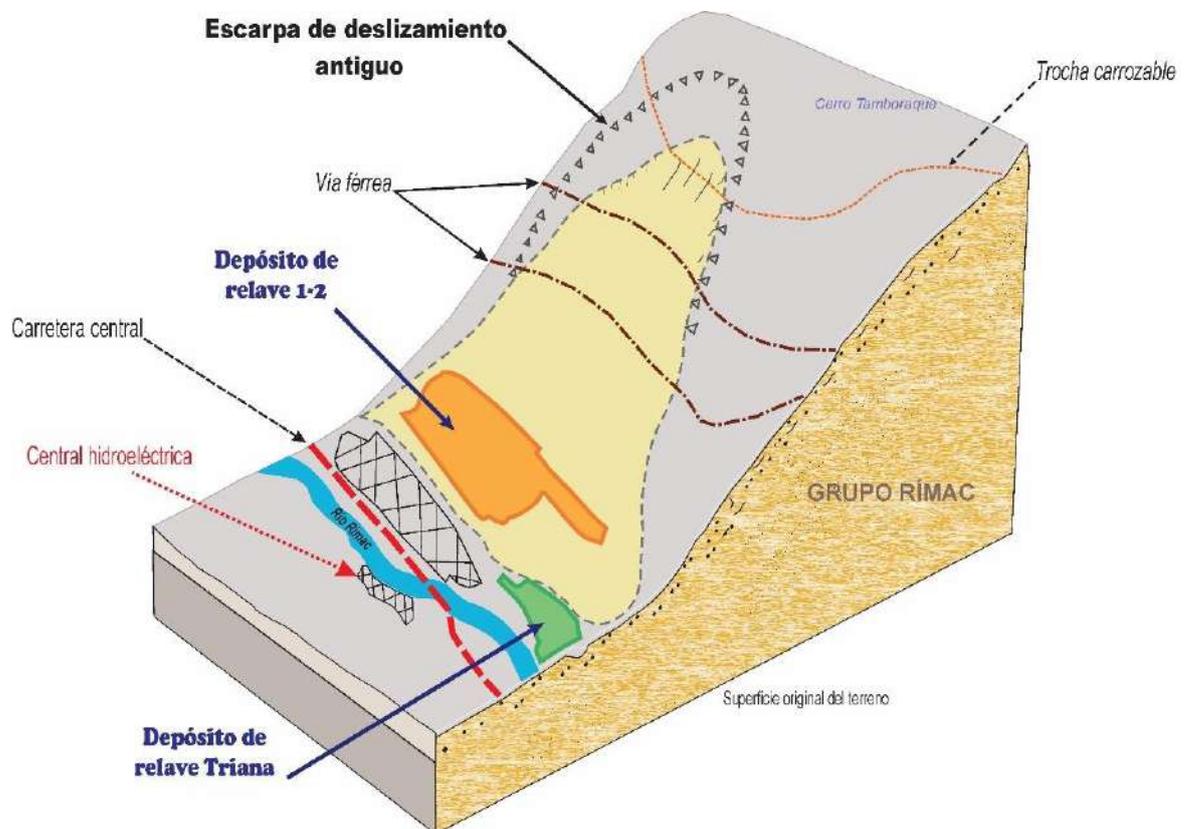


Figura 15. Diagrama del deslizamiento antiguo ubicado al este de los relaves 1-2. Se evidencia el escarpe principal, así como el depósito del deslizamiento (polígono de color amarillo).

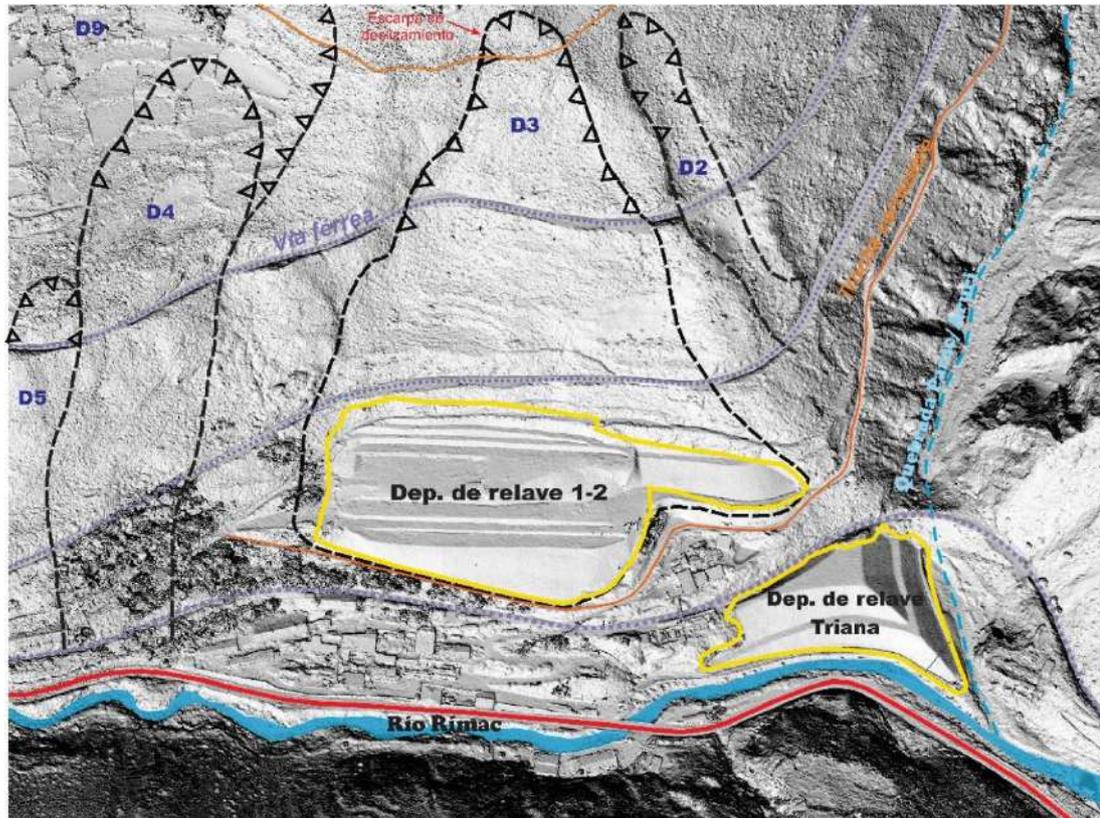


Figura 16. Deslizamientos antiguos (línea discontinua negra) ubicado en el cerro Tamboraque, margen izquierda del río Rímac.

Cuadro 6. Inventario de deslizamientos en la zona de trabajo

Cod°	Coordenadas UTM - WG84			Estado de la actividad	Ubicación	Referencia
	Norte	Este	Cota			
D1	8697140	358987	3557	Antiguo	Cerro Tamboraque	Margen izquierda del río Rímac
D2	8697045	358051	3209	Antiguo	Cerro Tamboraque	
D3	8697159	358081	3257	Antiguo	Cerro Tamboraque	
D4	8697399	358144	3290	Antiguo	Cerro Tamboraque	
D5	8697563	358026	3176	Antiguo	Cerro Tamboraque	
D6	8697647	358328	3265	Antiguo	Cerro Tamboraque	
D7	8697351	358913	3550	Antiguo	Cerro Tamboraque	
D8	8697954	358318	3279	Antiguo	Cerro Tamboraque	
D9	8698003	358256	3253	Antiguo	Cerro Tamboraque	
D10	8699067	356816	3630	Antiguo	Cerro s/n	Margen derecho del río Rímac
D11	8698998	357241	3415	Activo	Cerro Pucruchacra	
D12	8698785	357298	3355	Activo	Cerro Pucruchacra	
D13	8698914	357956	3077	Activo	M.D río Rímac	
D14	8698748	357965	3043	Activo	M.D río Rímac	
D15	8697777	357144	3320	Antiguo	Cerro s/n	
D16	8697416	357347	3074	Antiguo	Cerro s/n	
D17	8698150	356777	3467	Antiguo	Cerro s/n	
D18	8697106	357242	3075	Antiguo	Cerro s/n	

*La codificación se realizó en base aleatoria, no de forma cronológica.

Cuadro 7. Evidencias visuales del movimiento en masa.

Cod°	Forma de escarpa	Longitud de la escarpa (m)	Desnivel entre escarpa y pie (m)	Ancho del cuerpo (m)	Superficie
D1	Semicircular	712	811	347	Rotacional
D2	Semicircular	97	312	48	Rotacional
D3	Semicircular	598	491	178	Rotacional
D4	Semicircular	295	502	129	Rotacional
D5	Semicircular	151	343	70	Rotacional
D6	Semicircular	360	600	118	Rotacional
D7	Semicircular	150	499	89	Rotacional
D8	Semicircular	285	236	167	Rotacional
D9	Elongada	1685	1258	752	Rotacional
D10	Semicircular	303	485	162	Rotacional
D11	Semicircular	274	421	166	Rotacional
D12	Semicircular	279	87	206	Rotacional
D13	Semicircular	89	25	65	Rotacional
D14	Elongada	1798	1235	1329	Rotacional
D15	Semicircular	391	512	274	Rotacional
D16	Semicircular	53	246	35	Rotacional
D17	Semicircular	165	161	137	Rotacional
D18	Semicircular	184	189	79	Rotacional

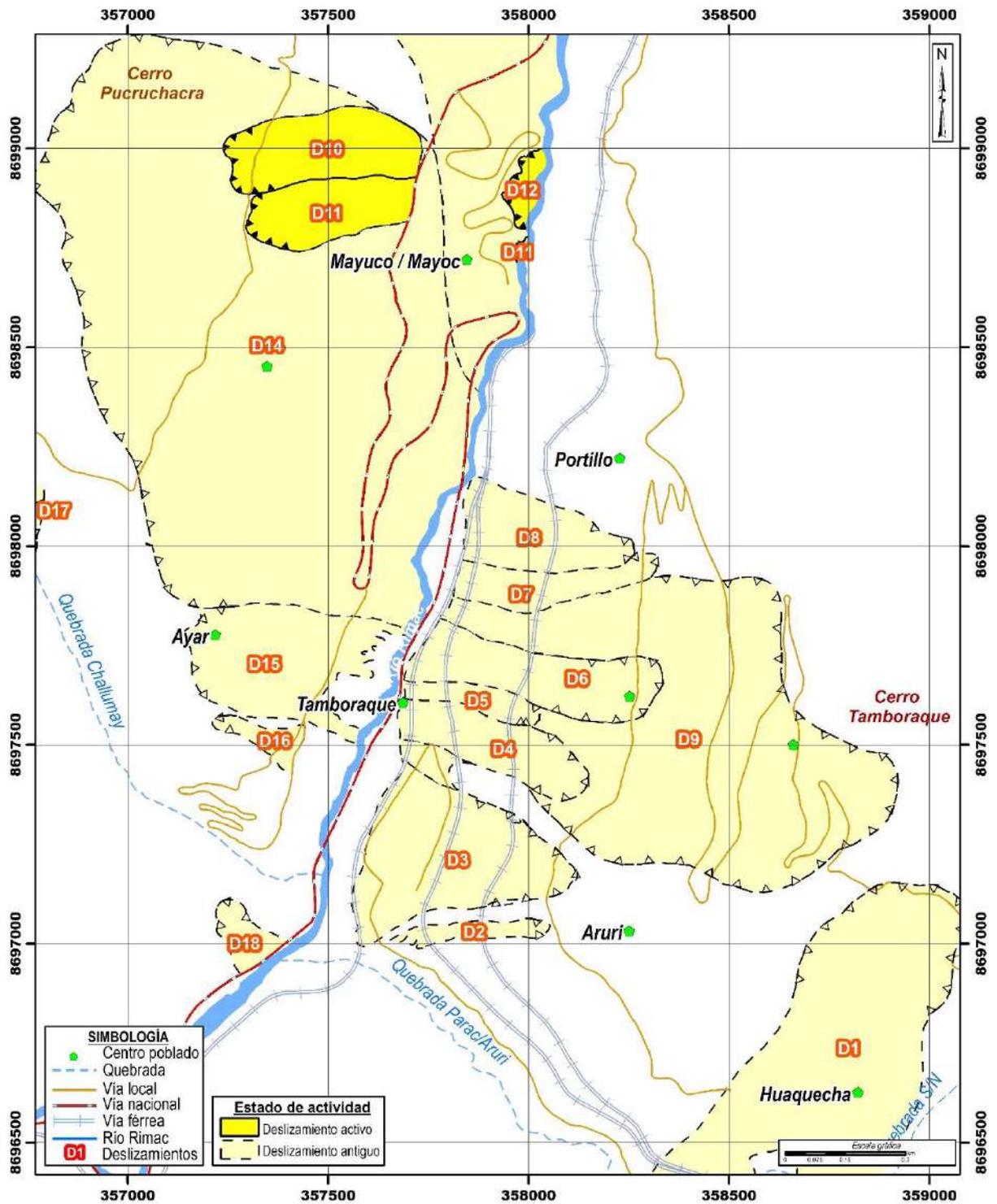


Figura 17. Inventario de deslizamientos del sector Tamboraque y alrededores, donde se identificaron un total de dieciocho deslizamientos, 09 deslizamientos en la margen izquierda del río Rimac y 09 en la margen derecha del río, de las cuales 04 de estas se encuentran activas.

El depósito del deslizamiento antiguo presenta una superficie con pendiente promedio de hasta 45° debido al material depositado en la ladera del cerro Tamboraque. Por ejemplo, en la figura 18 se puede observar la pendiente de hasta 45° a la altura de la vía férrea, ubicada al este de los depósitos de relave 1-2.



Figura 18. Pendiente del terreno de hasta 45° en el depósito del deslizamiento antiguo. Vista hacia el noreste, ubicada en una margen de la vía férrea.

Características visuales de los deslizamientos

Los deslizamientos identificados en el sector de Tamboraque y alrededores presenta las siguientes características (figura 19):

- Estado de actividad: Activos y Antiguos
- Estilo de las escarpas: Semicircular y elongadas
- Forma de la escarpa: Semicircular y elongadas
- Longitud de la escarpa principal: Varían de 89 m a 1798 m (**ver** cuadro 7)
- Desnivel entre la escarpa y el pie de los deslizamientos: Varían de 87 m a 1258 m.
- Superficie de rotura inferida: rotacional
- Salto principal o desplazamiento vertical (DV): 2 m a 15 m
- Velocidad del movimiento: Lento
- Pendiente promedio del terreno: >25°
- Área de deslizamientos: Varían de 0.1 a 86.7 ha, aproximadamente.
- Agrietamientos: Al momento de realizar la evaluación no se evidenció.

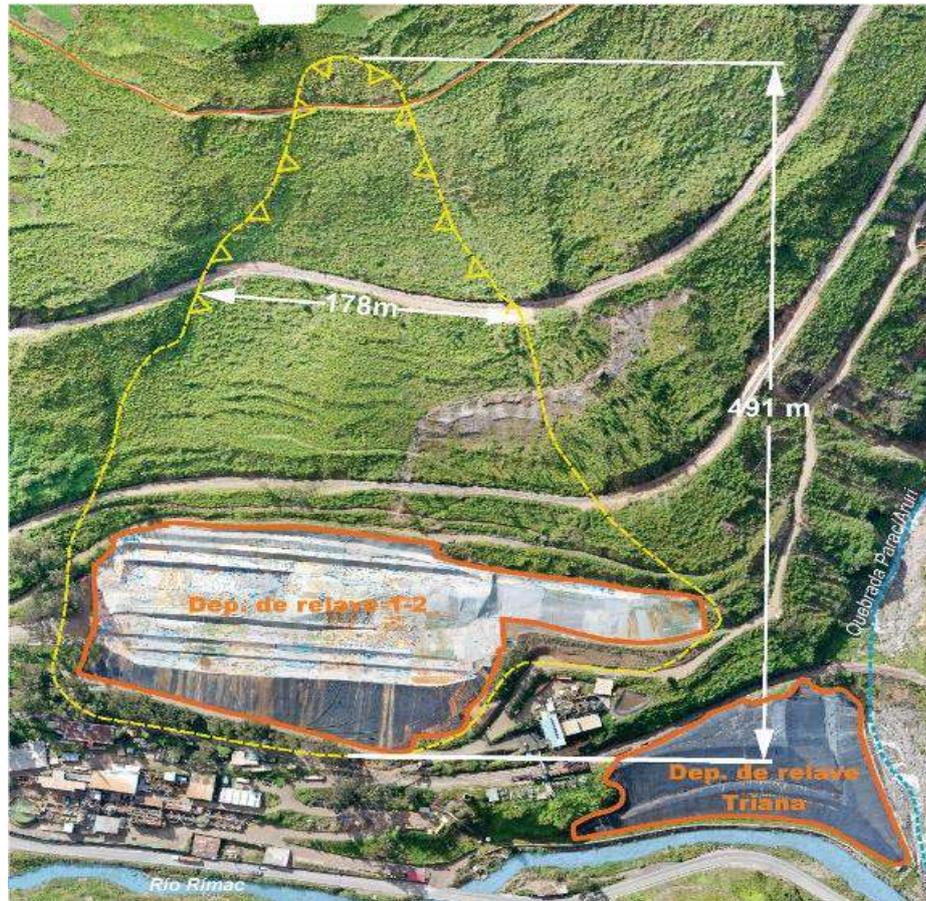


Figura 19. Imagen tomada con dron que evidencia el deslizamiento antiguo (línea discontinua amarilla) con un desnivel (diagonal) entre la escarpa principal y el pie del deslizamiento de 491 m.

En la figura 20, se realizó un análisis multitemporal del deslizamiento D3, utilizando imágenes satelitales de Google Earth de los años 2005 al 2023, se puede apreciar el deslizamiento antiguo (línea discontinua amarilla), donde se aprecia modificación de terreno. Para el año 2005 se evidencia que, en la parte media – baja, la modificación por la parte antrópica, con el objetivo de la construcción de un depósito, en el 2010 y 2013 se observa en la ladera ausencia de vegetación.

Para los años 2017, 2021 y 2023, no se evidencian variaciones visuales en las laderas colindantes del río Rímac y la quebrada Parac/Aruri

Cabe precisar que, durante los años 2005 al 2023, el deslizamiento D3 ha permanecido estable visualmente; sin embargo, ante movimientos sísmicos de moderada a fuerte magnitud se podría generar la reactivación de los deslizamientos, así como la generación de nuevos procesos de caídas de rocas y derrumbes en toda el área de estudio y alrededores.

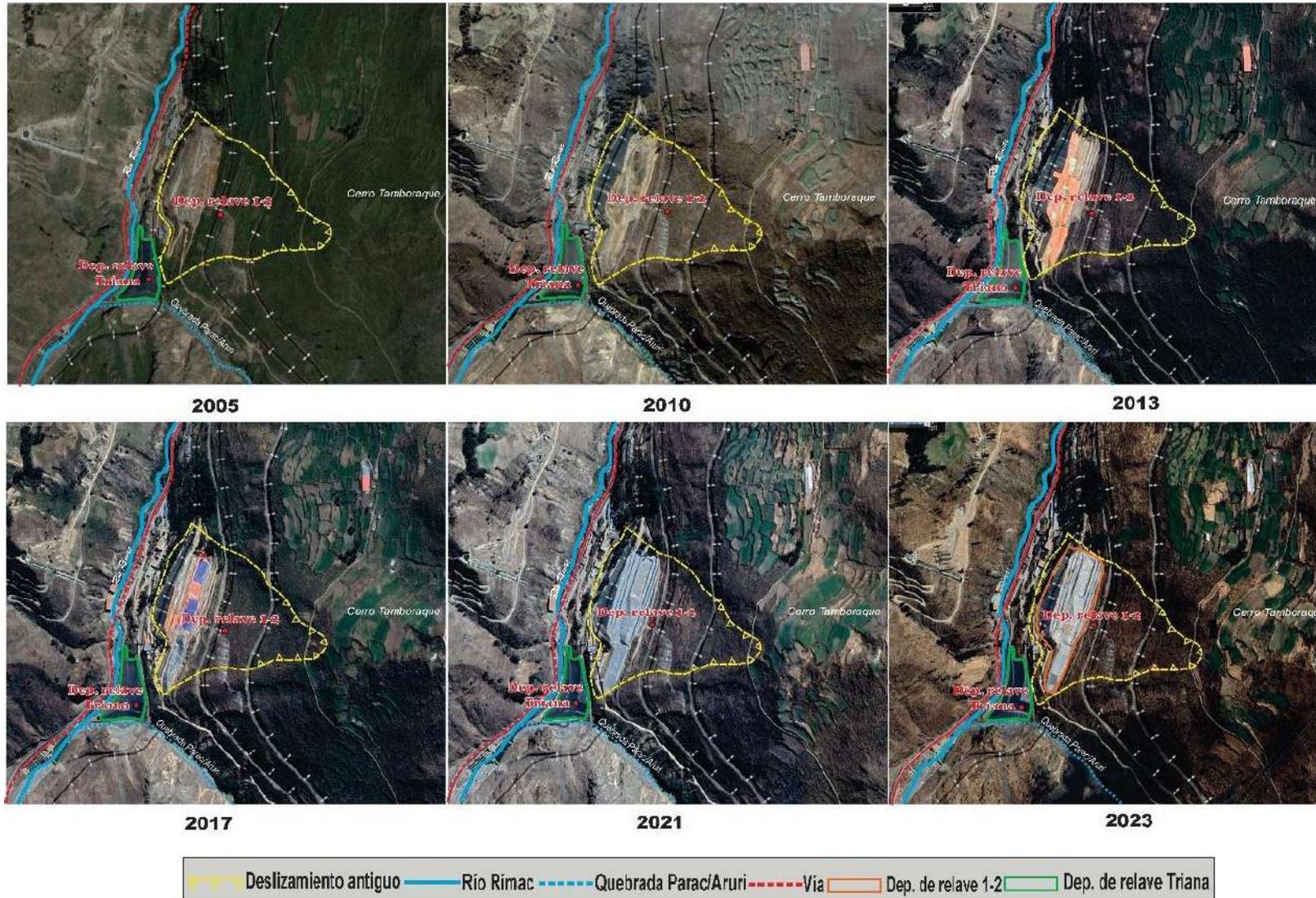


Figura 20. Análisis multitemporal del área de estudio, donde se evidencia: el deslizamiento antiguo desde el año 2005 al 2023 y la disminución del depósito de relave 1-2.

5.1.1. Análisis de perfil del deslizamiento

Tomando como base el levantamiento fotogramétrico con “dron” se generó el Modelo Digital de Terreno (MDT) y se elaboró un perfil transversal (figura 21) con el objetivo de caracterizar la morfometría de los deslizamientos identificados en el sector evaluado, los cuales tienen dirección de desplazamiento NO - NE, el cual se describe a continuación:

El perfil A-A', corte con dirección NO - NE, muestra gráficamente el cuerpo del deslizamiento ubicado en la margen izquierda del río Rímac. La misma en donde se identificó la escarpa principal entre las coordenadas UTM N 8697152, E 358082, con una altitud de 3245 m s.n.m. a 35 m al oeste se identifica una trocha carrozable de poco tránsito vehicular. El mismo que se desplaza hacia el depósito de relave 1-2 y alrededores (zona de recorrido).

El deslizamiento tiene una distancia entre la escarpa principal y el pie del deslizamiento de 491 m, pendiente promedio $>25^\circ$. También se observa en la parte media del cuerpo del deslizamiento tres tramos de la vía férrea, dos en la parte alta del depósito de relave 1-2 y una debajo de la misma.

Entre las coordenadas UTM N 8697286, E 357718, con una altitud de 3006 m s.n.m., se ubica el depósito de relave 1-2 de la Unidad minera Coricancha sobre el cuerpo del deslizamiento antiguo.

Finalmente, el deslizamiento se desplazó visualmente hasta las coordenadas UTM N 8697323, E 357625, con una altitud de 2971 m s.n.m

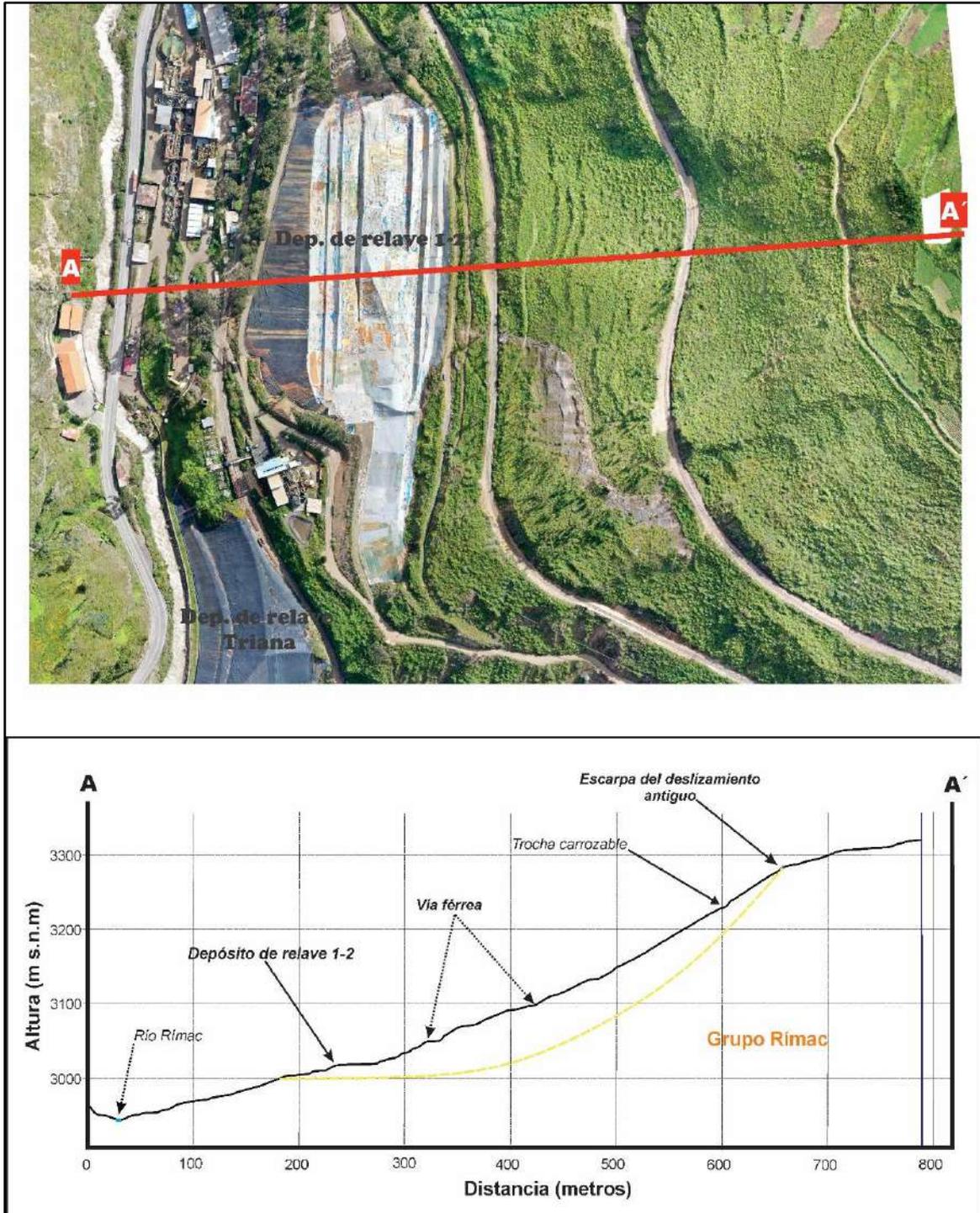


Figura 21. Perfil transversal A-A' con dirección NO - NE, sobre el modelo (MDT), que muestra el perfil del deslizamiento antiguo, así como la zona de inicio y el depósito.

5.2. Derrumbe y caída de rocas en el cerro Tamboraque y alrededores

Los trabajos de campo, como parte de la inspección técnica, permitieron identificar otros movimientos en masa como derrumbe y caída de rocas.

Se identificaron derrumbes y caída de rocas en ambas márgenes de la quebrada Parac/Aruri (figura 22 y 23). Estos procesos geodinámicos originan depósitos coluviales, constituidos por gravas angulosos a subangulosos pobremente gradados; en su mayoría con poca matriz o con ausencia de esta, generalmente suelta a medianamente densa.

En la quebrada Parac/Aruri se identificaron 10 derrumbes; 5 en cada margen, con un tipo de rotura de tipo vuelco, con una forma de arranque irregular con bloques aislados de hasta 1.2 m, sus características generadas por erosión de ladera. Los depósitos generados por estos procesos corresponden a gravas angulosos a subangulosos pobremente gradados, debido al poco transporte, generando obstrucción en la vía férrea.



Figura 22. Procesos de caída de rocas a un costado de la línea férrea, entre las coordenadas UTM N 8696681, E 358054 con una cota de 3085 m s.n.m. La línea roja corresponde a la zona de arranque de los procesos en mención.



Figura 23. Se observa derrumbe en la margen derecha de la quebrada Parac/Aruri a 38 m de la planta chancadora, ubicado entre las coordenadas UTM N 8696435, E 358598, con una cota de 3085 m s.n.m. La línea roja corresponde a la zona de arranque del proceso en mención. Es un derrumbe o es una excavación antrópica.

5.3. Erosión de laderas en el cerro Tamboraque y alrededores

La inspección técnica realizada en la zona de estudio permitió identificar y caracterizar procesos de erosión de laderas. Se identificaron procesos de erosión de laderas a manera de cárcavas próximos a la hidroeléctrica de Huanchor, margen derecha del río Rímac (figura 24), así como en las quebradas Parac/Aruri y Challumay.



Figura 24. Vista en la margen derecha del río Rímac, donde se observan procesos de erosión de laderas (líneas discontinuas de color verde) entre las coordenadas UTM N 8697344, E 357479, con una cota de 2970 m s.n.m.

5.4. Erosión fluvial en el río Rímac y la quebrada Parac/Aruri

Durante la inspección técnica realizada en la zona de estudio, se identificaron peligros geohidrológicos de tipo erosión fluvial en el río Rímac y en la quebrada Parac/Aruri.

En el río Rímac se identificaron este tipo de procesos en la margen derecha, donde se presenta socavamiento del terreno afectando un tramo de 30 m aproximadamente, debido al material de fácil remoción por erosión fluvial (figura 25). También se identificó procesos de erosión fluvial en el estribo derecho del puente (figura 26) ubicado a la altura de la entrada a la Unidad Minera Coricancha.

Así mismo se identificó proceso de erosión fluvial en la margen izquierda de la quebrada Parac/Aruri en un tramo de 24 m de longitud (figura 27)

Cabe precisar que, en temporada de lluvias, la actividad erosiva del río Rímac podría incrementar y generar posiblemente nuevos procesos de erosión, así como derrumbes, en ambas márgenes del río en mención.



Figura 25. Erosión fluvial en la margen derecha del río Rímac (flechas amarillas) que genera pequeños derrumbes (líneas discontinuas anaranjadas). Vista aguas abajo.



Figura 26. Erosión fluvial en el estribo derecho del puente ubicado a la altura de la entrada a la Unidad Minera Coricancha (flechas amarillas). Vista aguas abajo.



Figura 27. Erosión fluvial en la margen izquierda de ladera en la quebrada Parac/Aruri.

5.5. Factores condicionantes

Son todos aquellos factores naturales o antrópicos que condicionan o contribuyen a la inestabilidad de una ladera o talud, pero que no constituyen el evento detonante del movimiento. Los factores condicionantes identificados en la zona de estudio, se detallan en el cuadro 8.

Cuadro 8. Factores condicionantes de los peligros geológicos

FACTORES	CARACTERÍSTICAS
Litológico	<ul style="list-style-type: none"> • Substrato rocoso conformado por rocas volcánicas de tipo andesita. Estos afloramientos se encuentran medianamente a muy fracturados, distinguiéndose por sectores entre tres a cuatro familias de fracturas, y moderadamente a altamente meteorizados, mostrando un Índice de Resistencia Geológica-GSI² (Geological Strength Index) entre 35 - 55 (figura 24), originando inestabilidad en las laderas. • Presencia de depósitos coluvio-deluviales y coluviales (no consolidados), adosados a las laderas del cerro Tamboraque y alrededores. Los depósitos coluvio-deluviales están constituidos por bloques y gravas de naturaleza litológica volcánica, angulosas a subangulosas, envueltas en una matriz limo limosa. Mientras que, los depósitos coluviales corresponden a gravas angulosos a subangulosos pobremente gradados; en su mayoría con poca matriz o con ausencia de esta, generalmente suelta a medianamente densa.
Geomorfológico	<ul style="list-style-type: none"> • La subunidad geomorfológica de montaña en roca volcánica presenta pendiente del terreno muy fuerte o escarpado (25°-45°) a muy escarpado (>45°), por ello son relieves susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos, derrumbes y/o caídas de rocas. • Las subunidades de vertiente o piedemonte coluvio deluvial se encuentran depositadas en las laderas de las montañas en rocas volcánicas. Se han originado por movimientos en masa antiguos y presentan pendiente moderada (5°-15°) a fuerte (15°-25°) del terreno. Geodinámicamente, están asociados a la ocurrencia de movimientos en masa de tipo deslizamiento, caída de rocas o derrumbe. • Las subunidades de vertiente coluvial de detritos corresponden a material potencialmente inestable en las laderas. Se han generado en las rocas volcánicas del Grupo Rímac, las cuales se encuentran fracturadas y meteorizadas generando bloques inestables. Presentan pendiente del terreno muy fuerte o escarpado (25°-45°) a muy escarpado (>45°). • La subunidad de vertiente con depósito de deslizamiento se originó por procesos de movimientos en masa, antiguos y/o recientes, que pueden ser del tipo deslizamiento. Presenta pendiente del terreno

² El GSI estima la reducción de la resistencia del macizo para diferentes condiciones geológicas. La caracterización del macizo rocoso es simple y está basada en la impresión visual de la estructura rocosa, en términos de bloques y de la condición superficial de las discontinuidades indicadas por la rugosidad y alteración de las juntas. La combinación de estos dos parámetros proporciona una base práctica para describir un rango amplio de tipos de macizos rocosos.

	moderada (5°-15°) a fuerte (15°-25°). Geodinámicamente, está asociada a la ocurrencia de movimientos en masa de tipo deslizamiento.
Antrópico	<ul style="list-style-type: none"> • Modificaciones de los taludes a través de los cortes de carretera (carretera central, vía férrea, operaciones mineras, entre otros), generando inestabilidad en el terreno.

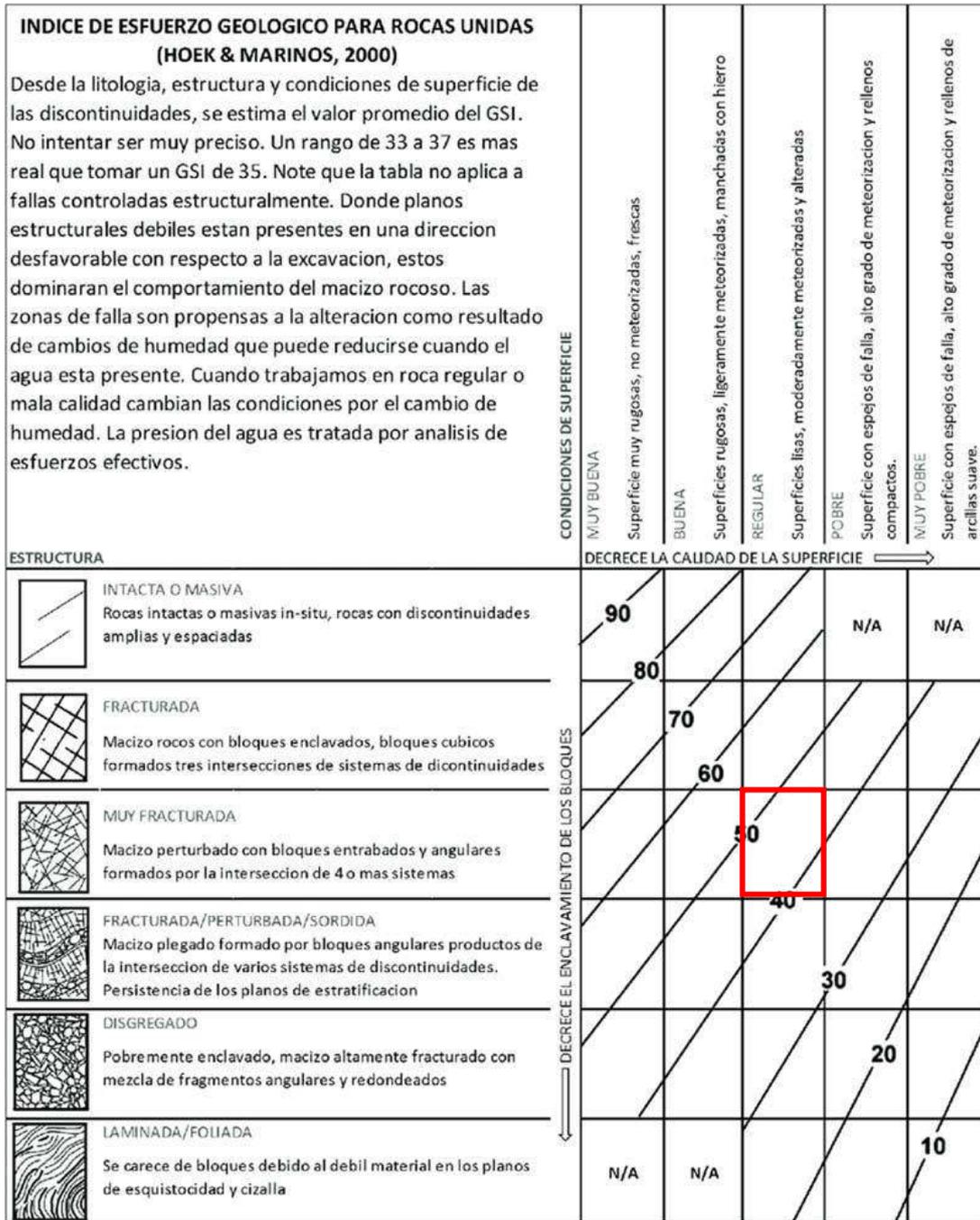


Figura 24. Caracterización del macizo rocoso GSI, con valores entre 35 - 55 para el substrato rocoso en la zona de estudio. Fuente: modificado de Hoek & Marinos (2002).

5.6. Factores desencadenantes

Corresponden a eventos naturales o antrópicos, que son la causa directa e inmediata de un peligro geológico. Entre ellos pueden estar, por ejemplo: los terremotos, las lluvias (lluvia acumulada de larga duración o lluvias intensas de corta duración); la excavación del pie de una ladera y la sobrecarga de una ladera.

Los factores desencadenantes, se detallan en el cuadro 9.

Cuadro 9. Factores desencadenantes de los peligros geológicos

FACTORES	CARACTERISTICAS
<p>Sismos</p>	<p>El departamento de Lima muestra un índice alto de pérdidas asociadas a sismos en el periodo reciente, registrado desde el siglo XVI (IGP, 2005). Debido a la cercanía de las costas del Perú a la zona de subducción, es decir a causa de la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana, Lima ha soportado a lo largo de su historia eventos naturales desastrosos como terremotos y tsunamis. Los más importantes fueron los terremotos de 1586, 1609, 1655, 1687, 1746, 1940, 1966 y 1974, que causaron pánico y destrucción de viviendas e infraestructura, especialmente en zonas donde las condiciones geológicas son menos favorables y donde viven las poblaciones más pobres.</p> <p>En este contexto, es necesario indicar el Mapa de zonificación sísmica, elaborado por Alva <i>et al.</i> (1984), utilizado como base en el nuevo Reglamento Peruano de Construcción Sísmica con la norma técnica de edificación E-30 (Diseño Sismorresistente, actualizado al 2016), donde el territorio nacional está dividido en cuatro zonas. La zonificación propuesta se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de estos con la distancia epicentral, así como la información neotectónica.</p> <p>A cada zona se asigna un factor Z, este factor se interpreta como la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de 10 % de ser excedida en 50 años. De acuerdo a este mapa, el área de estudio se ubica en la zona 3 (figura 4), correspondiente a una zona de sismicidad alta, donde las aceleraciones con ventanas de tiempo para 20, 50 y 100 años de vida útil, corresponden 200, 500 y 1000 años de período de retorno respectivamente para un 10% de excedencia. Se determinó aceleraciones de 0.35 g.</p> <p>De acuerdo con el mapa de intensidades máximas (INDECI-DIPRE, 2017) por sismo de 8.8 MW similares a las del terremoto de 1746, gran parte de las provincias y distritos ubicados en la zona occidental del departamento de Lima se verían sometidas a intensidades mayores a VIII (MM). En cuanto al distrito de San Mateo y la zona de estudio serían expuestas a las más altas intensidades debido a su cercanía a la zona</p>

	de ruptura (figura 25), además se espera que ocurran movimientos en masa como derrumbes, caída de rocas, deslizamientos, entre otros.
Precipitaciones	<ul style="list-style-type: none"> La presencia de lluvias de gran intensidad-corta duración, o de moderada intensidad-larga duración, ocasionan el incremento de la presión intersticial, las fuerzas de filtración y del peso unitario de los materiales. Un gran número de eventos peligrosos geológicos, como los movimientos en masa en la cuenca del río Rímac (huaicos, deslizamientos o derrumbes), han sido detonados por lluvias intensas y generalmente se presentan desde Chosica hacia aguas arriba.
Actividad antrópica	<ul style="list-style-type: none"> La infiltración de aguas de riego en suelos permeables, proveniente de los terrenos adyacentes. La sobrecarga de los depósitos de relaves 1-2, así como el recrecimiento de la misma. La carga dinámica producida por el paso del ferrocarril (aproximadamente 150 Ton por vagón).

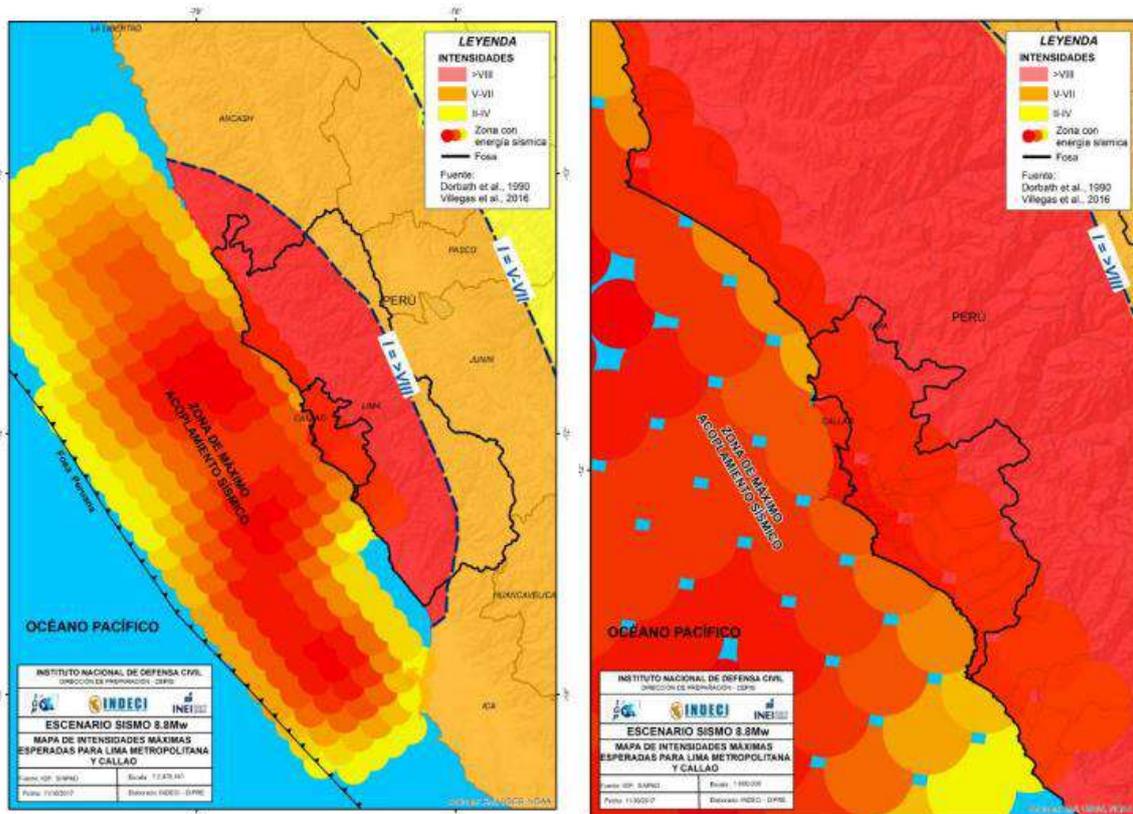


Figura 25. Departamentos y distritos que se verían sometidos a intensidad > VIII (MM). Fuente: INDECI-DIPRE (2017).

6. SIMULACIÓN DE FLUJOS DE DETRITOS CON FLO2D

El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D (O'Brien et al., 1988) simula flujo de fluidos "No-Newtonianos" (fluidos formados por una mezcla de sólidos y líquido) que dependiendo de la concentración de sus componentes se mueve a cierta velocidad y con determinados tirantes (altura de flujo) hasta que pierde su capacidad de transporte y se detiene; todo esto ocasiona el arrastre y el depósito de material detrítico aguas abajo.

Con el fin de conocer las características del comportamiento de un flujo de detritos (huaico) en el área de estudio, se realizó varias simulaciones numéricas con el software FLO-2D, para dos escenarios planteados: a) El aporte de agua y sedimento de la quebrada Parac (afluente tributario al río Rímac) y b) El modelamiento de un flujo de detritos en el río Rímac como consecuencia de un posible desembalse, a partir del represamiento que se produciría al activarse un deslizamiento en la margen derecha del río Rímac, en el sector Mayuco (al sur de San Mateo).

6.1. Análisis de datos

En las siguientes líneas se describe el procesamiento de datos necesarios para el modelamiento del flujo de detritos en el sector de Tamboraque y alrededores (río Rímac y quebrada Parac/Aruri:

6.1.1. Caracterización topográfica

La información topografía utilizada se generó a partir de un modelo de elevación digital (DEM) generado a partir de sobrevuelos de dron, mediante el cual se obtuvo información del terreno con una resolución de hasta 0.10 m/px (figura 26).

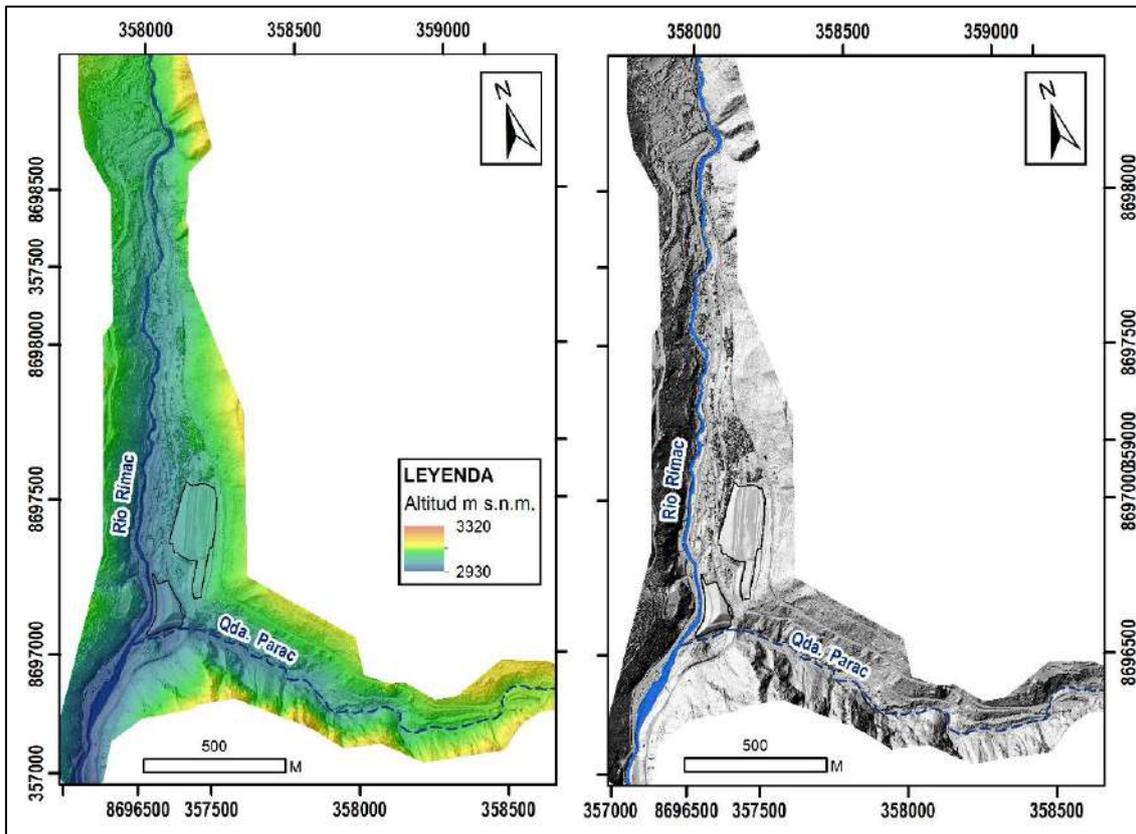


Figura 26. Modelo de elevación digital con una resolución de 0.10 m/px (izquierda) y modelo de sombras (derecha), elaborado a partir de sobrevuelos de dron. Este modelo representa en su conjunto las dos áreas a simular para los dos escenarios planteados.

6.1.2. Caracterización hidrológica

La información pluviométrica que se utilizó, corresponde a registros históricos de precipitación máxima de 24 horas (Pmax24h) de la estación San José de Parac/Aruri (figura 27) e información hidrométrica de la estación San Mateo (figura 28).

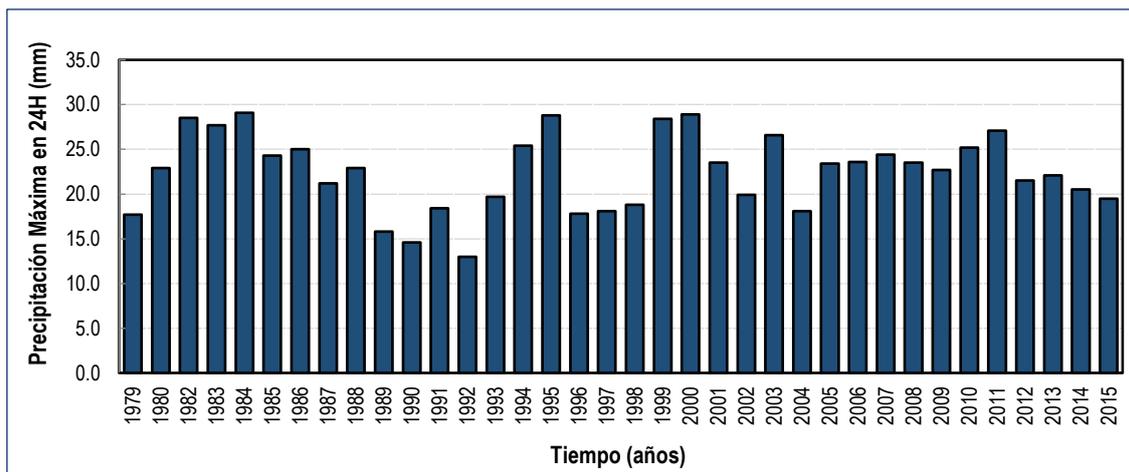


Figura 27. Histograma del registro histórico de la Estación San José de Parca. Fuente: (SENAMHI-ANA). Estos datos podrían tomarse también para describir el acápite de Precipitaciones.

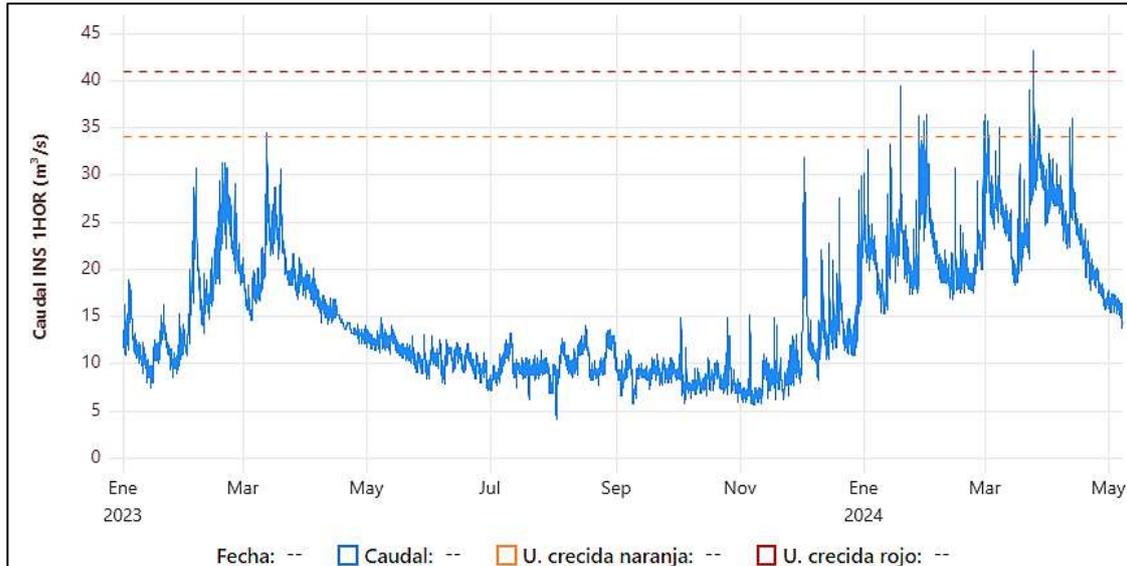


Figura 28. Registro hidrométrico del Caudal INS 1HOR (m³/s) de la Estación San Mateo – Río Rímac. Fuente: (SNIRH-ANA).

Con esta información pluviométrica, se realizó un análisis de frecuencias de eventos hidrológicos máximos, procesada por medio de un análisis probabilístico. Se efectuó las distribuciones de frecuencia más usuales: Distribución Normal (N), Distribución Gumbel, Distribución Log Normal de 2 parámetros, Distribución Log Normal de 3 parámetros y Distribución Log Pearson III.

Para la quebrada Parac, se encontró como mejor distribución de ajuste la de Log Person III (figura 29), el cual fue utilizado para la estimación del hidrograma líquido (distribución del caudal de agua a través del tiempo).

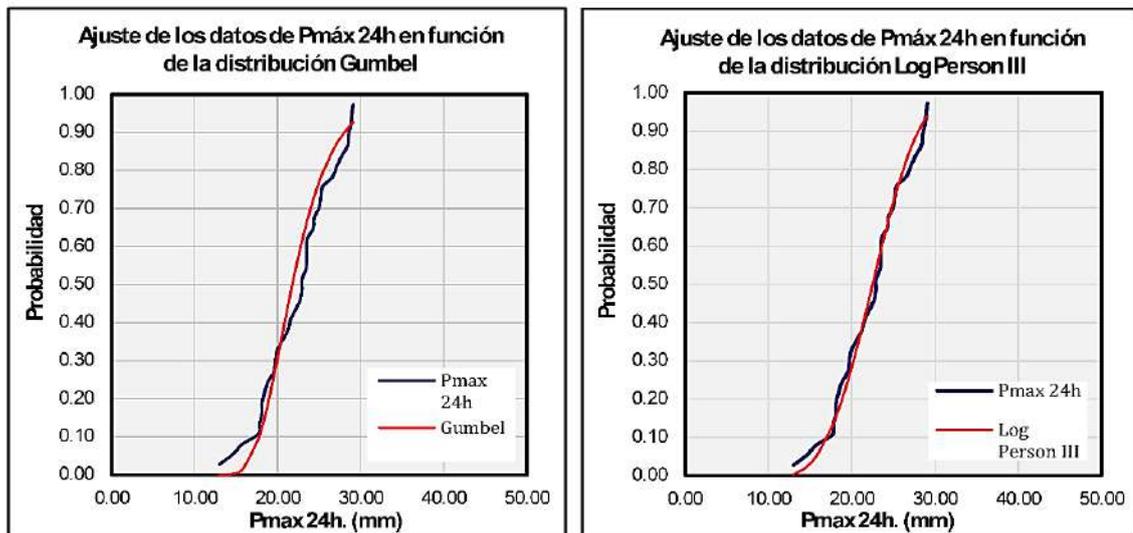


Figura 29. Comparación del análisis probabilístico para la distribución Gumbel (izquierda) y Log Person III (derecha), siendo esta última la que mejor se ajusta para la estimación del hidrograma líquido.

Para el cálculo del hidrograma de avenida, se empleó el software HEC-HMS con la metodología del Soil Conservation Service (SCS), utilizándose tormentas hipotéticas para 24 horas provenientes del análisis probabilístico; además se utilizó el concepto

de precipitación de celda concentrada, como la lluvia puntual que cae localmente sobre una zona específica y produce flujos (huaicos).

Esta lluvia no es registrada por las estaciones meteorológicas debido a que se trata de un fenómeno local e instantáneo. De acuerdo con Castillo et. al. (2006), la precipitación de celda concentrada como la máxima registrada, corresponde a un tiempo de retorno (T_r) igual a 100 años.

Por lo tanto, aplicando la metodología de precipitación-escorrentía se obtiene un caudal líquido de $35.8 \text{ m}^3/\text{s}$ para la quebrada Parac y de $43.09 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Rímac (como el valor máximo registrado de la estación hidrométrica de San Mateo), figura 30.

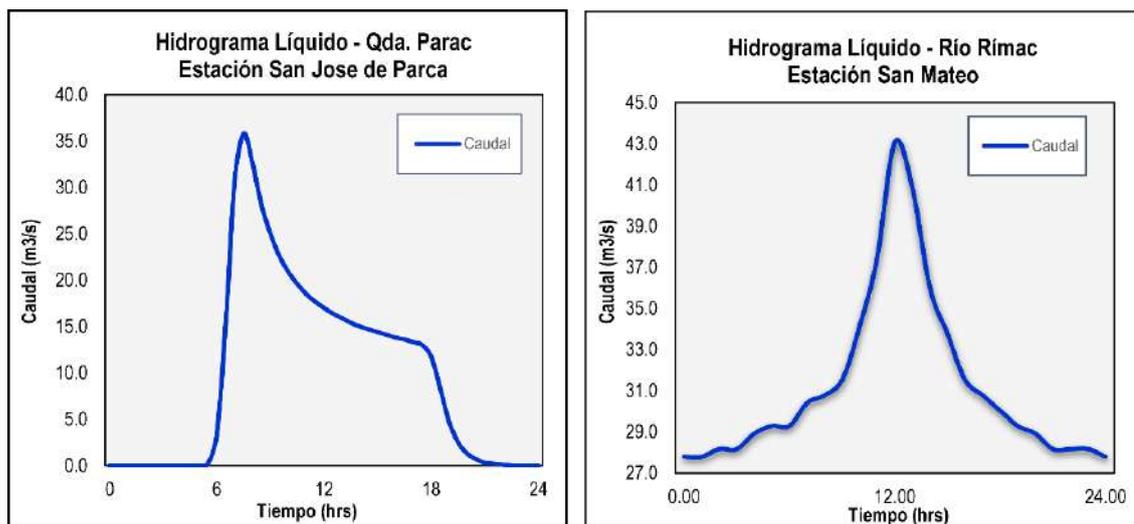


Figura 30. Hidrogramas líquidos para la quebrada Parac (izquierda) y río Rímac (derecha), con caudales máximos de $35.8 \text{ m}^3/\text{s}$ y $43.09 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

6.1.3. Definición de parámetros de entrada

- Se delimitó dos áreas a simular (correspondientes a los dos escenarios planteados): El primero, comprendió desde el sector Huaquecha, toda la extensión aguas abajo de la quebrada Parac con la confluencia con el río Rímac, hasta el sector de Chanuya Bajo; obteniendo un área total de simulación de 54.1 ha. El segundo se estableció desde el sector de Mayuco, toda la extensión aguas abajo del río Rímac hasta el sector de Chanuya Bajo; obteniendo un área total de simulación de 64.1 ha.
- Se generó una malla computacional para cada área de simulación: El primer escenario comprendió 537908 celdas de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$; y el segundo escenario, 418181 celdas de $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$.
- Los hidrogramas de caudal líquido se colocaron como condición de entrada ubicada aguas arriba de la quebrada Parac (sector Huaquecha) para el primer escenario; y en el sector Mayuco (al sur de San Mateo) para el segundo escenario.
- Se asignó celdas de salida ubicadas al final del dominio computacional, con el fin que el flujo simulado no se estanque donde la información topográfica bordee

el límite de la zona de simulación, así el programa interpretará que no existe un impedimento para que el flujo se acumule y continúe fluyendo.

- Se realizó una simulación de flujos de detritos, utilizando las ecuaciones que gobiernan el movimiento en su expresión más completa (onda dinámica).
- Se estimó un coeficiente de rugosidad del terreno aplicando el método del valor del número de Manning para los distintos usos de suelo y textura del terreno, cuyos valores son propuestos en el manual del programa Flo-2D (2017) y Ven Te Chow (1994): 0.040 para el cauce principal del río Rímac, 0.17 para el cauce de la quebrada Parac, 0.02 para la carretera central, 0.15 para zonas urbanas e infraestructuras y 0.50 para zonas aledañas.
- Se estableció la resistencia de flujo laminar (K) igual a 2285. Valor calibrado y empleado de manera eficaz en otros estudios de flujos de detritos (FLO-2D Software Inc., 2017).
- Se consideró una concentración de sólidos (Cv) variable de 0.20 a 0.35 para el primer escenario; y de 0.22 a 0.45 para el segundo escenario: Estos valores son estimados de acuerdo a la metodología propuesta en el manual de referencia (FLO-2D Software Inc., 2017), donde la concentración volumétrica se basa de acuerdo a esfuerzos dominantes para diferentes tipos de flujo y de acuerdo a las condiciones geodinámicas que presenta el área de estudio.
- Los parámetros reológicos del fluido se fijaron en función de la ecuación cuadrática de O'Brien, (O'Brien, J. and Julien, P., 1988), estudios similares realizados en Matucana (Castillo, 2006) y las evidencias geológicas de los depósitos cuaternarios registradas en la etapa de campo.

Es importante resaltar que el modelo considera el fluido homogéneo (una sola fase) de concentración variable, es decir que internamente no se hace distinción de los tamaños de los sedimentos.

6.2. Análisis de resultados

La simulación de flujos de detritos se realizó de acuerdo a dos escenarios principales, propuestos de acuerdo a la realidad geodinámica que presenta el área de estudio, la concentración volumétrica de sedimentos y teniendo en cuenta los caudales máximos estimados del análisis hidrológico:

A. Primer Escenario – Quebrada Parac

El primer escenario corresponde a un flujo de detritos en la quebrada Parac, como consecuencia del aporte de agua y sedimento (relacionado directamente con la cartografía geomorfológica - geodinámica de procesos activos y antiguos identificados hacia ambos márgenes de la quebrada). Ver anexo 1, mapa 04.

En este sentido, el escenario representaría un flujo acuoso con carga de fondo y carga en suspensión, el cual se daría como consecuencia de crecidas del caudal, derivada de lluvias extraordinarias. La simulación se realizó con un caudal líquido máximo de 35.8 m³/s y una concentración volumétrica de sedimentos con un pico máximo de 35%, con las siguientes características:

- El modelo reporta alturas de flujo máximas de hasta 20.5 m (debido al embalse generado por el dique y la colmatación de la alcantarilla, en el cruce de la vía férrea con la quebrada Parac); sin embargo, el valor promedio en el cauce de la quebrada es de 3.2 m, disipándose a 2.8 m en la desembocadura con el río Rímac, hasta llegar a 0.05 m hacia las zonas más distales (figura 31).
- Las velocidades del flujo fluctúan desde máximos de 8.5 m/s y mínimos de 0.0 m/s en zonas muy puntuales; sin embargo, en el cauce de la quebrada, el valor promedio varía entre 2.6 a 3.2 m/s; y en la desembocadura con el río Rímac, entre 1.8 a 2.3 m/s (figura 32).

El modelo indica el desborde del flujo en las coordenadas UTM, WGS 84, 18s, X: 358557 m, Y: 8696390 m; a la altura de la Unidad de Chancado y Molienda de la Unidad Minera Coricancha, como consecuencia de la reducción del cauce natural del río. Esta condición afectaría un tramo de 465 m de la vía férrea, un puente, una labor minera adyacente al sector y 500 m de trocha carrozable (figura 33 y fotografía 7).

Así mismo, se muestra la posible afectación del relave minero Triana, como consecuencia de un embalse y la posterior rotura del dique sobre el que se encuentra la vía del ferrocarril central; generando un desembalse aguas abajo hasta la confluencia con el río Rímac (figura 34 y fotografía 8). Como consecuencia se muestra la afectación de un tramo de 670 m de la vía férrea (Ferrocarril Central), 640 m de la carretera central y la central hidroeléctrica de Huanchor.

Los resultados de la simulación señalan un volumen de entrada líquido total de 854,911 m³ y la concentración de mezcla agua/sedimento de 1,198,611 m³. Además, se calcula que la zona de inundación alcanza una extensión máxima de 91,534 m² en el área analizada.

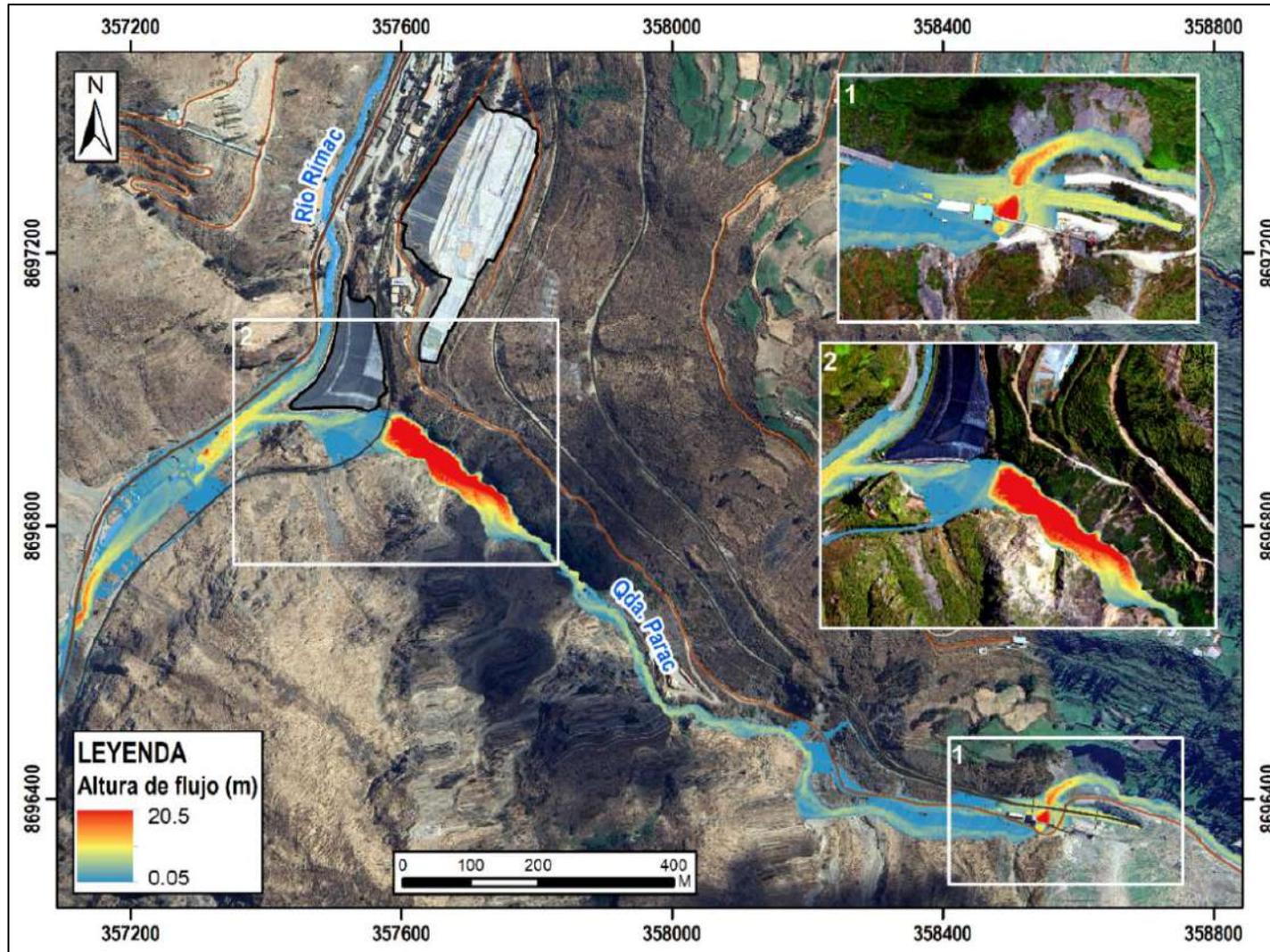


Figura 31. Alturas de flujo máximas de hasta 20.5 m y mínimas de 0.05. Se observa claramente el embalse generado por el dique (rectángulo 2) y la colmatación de la alcantarilla en el cruce de la vía férrea con la quebrada Parac (rectángulo 1).

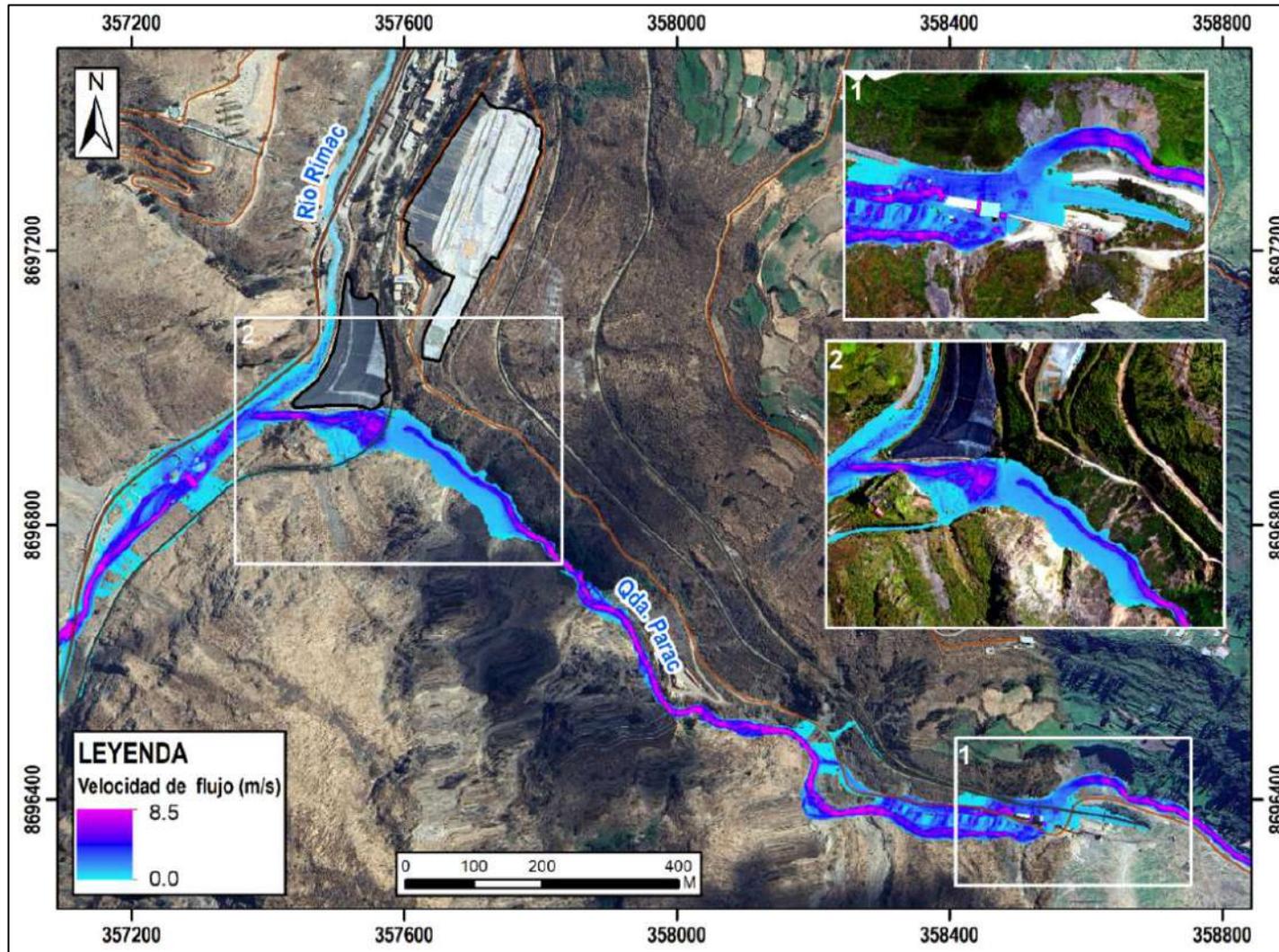


Figura 32. Velocidades de flujo fluctuantes entre máximas de 8.5 m/s y mínimas de 0.0 m/s.

La simulación muestra la afectación directa de ~1,135 m de la vía férrea, un puente, una labor minera, 500 m de tocha carrozable, una alcantarilla, el dique sobre el que se encuentra la vía del ferrocarril central, ~640 m de la carretera central, y la hidroeléctrica de Huanchor.



Figura 33. Se muestra el desborde del flujo a la altura Unidad de Chancado y Molienda; y como consecuencia la afectación de un tramo de la vía férrea, labor minera y tocha carrozable.



Fotografía 7. Se observa la Unidad de Chancado y Molienda, dispuesta a solo 2.0 m, del cauce principal del río Parac. Esta construcción minera es susceptible a la ocurrencia de flujos de detritos.

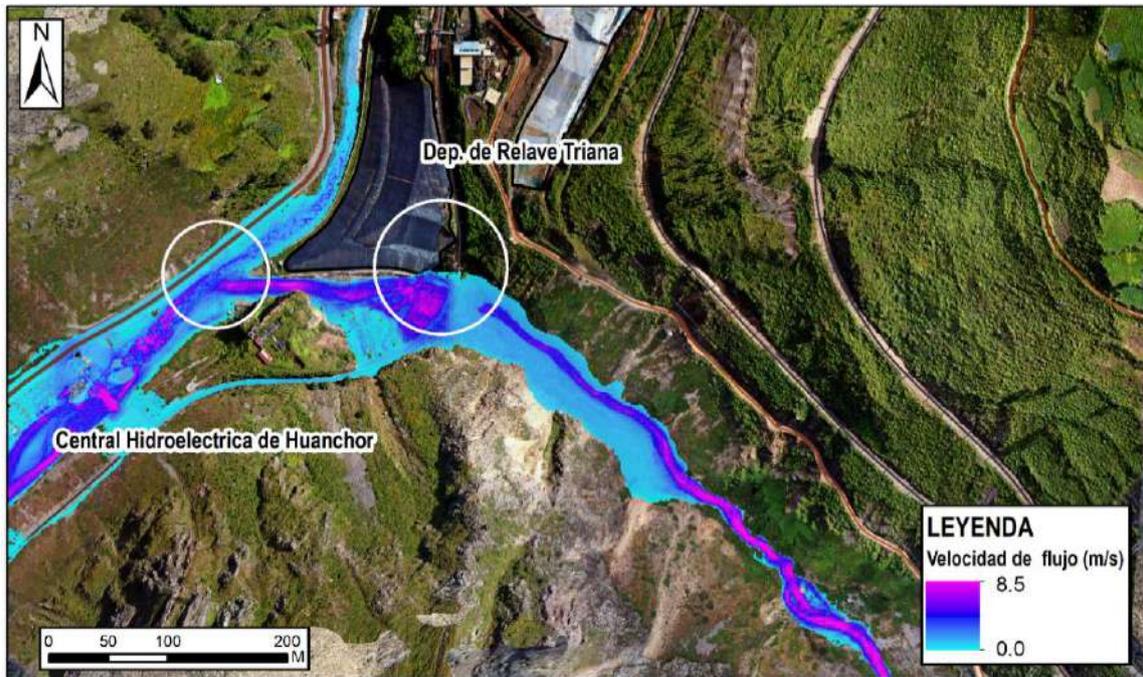


Figura 34. Se muestra la posible afectación del relave minero Triana, como consecuencia de un embalse y la posterior rotura del dique, generando un desembalse aguas abajo hasta la confluencia con el río Rímac. Además, se muestra la afectación de un tramo de la vía férrea, la carretera central y la central hidroeléctrica de Huanchor.



Fotografía 8. Se observa la alcantarilla con capacidad limitada para el paso de un eventual flujo de detritos en la quebrada Parac; lo que condicionaría su colmatación, un embalse aguas arriba y una posterior rotura del dique sobre el que se encuentra la vía del ferrocarril central.



Fotografía 9. Procesos de remoción en masa (caída de rocas y derrumbes), hacia ambos márgenes de la quebrada Parac, que contribuye a la acumulación de materiales coluviales sueltos subangulosos al pie de la ladera y susceptibles a ser removidos con facilidad. Vista aguas arriba.



Fotografía 10. Vista aguas arriba, desde el cruce de la vía férrea con la quebrada Parac. Se distingue abundante material detrítico inconsolidado dispuesto en la margen izquierda de quebrada susceptible a ser removido ante una eventual crecida del río.

B. Segundo Escenario – Río Rímac

El segundo escenario corresponde a un flujo de detritos como consecuencia de un posible desembalse, a partir del represamiento que se produciría al activarse un deslizamiento en la margen derecha del río Rímac (sector Mayuco), desencadenados por lluvias extraordinarias.

En este sentido, la simulación se realizó con un caudal máximo de 86.20 m³/s (con el fin de presentar el fenómeno de desborde e inundación del río por la colmatación ocurrida en el cauce por el flujo) y una concentración volumétrica de sedimentos con un pico máximo de 45%, con las siguientes características:

- El modelo reporta alturas de flujo máximos de hasta 11.5 m y mínimos de 0.03 m; sin embargo, en el cauce del río Rímac, fluctúan entre 5.6 m a 2.8 m, aumentando a 5.9 m en la desembocadura con la quebrada Parac, hasta llegar a 0.5 m hacia las zonas más distales (figura 35).
- Las velocidades del flujo fluctúan desde máximos de 14 m/s y mínimos de 0.0 m/s en zonas muy puntuales; sin embargo, en el cauce del río Rímac, el valor promedio varía entre 6.5 m/s a 4.9 m/s; y en la desembocadura con la quebrada Parac, entre 2.8 m/s a 1.4 m/s, disipándose hasta 0.1 m/s en las zonas distales (figura 36).

Esta variación de valores responde a la configuración de la topografía del terreno y su alta pendiente, que hacen que el flujo no se almacene y escurra rápidamente hacia aguas abajo, haciendo que tenga mayor velocidad con menores alturas.

Asimismo, las zonas con depresiones o entrampamientos en donde el flujo llega a acumularse, hacen que las alturas del flujo de detritos sean mayores y por tanto la velocidad disminuya.

El modelo indica el desborde del flujo en las coordenadas UTM, WGS 84, 18s, X: 357901 m, Y: 8698433 m; en las inmediaciones del sector Portillo. Esta condición afectaría un tramo de 100 m de la vía férrea, dos viviendas, dos puentes, 375 m de la carretera central e instalaciones del campamento de la Unidad Minera Coricancha, ubicados en la margen izquierda, al norte del depósito de relave 1-2. (figura 37).

De igual forma, aguas abajo, se muestra el desborde del flujo en las coordenadas UTM, WGS 84, 18s, X: 357543 m, Y: 8697395 m. Como consecuencia se muestra la afectación de instalaciones e infraestructura de la central hidroeléctrica de Huanchor, ingreso hacia la Unidad Minera Coricancha y el puente ubicados metros abajo y 680 m de la Carretera Central (figura 38).

Los resultados de la simulación señalan un volumen de entrada líquido total de 187,712 m³ y la concentración de mezcla agua/sedimento de 277, 315 m³. Además, se calcula que la zona de inundación alcanza una extensión máxima de 105, 576m² en el área analizada.

La simulación muestra la afectación directa de ~100 m de la vía férrea, dos viviendas, dos puentes, ~1,055 m de la Carretera Central, instalaciones del campamento de la Unidad Minera Coricancha e instalaciones de la central hidroeléctrica de Huanchor.

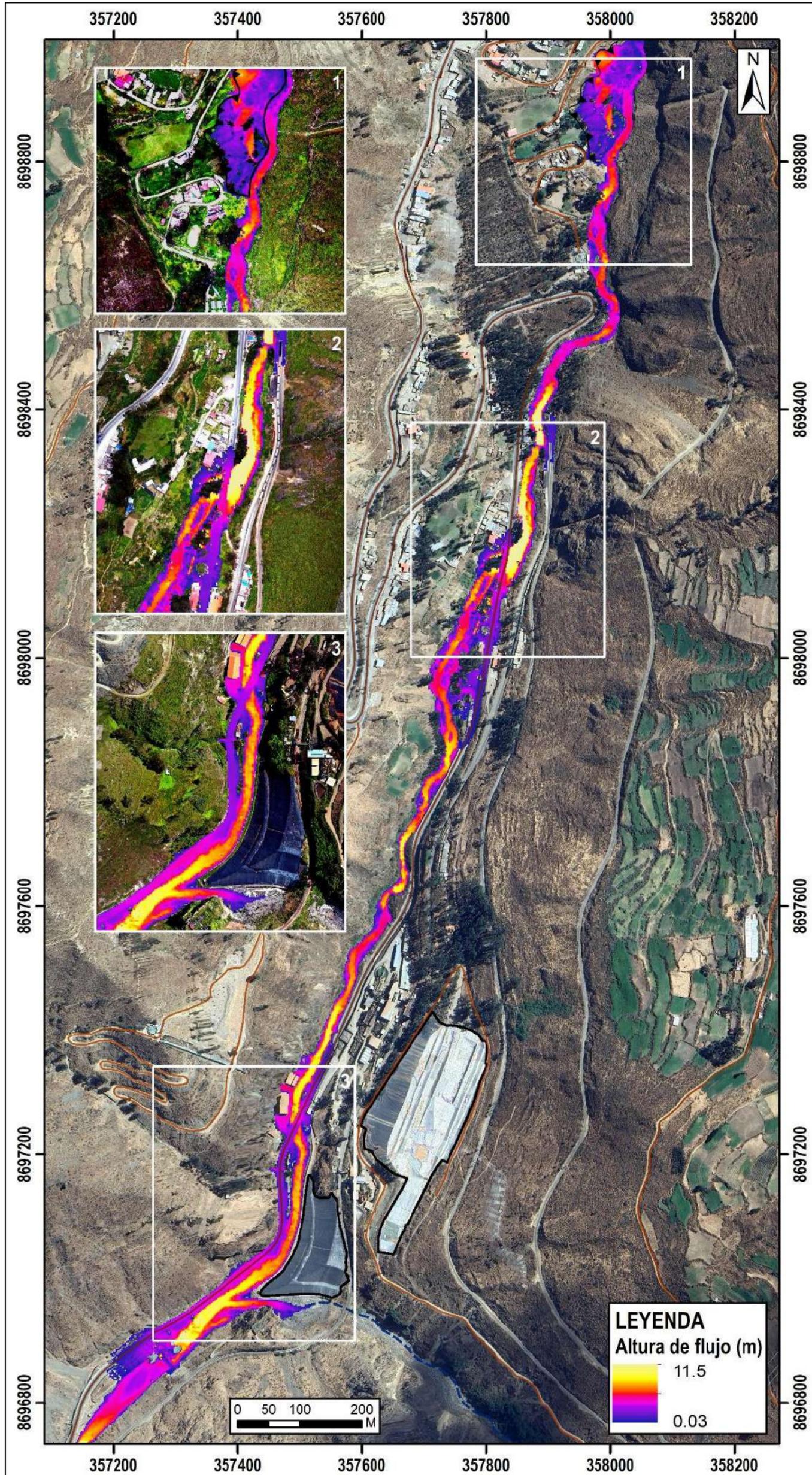


Figura 35. Alturas de flujo máximas de 11.5 m y mínimas de 0.03, para el segundo escenario.

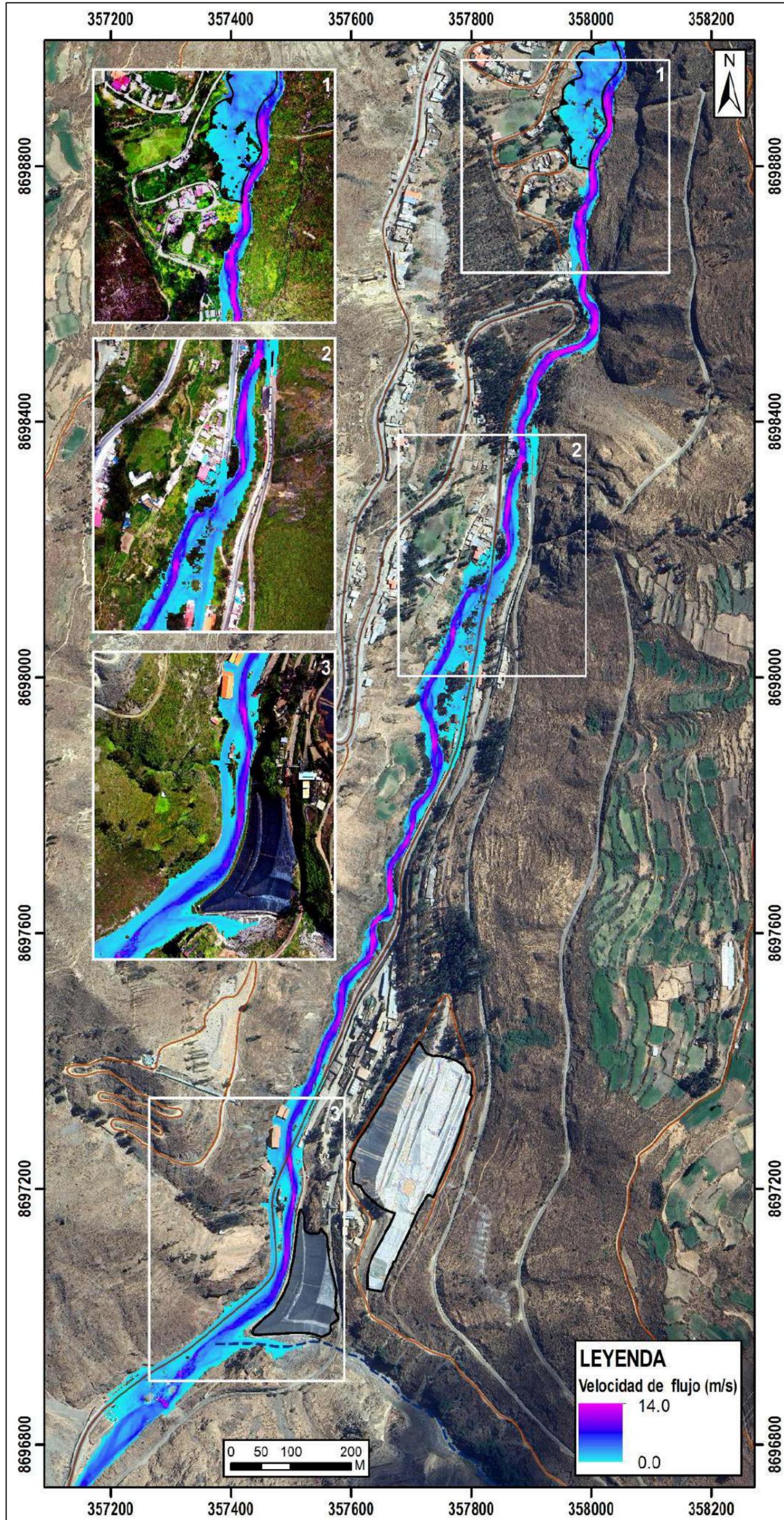


Figura 36. Velocidades de flujo máximas de 14.0 m/s y mínimas de 0.03 m/s.

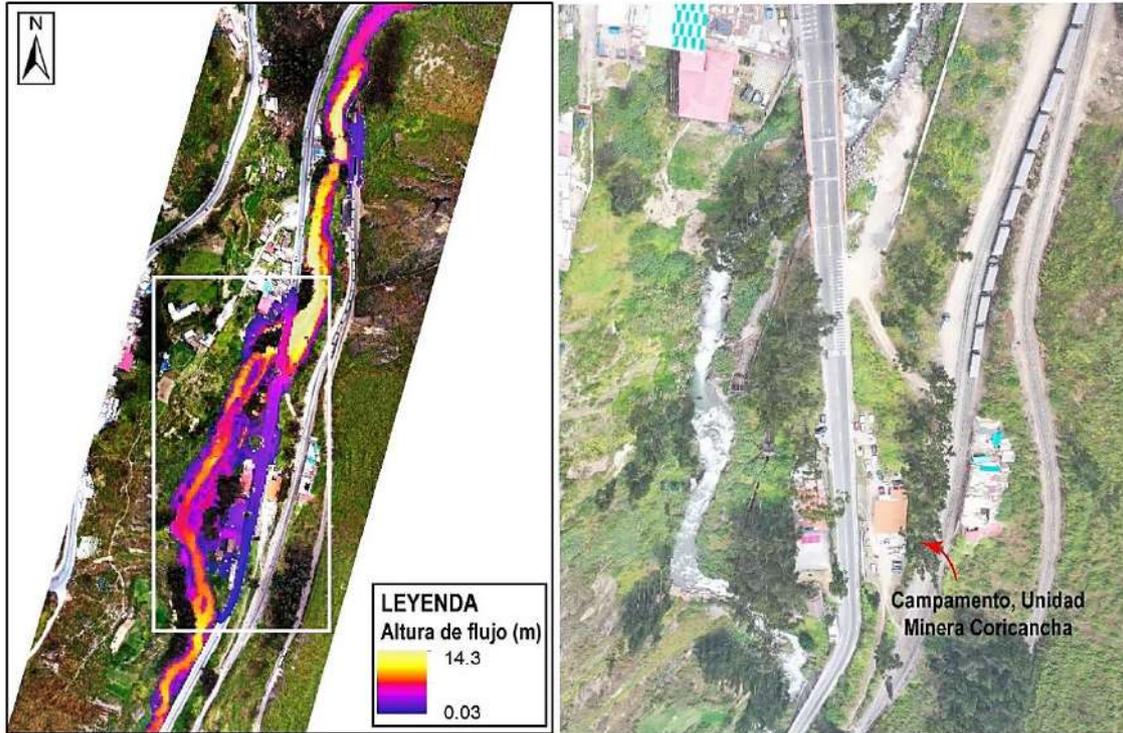


Figura 37. Se muestra el desborde del flujo en las inmediaciones del sector Portillo; y como consecuencia la afectación de un tramo de 100 m de la vía férrea, dos viviendas, dos puentes, 375 m de la carretera central e instalaciones del campamento de la Unidad Minera Coricancha.



Figura 38. El modelo muestra la probable afectación de instalaciones e infraestructuras de la central hidroeléctrica de Huanchor, parte inferior del campamento de la Unidad Minera Coricancha y 680 m de la carretera central.

6.2. Mapa de peligros

Con la información obtenida de las simulaciones anteriores se generaron los mapas de peligro mediante una función combinada discreta de la intensidad y de la probabilidad del evento. La intensidad, definida por la profundidad y la velocidad de flujo; y su probabilidad de ocurrencia, relacionada inversamente a la magnitud del evento; siguiendo la metodología de García *et al.* (2003).

Los mapas de peligro generados consideran tres regiones con diferentes colores. A continuación, se proporcionará una descripción detallada del significado asociado a cada uno de los niveles de peligro (figuras 39 y 40):

- a) **Nivel de peligro bajo (amarillo):** Este nivel indica que el peligro hacia la población es muy mínimo o inexistente. Por otro lado, las viviendas y estructuras podrían experimentar un ligero daño estructural; no obstante, el interior de estas puede afectarse por la sedimentación y el flujo de detritos.
- b) **Nivel de peligro medio (anaranjado):** Este nivel advierte que las personas que se encuentren afuera de sus viviendas se encuentran en peligro ante la avenida de flujos de detritos. Las obras estructurales ubicadas en esta área pueden sufrir daños significativos e incluso destrucción total (dependiendo del material de construcción).
- c) **Nivel peligro alto (rojo):** Esta zona señala que las personas ubicadas en la misma se encuentran en peligro, tanto fuera como dentro de las edificaciones. Asimismo, la infraestructura se encuentra en alto peligro de ser destruida.

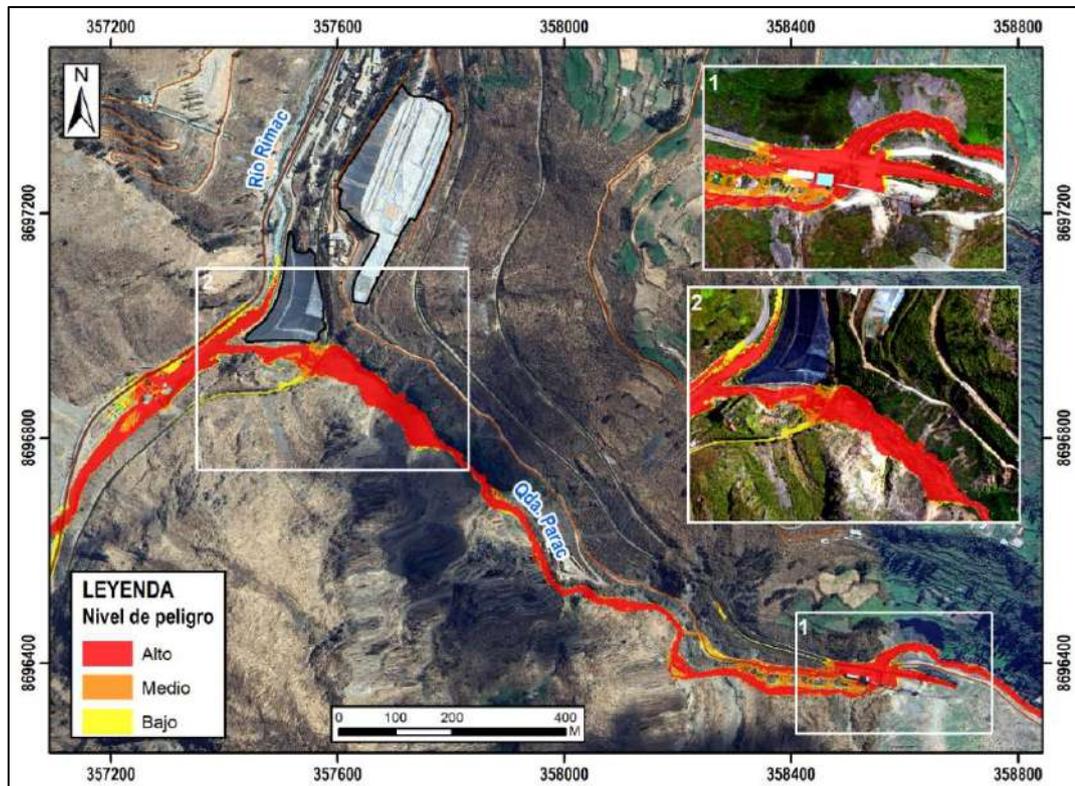


Figura 39. Mapa de peligro ante la ocurrencia de flujos de detritos en la quebrada Parac; como consecuencia de crecidas del caudal y el aporte de sedimentos de movimientos en masa activos en ambas márgenes de la quebrada.

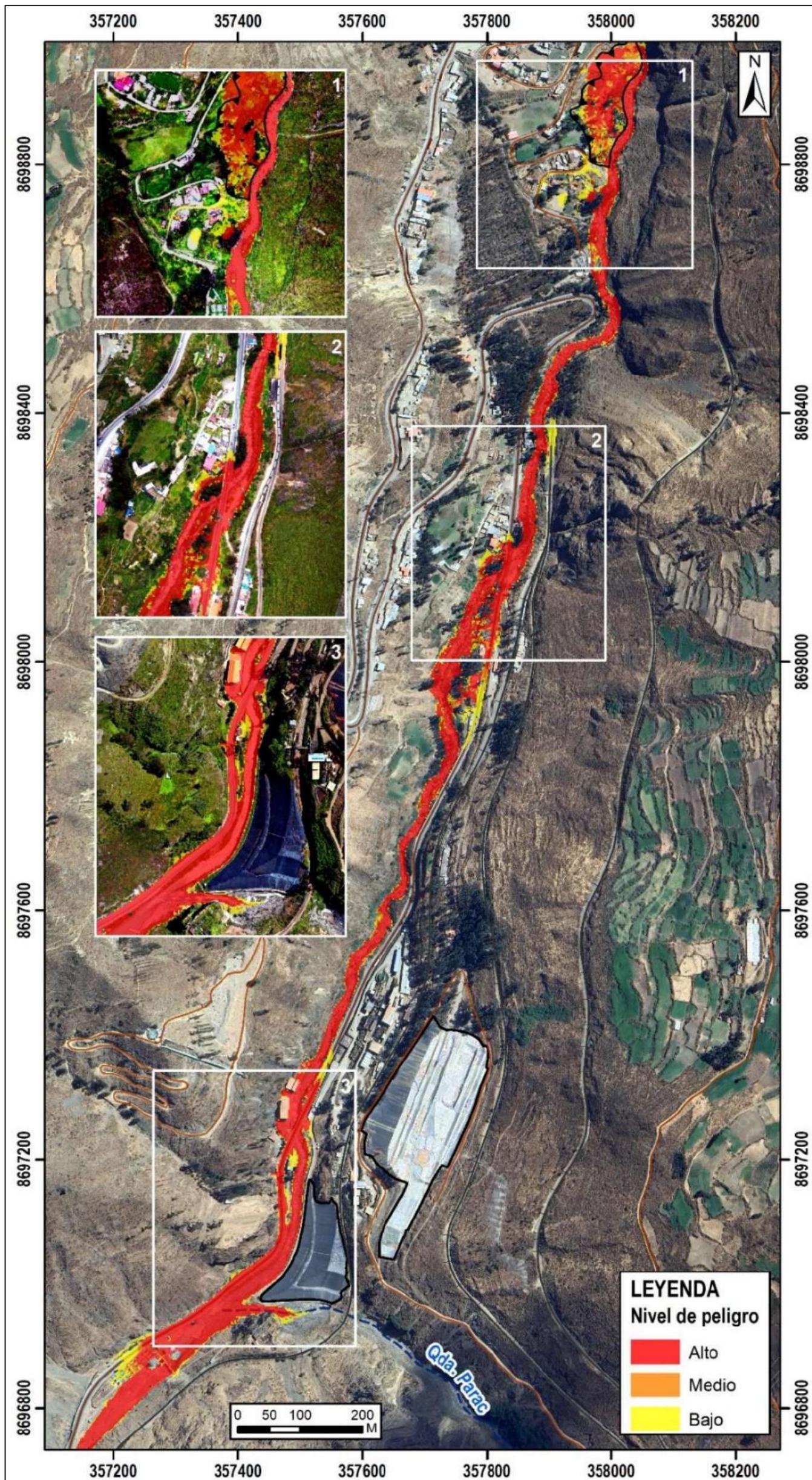


Figura 40. Mapa de peligro ante la ocurrencia de flujos de detritos; como consecuencia de la activación de un deslizamiento y su posterior desembalse en la margen derecha del río Rímac.

7. CONCLUSIONES

En base al análisis de información geológica de la zona de estudio, así como a los trabajos de campo y la evaluación de peligros geológicos, se emiten las siguientes conclusiones:

1. La zona de estudio está compuesta por un substrato rocoso de andesitas masivas y secuencias tobáceas medianamente a muy fracturadas y moderadamente a altamente meteorizadas del Grupo Rímac. También se tienen depósitos coluvio-deluviales, depósitos proluvio-aluviales, depósitos fluviales, depósitos coluviales y depósitos antrópicos (relaves).
2. Geomorfológicamente, la zona de estudio presenta montañas en roca volcánica con pendiente del terreno muy fuerte a muy escarpado (25° a $>45^\circ$), donde se ubican geoformas de tipo piedemonte coluvio deluvial con pendientes moderada a fuerte (5° - 25°). Además, existen subunidades de vertiente coluvial de detritos, con pendiente del terreno muy fuerte a muy escarpado (25° a $>45^\circ$), así como vertiente con depósito de deslizamiento con pendiente del terreno moderada a fuerte (15° - 25°) y las terrazas proluvio-deluvial y fluvial se encuentran en pendientes baja a moderada (1° - 15°).
3. Los peligros geológicos identificados en el sector Tamboraque y alrededores, corresponden a movimientos en masa, tipo deslizamiento, flujo, caída de rocas y derrumbe; peligros geohidrológicos de tipo erosión fluvial; y otros peligros geológicos como erosión de laderas (cárcavas).
4. Los deslizamientos activos y antiguos identificados en el área de estudio presentan escarpas semicirculares y elongadas, con longitudes que varían entre 89 m a 1798 m, desniveles entre escarpa y pie del deslizamiento, que varían entre 87 a 1258 m ocupando áreas entre 0.1 a 86.7 ha aproximadamente.
5. Los factores que condicionan la ocurrencia de peligros geológicos en la zona de estudio, son la presencia de depósitos inconsolidados pertenecientes a movimientos en masa antiguos y recientes, ubicados sobre macizo rocoso muy fracturado y meteorizado. Además de la presencia de montañas modeladas en roca volcánica con pendiente del terreno muy fuerte o escarpado a muy escarpado (25° a $>45^\circ$), así como las modificaciones de los taludes a través de los cortes de carreteras (carretera central, vía férrea, operaciones mineras, entre otros), generando inestabilidad en el terreno.
6. Los factores que desencadenaron el deslizamiento en el 2008 fue la infiltración de aguas de riego en suelos permeables, proveniente de los terrenos adyacentes; la sobrecarga de los depósitos de relaves 1-2, así como el recrecimiento de la misma; y la carga dinámica producida por el paso del ferrocarril (aproximadamente 150 Ton por vagón). Actualmente podría

reactivarse por sismos o lluvias de gran intensidad-corta duración, o de moderada intensidad-larga duración.

7. Se realizaron dos simulaciones de flujos de detritos, propuestos de acuerdo a: la realidad geodinámica que presenta el área de estudio; la concentración volumétrica de sedimentos y, los caudales máximos estimados del análisis hidrológico, obteniéndose los siguientes resultados:
 - a. El primer escenario realizado en la quebrada Parac, muestra la afectación directa ~1,135 m de la vía férrea, un puente, una labor minera, 500 m de tocha carrozable, una alcantarilla, ~640 m de la carretera central, la hidroeléctrica de Huanchor y la posible afectación de parte del relave minero Triana, como consecuencia de un embalse y la posterior rotura del dique sobre el que se encuentra la vía del ferrocarril central. El cual no afectaría al depósito de relave 1-2.
 - b. El segundo escenario para el río Rímac, muestra la simulación de un flujo de detritos como consecuencia de un posible desembalse, a partir del represamiento que se produciría al activarse un deslizamiento en la margen derecha del río Rímac. En esta simulación se observa la afectación directa de ~100 m de la vía férrea, dos viviendas, dos puentes, ~1,055 m de la carretera central, instalaciones del campamento de la Unidad Minera Coricancha e instalaciones de la central hidroeléctrica de Huanchor. El cual no afectaría a los depósitos de relave (1-2), ubicados en la margen izquierda del río Rímac.
8. Por las condiciones geológicas, geomorfológicas y geodinámicas el cerro Tamboraque y alrededores es considerado como **Zona crítica y de Peligro Alto** ante deslizamiento, flujo de detritos (huaico), caída de rocas, derrumbe, erosión fluvial y erosión de laderas (cárcavas). Los eventos podrían reactivarse ante lluvias excepcionales y sismos, que podrían ocasionar daños en los alrededores. Mientras que, en el río Rímac y la quebrada Parac/Aruri se podrían generar flujos de detritos o huaicos.

8. RECOMENDACIONES

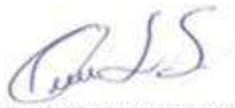
En base al estudio realizado por Zavala *et al.* (2008), se reiteran las siguientes recomendaciones, en caso no se encuentren implementadas:

1. El drenado del cuerpo del deslizamiento es primordial para la estabilización del área inestable: drenaje superficial y subterráneo. Se debe realizar de acuerdo al mapa hidrogeológico presentado en el Informe técnico N° A6505.
2. Los resultados de los análisis demuestran que, si eliminamos, tanto el relave antiguo como el recrecimiento, el talud mejora en estabilidad, inclusive en casos de sismos
3. Se puede mejorar la estabilidad del talud con el relave antiguo, siempre y cuando se realicen obras de estabilización como contrafuertes y/o densificación de las arcillas.
4. Eliminar las tuberías que salen del reservorio de la Comunidad de San Antonio, hacia el área del deslizamiento o zona inestable. Una vez eliminados, el reservorio puede ser usado, con riego tecnificado, en otras áreas al NE de la zona de estudio (Chuclapampa y Socococha).
5. Es importante continuar con el monitoreo topográfico, piezométrico e inclinometría en el área del deslizamiento. Este debe ser permanente en el tiempo, inclusive después de realizar las obras de estabilización recomendadas.

En base a la evaluación de peligros geológicos realizada en el presente informe, se brindan las siguientes recomendaciones:

1. Realizar el monitoreo geodésico y topográfico del sector Tamboraque, en especial de áreas que involucran infraestructuras de gran relevancia. (depósitos de relaves 1-2, Triana e hidroeléctrica). Para Obtener información de deformación del terreno, movimiento superficial, monitoreo estructural y descartar posibles activaciones.
2. Realizar vigilancia remota y del nivel freático de manera temporal del área de estudio.
3. Implementar y generar un seguimiento de la actividad de los depósitos de relaves 1-2 y Triana de manera permanente.
4. En las laderas del cerro Tamboraque y alrededores, evitar realizar cortes del talud, de realizarse deben ser con dirección técnica, y con estudios geotécnicos de estabilidad de taludes para determinar el comportamiento del terreno frente a las edificaciones y cortes de talud.
5. Realizar el desquinche de las rocas sueltas en las laderas del cerro Tamboraque y alrededores, que puedan generar procesos de caídas de rocas.

6. Realizar trabajos de descolmatación y limpieza del cauce principal de la Quebrada Parac/Aruri y el río Rímac especialmente después de épocas de avenida y evitando procesos de erosión fluvial aguas arriba del depósito de relaves Triana.
7. Implementar medidas estructurales aguas arriba de la quebrada Parac/Aruri, para el control de flujos de detritos, estos pueden ser la construcción de diques, muros de roca, entre otros; que sirvan para la retención de material detrítico y reducción de la velocidad de flujos; minimizando de esta manera la colmatación de la alcantarilla existente.
8. En base a las simulaciones de flujos de detritos y el mapa de peligros en el área de influencia de la quebrada Parac/Aruri, se recomienda la reubicación a mediano y largo plazo del depósito de relave Triana.
9. Forestar las laderas del cerro Tamboraque y alrededores, así como en las zonas de deslizamientos, derrumbes y caída de rocas, para tener una barrera viva, que evite el desplazamiento de nuevos eventos.
10. Considerar la colocación de señaléticas en vías de acceso y áreas en peligro, advirtiendo la posible ocurrencia de deslizamientos, derrumbes y caída de rocas.
11. Realizar la “Evaluación del Riesgo de Desastres Originados por Fenómenos Naturales (EVAR)”, en las zonas afectadas y aledañas.
12. Realizar charlas de sensibilización y concientización sobre el peligro al que se encuentran expuestos los pobladores del distrito de San Mateo y otros sectores asentados en la parte baja del sector Tamboraque.


.....
Ing. NORMA LUZ SOSA SENTICALA
Especialista en Peligros
Geológicos
INGEMMET


.....
MAURICIO ANTONIO NUÑEZ PEREDO
Ingeniero Geólogo
CIP N° 278509


.....
ING. JERSY MARIÑO SALAZAR
Director (e)
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico
INGEMMET

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alva, J., Meneses J. & Guzmán V. (1984). *Distribución de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas en el Perú*. V Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Tacna, Perú.

Castillo, L. (2006) - Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú”. Tesis de grado. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

Castillo, L.; Fídel, L. & Jackson, L. (2006) - Modelado de flujos de lodo usando FLO-2D en la quebrada Paihua: Impacto en la ciudad de Matucana, Lima. En: Congreso Peruano de Geología, 13, Lima, Perú, 17-20 octubre 2006, Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 2006, pp. 92-95. Publicación Especial.

Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá: Colombia, 308p.

Diario Oficial El Peruano (2016). Decreto Supremo que modifica la Norma Técnica E.30 “Diseño sismorresistente” del Reglamento Nacional de Edificaciones, aprobada por Decreto Supremo N°011-2006-Vivienda, modificada con Decreto Supremo N° 002-2014-Vivienda. Decreto Supremo N° 003-2016-Vivienda. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

García, R., López, J. L., Noya, M., Bello, M. E., Bello, M. T., Gonzales, N., O’Brien, J. (2003). Hazard mapping for debris-flow events in the alluvial fans of northern Venezuela. Third International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment.

Fidel, L.; Zavala, B; Núñez, S. & Valenzuela, G. (2006). Estudio de riesgos geológicos del Perú, Franja N° 4. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 29, 376 p., 19 mapas. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/263>

Fidel, L. (2016). Informe “Estabilidad de las laderas del cerro Tamboraque. INGEMMET, Informe, 4 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3946>

Fidel, L. (2017). Evaluación de las defensas ribereñas del depósito de relaves Triana (SRK Consulting, 2016). INGEMMET, Informe Técnico N° A6755, 10 p.

FLO-2D. (2017). “FLO-2D Reference Manual”. FLO-2D Software, Inc.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (2016). Comentarios al informe: Ingeniería de detalle para el cierre de los depósitos de relaves N° 1, 2 y la extensión sur de Tamboraque U.M. Coricancha. INGEMMET, Opinión Técnica, 3 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/4672>

Instituto Nacional de Defensa Civil. Dirección de Preparación (2017). *Escenario sísmico para Lima Metropolitana y Callao: Sismo 8.8 Mw*, 54 p <https://www.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/201711231521471-1.pdf>

Luque, G.; Rosado, M.; Pari, W.; Peña, F. & Huamán, M. (2020). Peligro geológico en la región Lima. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica*, 76, 298 p., 9 mapas.

Mamani, Y.; Gómez, E.W. & Guerrero, L. (2021) - Geología del cuadrángulo de Matucana (hojas 24k2, 24k3, 24k4). *INGEMMET, Boletín, Serie L: Actualización Carta Geológica Nacional (Escala 1: 50 000)*, 29, 96 p.

O'Brien, J. and Julien, P., (1988) "Laboratory Analysis of Mudflow Properties", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 114(8), 877-887.

Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (2007). *Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, 432 p., Publicación Geológica Multinacional, 4.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (2024) – SENAMHI. (consulta: Mayo 2024). Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>.

Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (2024) – SNIRH-ANA Consulta de datos hidrométricos de la Estación San Mateo. Disponible en: <https://snirh.ana.gob.pe/VisorPorCuenca/>.

Villota, H. (2005). *Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras*. 2. ed. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 210 p.

Zavala, B.; Fidel, L.; Núñez, S.; Peña, F.; Olarte, Y. & Pari, W. (2008). Evaluación geológica del área afectada por deslizamiento de tierras en Tamboraque. *INGEMMET, Informe técnico N° A6505*, 62 p.

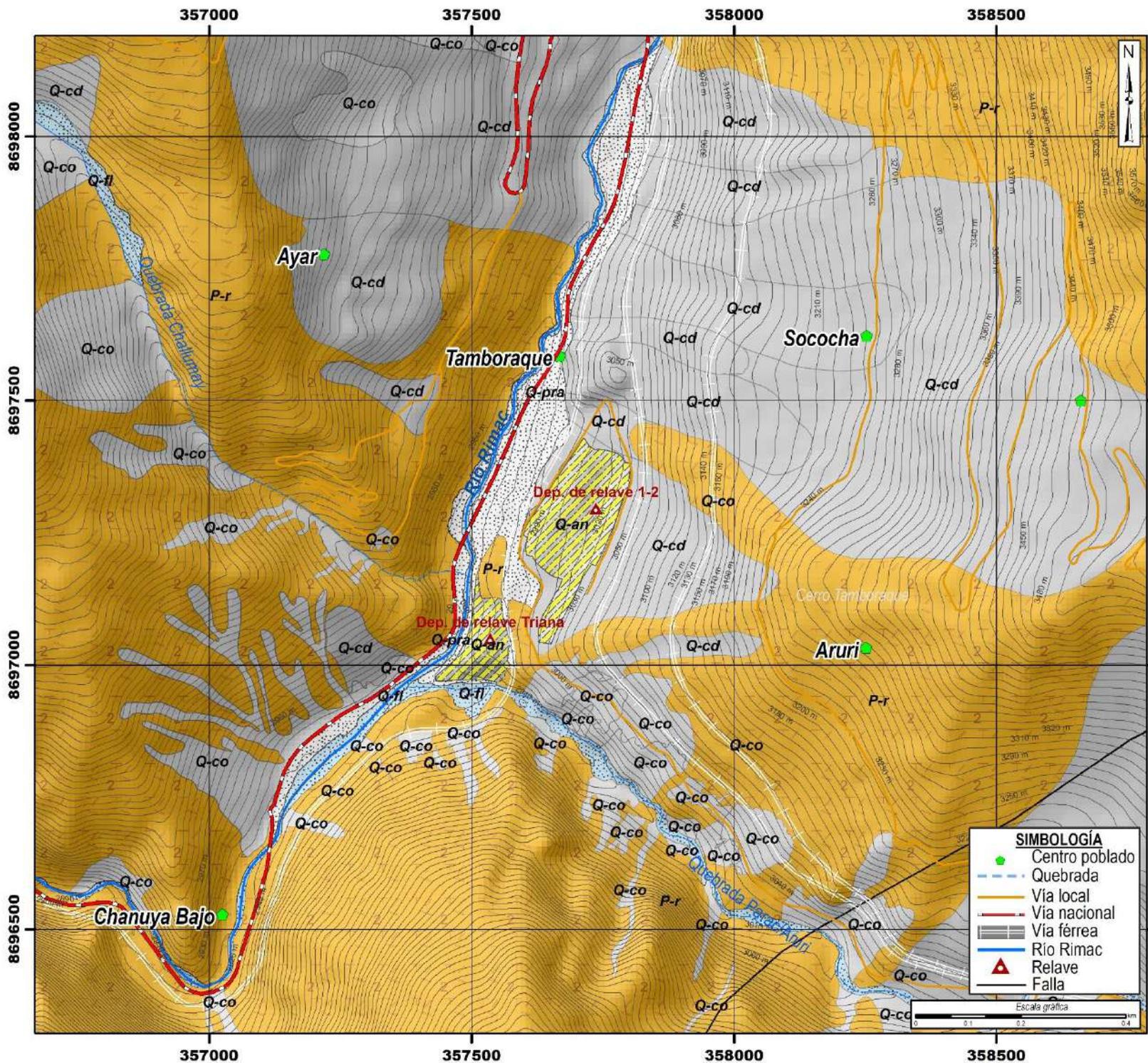
ANEXO 1: MAPAS

Mapa 1. Mapa geológico

Mapa 2. Mapa de pendientes de terreno

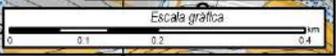
Mapa 3. Mapa geomorfológico

Mapa 4. Cartografía de peligros geológicos



LEYENDA		
Era	Sistema	Unidades litoestratigráficas
Cenozoico	Cuaternario	Q-an Depósito antrópico
		Q-co Depósito coluvial
		Q-fl Depósito fluvial
		Q-pra Depósito proluvio-aluvial
	Q-cd Depósito coluvio-deluvial	
Paleógeno	P-r	Grupo Rimac

SIMBOLOGÍA	
	Centro poblado
	Quebrada
	Via local
	Via nacional
	Via férrea
	Río Rimac
	Relave
	Falla



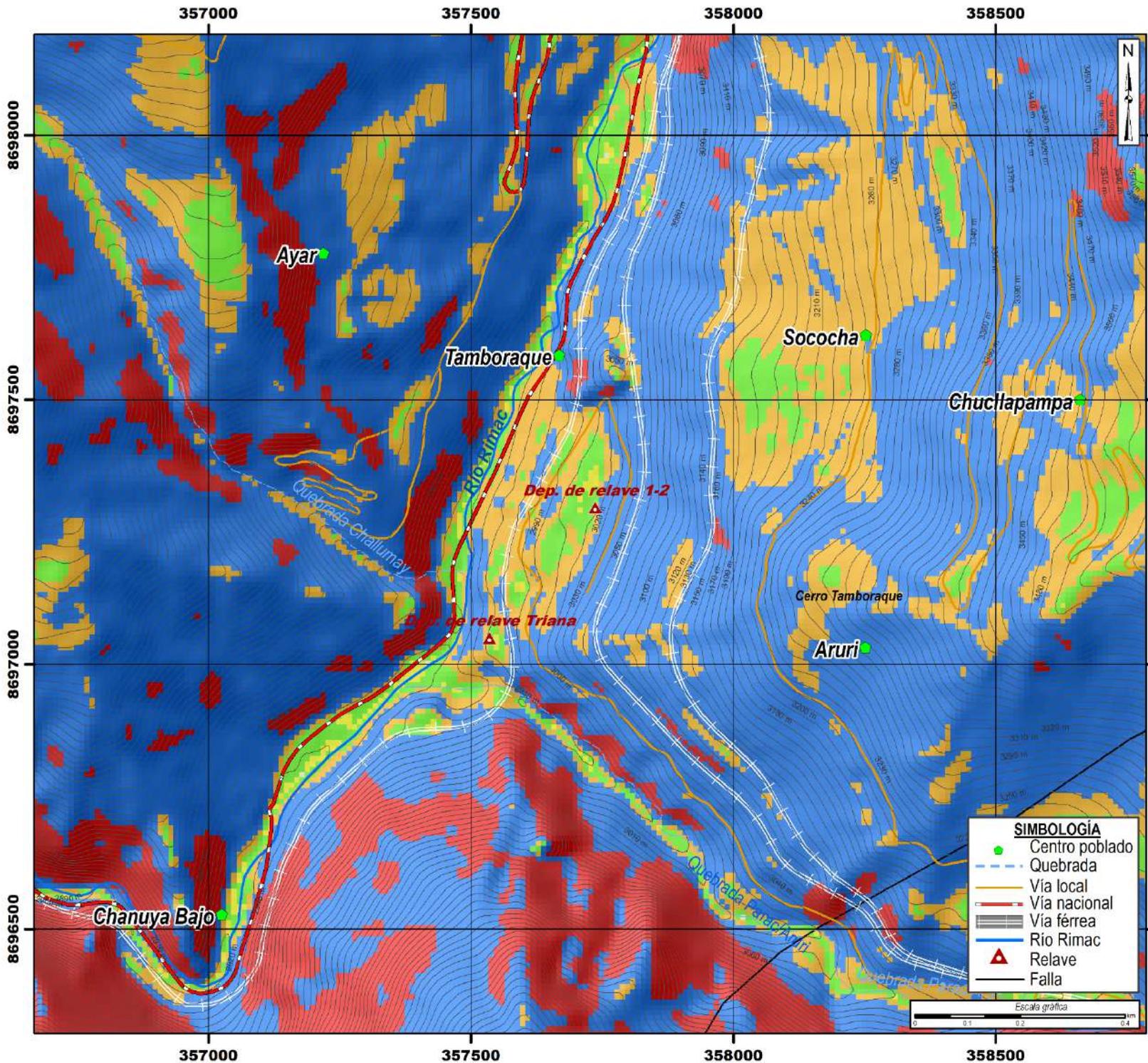
INGEMMET
INSTITUTO GEOLOGICO, MINERO Y METALURGICO

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

DEPARTAMENTO: LIMA
PROVINCIA: HUAROUCHIRI
DISTRITO: SAN MATEO

GEOLOGÍA EN EL SECTOR TAMBORAQUE Y ALREDEDORES

Escala: 1/10,000	Elaborado por: Sosa, N.	MAPA 01
Proyección: UTM Zona 18 Sur Datum: WGS 84		
Versión digital 2024	Impreso: Mayo, 2024	



RANGOS DE PENDIENTE

0° - 1°	Terreno llano
1° - 5°	Terreno inclinado con pendiente suave
5° - 15°	Pendiente moderada
15° - 25°	Pendiente fuerte
25° - 45°	Pendiente muy fuerte o escarpada
>45°	Terreno muy escarpado

SIMBOLOGÍA

	Centro poblado
	Quebrada
	Vía local
	Vía nacional
	Vía férrea
	Rio Rimac
	Relave
	Falla

SECTOR ENERGIA Y MINAS
INGEMMET
 INSTITUTO GEOLOGICO, MINERO Y METALURGICO

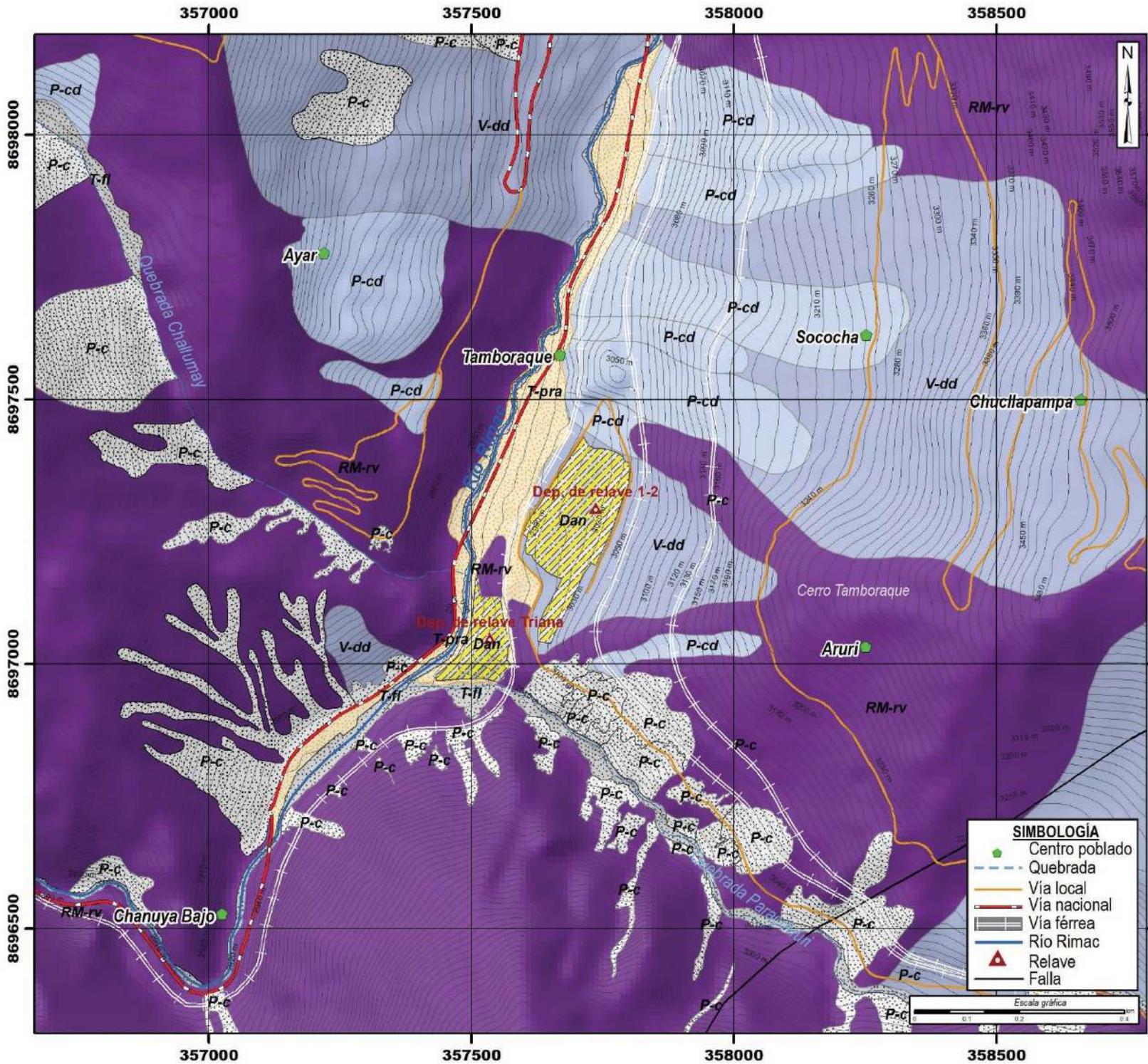
DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO
 DEPARTAMENTO: LIMA
 PROVINCIA: HUARACHIRI
 DISTRITO: SAN MATEO

PENDIENTE EN EL SECTOR TAMBORAQUE Y ALREDEDORES

Escala: 1/10,000 Elaborado por: Sosa, N. **MAPA 02**

Proyección: UTM Zona 18 Sur Datum: WGS 84

Versión digital 2024 Impreso: Mayo, 2024



LEYENDA	
Código	Sub unidades geomorfológicas
RM-rv	Montaña en roca volcánica
P-cd	Piedemonte coluvio-deluvial
V-dd	Vertiente con depósito de deslizamiento
P-co	Piedemonte coluvial
T-pra	Terraza proluvio-aluvial
T-fl	Terraza fluvial
Dan	Depósito antrópico

SIMBOLOGÍA	
	Centro poblado
	Quebrada
	Vía local
	Vía nacional
	Vía férrea
	Río Rimac
	Relave
	Falla

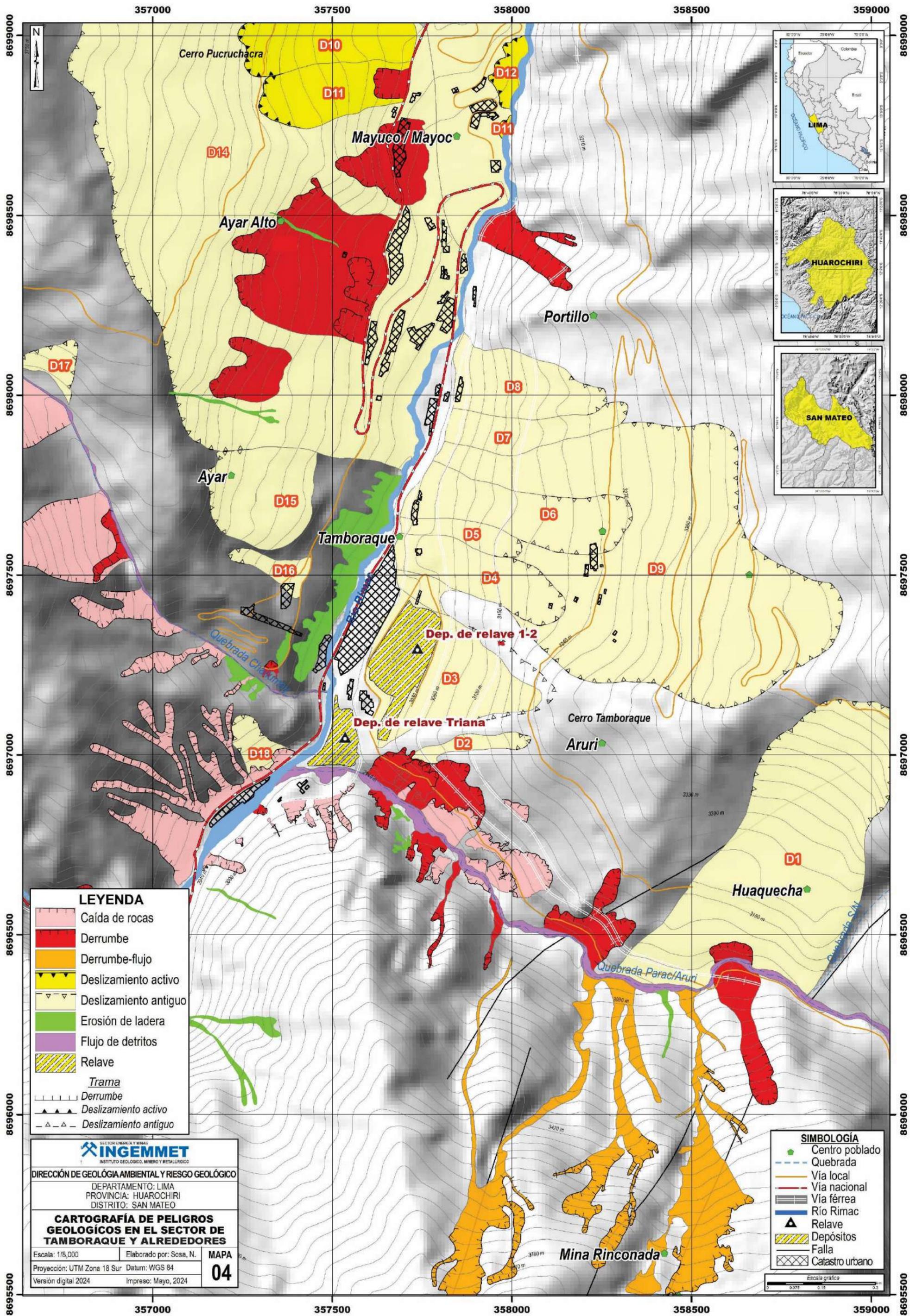
SECTOR ENERGÍA Y MINAS
INGEMMET
INSTITUTO GEOLOGICO, MINERO Y METALURGICO

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

DEPARTAMENTO: LIMA
 PROVINCIA: HUAROCHIRI
 DISTRITO: SAN MATEO

GEOMORFOLOGÍA EN EL SECTOR TAMBORAQUE Y ALREDEDORES

Escala: 1/10,000	Elaborado por: Sosa, N.	MAPA 03
Proyección: UTM Zona 18 Sur Datum: WGS 84		
Versión digital 2024	Impreso: Mayo, 2024	



LEYENDA

- Caída de rocas
 - Derrumbe
 - Derrumbe-flujo
 - Deslizamiento activo
 - Deslizamiento antiguo
 - Erosión de ladera
 - Flujo de detritos
 - Relave
- Trama*
- Derrumbe
 - Deslizamiento activo
 - Deslizamiento antiguo

SIMBOLOGÍA

- Centro poblado
- Quebrada
- Vía local
- Vía nacional
- Vía férrea
- Río Rimac
- Relave
- Depósitos
- Falla
- Catastro urbano

INGEMMET
INSTITUTO GEOLOGICO, MINERO Y METALURGICO

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

DEPARTAMENTO: LIMA
PROVINCIA: HUARACHIRI
DISTRITO: SAN MATEO

**CARTOGRAFÍA DE PELIGROS
GEOLOGICOS EN EL SECTOR DE
TAMBORAQUE Y ALREDEDORES**

Escala: 1/8,000 Elaborado por: Sosa, N. MAPA
Proyección: UTM Zona 18 Sur Datum: WGS 84 **04**
Versión digital 2024 Impreso: Mayo, 2024

