

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A7270

EVALUACIÓN DE PELIGRO GEOLÓGICO POR LAHARES (HUAYCOS) EN EL DISTRITO DE CAYMA

Departamento Arequipa
Provincia Arequipa
Distrito Cayma



JUNIO
2022

EVALUACIÓN DE PELIGRO GEOLÓGICO POR LAHARES (HUAYCOS) EN EL DISTRITO DE CAYMA

(Distrito Cayma, provincia Arequipa, departamento Arequipa)

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

Equipo de investigación:

Nélida Manrique Llerena

David Arteaga Utani

Referencia bibliográfica

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2022) - *Evaluación de peligro geológico por lahares (huaycos) en el distrito de Cayma. Distrito Cayma, provincia Arequipa, departamento Arequipa*. Lima: Ingemmet, Informe Técnico N° A7270, 66 p.

INDICE

RESUMEN.....	6
1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. Objetivos	7
1.2. Antecedentes y trabajo anteriores	8
2. DEFINICIONES.....	10
2.1. Erupción volcánica	10
2.2. Complejo Volcánico Chachani	11
2.3. Lahares.....	12
2.4. Lahares primarios.....	12
2.5. Lahares secundarios	13
2.4. Corriente de densidad piroclásticas (PDC).....	14
3. CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO.....	14
3.1. Pendiente del terreno	14
3.2. Unidades geomorfológicas	15
4. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	18
4.1. Unidades Litoestratigráficas.....	19
5. EVALUACIÓN DE PELIGRO GEOLÓGICO POR FLUJO DE DETRITOS (LAHARES).....	25
5.1. Quebrada Innominaada	26
5.2. Quebrada Tributaria	27
5.3. Quebrada Pastoraíz	29
5.4. Quebrada San Pedro.....	31
5.5. Quebrada Villa Continental	33
5.6. Quebrada Azufra (sector Gamarra)	34
5.7. Quebrada Azufra (sector Lari Lari y Tucos).....	37
5.8. Quebrada Canchero.....	39
5.9. Quebrada Chullo	40
6. SIMULACIONES DE FLUJOS DE DETRITOS (LAHARES).....	44
6.1. Procedimientos previos a las simulaciones de lahares	44
6.2. Volúmenes empleados en la simulación de flujos de detritos (lahares)	47
6.3. Resultados de simulación de flujo de detritos (lahares) en el distrito de Cayma. ...	48
7. POSIBLE INFRAESTRUCTURA AFECTADA POR LAHARES	48
7.1. Simulación en la quebrada Innominaada	50
7.2. Simulación en la quebrada Tributaria	51
7.3. Simulación en la quebrada Pastoraíz	52

7.4. Simulación en la quebrada San Pedro	54
7.5. Simulación en la quebrada Villa Continental	54
7.6. Simulación en la quebrada Azufral (sector Gamarra, Lari Lari y Tucos)	55
7.7. Simulación en la quebrada Canchero	56
7.8. Simulación en la quebrada Chullo	57
8. CONCLUSIONES	59
9. RECOMENDACIONES	60
BIBLIOGRAFÍA	61
ANEXO: MAPAS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del distrito de Cayma, provincia y región Arequipa, según el Instituto Geográfico Nacional - IGN.	9
Figura 2. Histograma de precipitación diaria de la estación pampilla (SENAMHI).	10
Figura 3. Erupción del volcán Ubinas del 3 de setiembre del 2013. Fuente: Observatorio Vulcanológico del INGEMMET.	11
Figura 4. Edificios del sur del Complejo Volcánico Chachani.	11
Figura 5. Trayectoria de un lahar idealizado y relaciones geométricas entre H y L, que describen la extensión de la zona de peligro proximal. A y B, describen la extensión de la zona de peligro de inundación del lahar distal. (Iverson, et al, 1998).	12
Figura 6. Depósitos de lahares primarios del volcán Coropuna, Condesuyos-Arequipa. Fuente: Google Earth.	13
Figura 7. Lahares secundarios recientes en la quebrada Canchero.	13
Figura 8. Estratocono inferior y superior del volcán misti.	16
Figura 9. Valle encañonado del río Chili.	18
Figura 10. Ignimbrita Rio Chili en el sector de Chapi Chico.	19
Figura 11. Unidad 5 del estratovolcán Estribo.	21
Figura 12. Bloques de roca (hummocks) sobre la avalancha de escombros.	22
Figura 13. Unidades CC-m4-1 perteneciente al estratovolcán Misti.	23
Figura 14. Morrenas neoglaciales al noreste del Complejo Volcánico Chachani.	24
Figura 15. Depósitos de lahares recientes en la quebrada Canchero.	25
Figura 16. Mapa de ubicación de las quebradas en el distrito de Cayma.	26
Figura 17. Quebrada Innominada con afloramiento de PDCs Cabrerías.	27
Figura 18. Botadero de basura cercano a la quebrada Innominada y al cruce afirmado del A.H. Los Jazmines.	27
Figura 19. Quebrada tributaria con un muro de contención en la margen izquierda.	28
Figura 20. Canchas deportivas en la quebrada Tributaria.	29
Figura 21. Viviendas de ladrillos y material prefabricado en la quebrada Tributaria.	29
Figura 22. Mapa de ubicación de perfiles y columnas en la quebrada Pastoraíz.	30
Figura 23. Sección transversal A – A´ de la parte alta de la quebrada Pastoraíz.	31
Figura 24. Hacia la derecha fotografía de la columna y a la izquierda la digitalización de la misma.	31
Figura 25. Parte alta de la quebrada San Pedro mostrando áreas recreativas y una cancha deportiva.	32
Figura 26. Quebrada San Pedro en el sector medio.	32
Figura 27. Sector bajo de la quebrada San Pedro en confluencia con la quebrada Azufra.	33
Figura 28. Sector alto de la quebrada Villa continental, observándose depósitos residuales y de desmonte.	33
Figura 29. Dirección de la quebrada Villa Continental en confluencia con la quebrada Azufra.	34
Figura 30. Mapa de ubicación de perfiles y columnas en la quebrada Azufra (Sector Gamarra).	35
Figura 31. Perfil B – B´ de la Quebrada Azufra (sector Gamarra).	36
Figura 32. Zona de levantamiento del perfil B-B´ de la Quebrada Azufra (sector Gamarra). (Coordenadas UTM WGS84 229555 E, 8196635 N).	36
Figura 33. Columna estratigráfica levantada en el sector intermedio de la quebrada Azufra (sector Gamarra) (Coordenadas UTM WGS84 229555 E, 8196635 N).	36
Figura 34. Mapa de ubicación de perfiles y columna en la quebrada Azufra (Sector Lari Lari y Tucos).	37
Figura 35. Sección transversal C – C´ de la quebrada Azufra (sector Lari Lari y tucos).	38

Figura 36. Zona de levantamiento del perfil E-E' de la Quebrada Azufral (sector Lari Lari y Tucos) (Coordenadas UTM WGS84 227948 E, 8195021 N).	38
Figura 37. Columna estratigráfica de la quebrada Azufral (Sector Lari Lari y Tucos).	39
Figura 38. Mapa de ubicación de la quebrada Canchero.	40
Figura 39. Mapa de ubicación de la quebrada Chullo y la divisoria de aguas.	41
Figura 40. Quebrada Chullo parte alta.	42
Figura 41. Quebrada Chullo año 2014 (izquierda) y año 2021(derecha), se observa que el cauce de la quebrada ha erosionado la ladera y socavando el curso del mismo (Coordenadas UTM WGS84 227322 E, 8187219 N).	42
Figura 42. Columna estratigráfica en la quebrada Chullo.	43
Figura 43. Quebrada Chullo al límite del distrito de Cayma y Yanahuara observándose material residual y muros de concreto.	43
Figura 44. Esquema generalizado del área de generación de un flujo de detritos y lahares secundarios. (tomado de Soncco., Y. et al 2021. Libro de resúmenes extendidos XX Congreso Peruano de Geología, (2021)).	46
Figura 45. Mapa de lahares del distrito de Cayma.	48
Figura 46. Simulación de lahares en la quebrada Imnominada.	51
Figura 47. Simulación de lahares en la quebrada Tributaria.	51
Figura 48. Simulación de lahares (peligro bajo, moderado y alto) en la quebrada Pastoraíz.	52
Figura 49. Puente en el sector alto, quebrada Pastoraíz.	53
Figura 50. Puente sector medio, quebrada Pastoraíz.	53
Figura 51. Muros de menos de 1 metro, quebrada Pastoraíz.	53
Figura 52. Simulación de lahares (peligro bajo, moderado y alto) en la quebrada San Pedro.	54
Figura 53. Simulación de lahares (peligro bajo, moderado y alto) en la quebrada Villa Continental.	54
Figura 54. Simulación de lahares (peligro bajo, moderado y alto) en la quebrada Azufral.	55
Figura 55. Cruce afirmado (Punto crítico), sector de Gamarra, observándose depósitos de desmonte y basura vertidos en la quebrada.	55
Figura 56. Puente (Punto crítico) en la quebrada Azufral (sector Gamarra), observándose PDC Cabrerías. En margen derecho.	56
Figura 57. Quebrada Canchero atravesando áreas urbanas.	56
Figura 58. Simulación de lahares (peligro bajo, moderado y alto) en la quebrada Chullo.	57
Figura 59. Puente en el sector alto de la quebrada Chullo (Coordenadas UTM WGS84 227127 E, 8187569 N).	58
Figura 60. La quebrada Chullo pasando cerca al Colegio Lord Byron de acuerdo a la simulación presenta un nivel de peligrosidad “Moderado”	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cálculo de volumen del lahar de las quebradas del distrito de Cayma, resultado de la multiplicación del área de generación de lahares por los distintos grados de precipitación (baja, media y alta).	47
Tabla 2. Ubicación (UTM WGS84) de los puntos críticos y el nivel de peligrosidad en las quebradas que atraviesan áreas urbanas en el distrito de Cayma.	50

RESUMEN

El presente informe es el resultado de la evaluación de peligros geológicos por lahares en las quebradas que descienden del Complejo Volcánico Chachani realizado en el distrito de Cayma, provincia y departamento de Arequipa. Con este trabajo el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET, cumple con una de sus funciones que consiste en brindar información actualizada, confiable, oportuna y accesible sobre la geología en este caso a nivel distrital.

Las subunidades geomorfológicas sobre las cuales se ha asentado la población de Cayma son: geoformas de carácter volcánico entre ellas el estratovolcán, estratocono inferior, estratocono superior, colina o lomada de flujo de lava, ladera piroclástica y volcanoclástica, ladera piroclástica y de avalancha de escombros, flujo de lava en bloques del pleistoceno tardío, domo-coladas; asimismo se han identificado geoformas de carácter glacial entre ellas morrenas anterior al máximo avance glacial, morrena Neoglacial; también geoformas de carácter fluvial y deposicional como abanico aluvial, abanico de deshielo, planicie aluvial, valle encañonado o valle-cañón; finalmente geoformas de carácter antrópico como una represa.

Los depósitos condicionantes para la ocurrencia de flujo de detritos (lahares) es la presencia de flujos piroclásticos del Neógeno y Cuaternario de poca y moderada consolidación, ubicándose en la faja marginal del Rio Yura, el depósito piroclástico de bloques y ceniza perteneciente al domo-colada Cabrerías de bajo grado de consolidación con bloques decimétricos, angulosos y densos. Además, depósitos cuaternarios (aluviales y coluviales) formado por gravas, bloques lávicos de tamaños centimétricos y decimétricos. Las pendientes en las laderas de las quebradas donde podrían ocurrir los lahares son: fuerte (12° - 30°), muy fuerte (30° - 45°) a muy escarpado ($>45^{\circ}$).

El mapa de peligros en el distrito de Cayma fue elaborado en coordinación con la municipalidad distrital de Cayma, se identificaron 13 quebradas, realizando la evaluación técnica (ubicación de puntos críticos) de 8 quebradas que recorren el distrito de Cayma.

En el distrito de Cayma, se presentan 73 puntos críticos dentro de las cuales figura 24 cruces afirmados, 25 instituciones educativas (inicial, primario, secundario y técnico) 13 puentes, 7 canchas deportivas, 2 parques, 1 reservorio de agua y 1 policlínico representando peligro de nivel bajo, moderado y alto; en caso ocurriera un peligro de este tipo, dañando directa e indirectamente a los vecinos del distrito.

Finalmente, se brinda recomendaciones, a las autoridades competentes que podrían poner en práctica, a fin de evitar la construcción de viviendas o infraestructuras en zonas de alto peligro no mitigable.

1. INTRODUCCIÓN

El Complejo Volcánico Chachani (CVC) forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC), es uno de los trece volcanes activos y potencialmente activos del sur del Perú (de Silva y Francis, 1991). La subducción de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa continental sudamericana ha generado la existencia de un arco volcánico calco-alcalino desde el Jurásico al Reciente, situado sobre la cordillera occidental de los Andes.

La historia geológica del Complejo Volcánico Chachani evidencia que su actividad ha sido explosiva y efusiva, generando depósitos de tefra, flujos de lava, flujos de domo, corrientes de densidad piroclástica y lahares. Aunque el Chachani es considerado un volcán potencialmente activo no se descarta una posible erupción que podría generar muchos daños a la población de Arequipa, ya que los distritos de Cayma, Yanahuara, Cerro Colorado y Yura se encuentran asentados en los alrededores de este complejo.

Aun cuando los volcanes Misti y Chachani no se encuentran en proceso eruptivo, las quebradas que descienden del Chachani durante los periodos de lluvias se reactivan y por ellas descienden lahares que afectan a la población e infraestructura de los distritos antes mencionados. Por ejemplo, en el 2017 las constantes precipitaciones pluviales generaron ingresos de lahares en la planta de tratamiento de agua potable Miguel de la Cuba Ibarra, desabasteciendo del recurso hídrico a cerca de 600 mil habitantes de la ciudad de Arequipa.

El distrito de Cayma se encuentra asentado sobre depósitos volcánicos asociados a los volcanes Misti y Chachani, y las quebradas que descienden del Complejo Volcánico Chachani atraviesan el área urbana del distrito. La mayor parte del año las quebradas están secas debido al clima árido de Arequipa, sin embargo, durante los periodos de lluvias está quebradas se reactivan generando lahares que afectan a la infraestructura y población que están en el cauce o alrededores de las quebradas.

El presente estudio “Evaluación de peligro geológico por lahares (huaycos) en el distrito de Cayma”, referido al complejo volcánico Chachani forma parte del proyecto de investigación GA-17F: “Estudiar y evaluar los peligros asociados a los volcanes Chachani y Casiri” efectuado por la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo del INGEMMET a través del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET. En él, se busca estudiar y evaluar los peligros por lahares en las quebradas que descienden del CVC e identificar puntos críticos en el distrito de Cayma.

1.1. Objetivos

- a) Realizar la identificación y tipificación de las quebradas que se encuentran en el distrito de Cayma

- b) Realizar la simulación en las quebradas que recorren el área urbana del distrito de Cayma: Innominada, Tributaria, Pastoraíz, San Pedro, Villa Continental, Azufra (sector Gamarra), Azufra (sector Lari Lari y Tucos), Azufra, Canchero y Chullo.
- c) Realizar la evaluación de los puntos críticos en las quebradas simuladas en el distrito de Cayma.

1.2. Antecedentes y trabajo anteriores

- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. Límites de expansión urbana hacia los volcanes Misti y Chachani: INGEMMET, Informe técnico N° A6658. 16p. Se menciona que el fundo Cabrerías perteneciente al distrito de Cayma presenta terrenos agrestes y zonas de alto peligro volcánico, los cuales han sido aplanados con maquinaria pesada para la venta de terrenos, lo cual resulta un terreno bastante peligroso para habitar, ya que en épocas de lluvia no habrá los drenajes naturales para que circulen las aguas.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. Peligros geológicos en la asociación de vivienda Los Jazmines de Cayma: Región Arequipa: INGEMMET, Informe técnico N° A6786. 18p. En el estudio presentan los resultados de la inspección geológica de la zona, realizando un análisis de los peligros geológicos dentro de los cuales también se encuentran la ocurrencia de lahares que pueden comprometer la seguridad física de la población que reside en el lugar.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. Evaluación de peligros en la quebrada Mategente – Charcani. Distrito de Cayma, provincia y región de Arequipa: INGEMMET, Informe técnico N° A6811, 25p. En el estudio se realizó la inspección de la quebrada Mategente que debido a las lluvias intensas ocurridas en febrero del 2017 produjo el ingreso de un flujo de lahar que provocó daños de la línea de conducción de agua cruda a la planta de tratamiento de agua potable La Tomilla II, de la Empresa de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Arequipa SEDAPAR, desabasteciendo alrededor de 300000 usuarios de la ciudad de Arequipa del servicio de agua potable, por un periodo de 11 días catalogándolo como una zona de alto peligro.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. Peligros geológicos en zonas de explotación de laderas en la cuenca del valle del río Chili, sector Alto Cayma Arequipa: Distrito de Cayma, provincia y región de Arequipa: INGEMMET, Informe técnico N° A6846. 27p. En dicho informe se realiza un análisis de los peligros volcánicos, la zona de estudio perteneciente al distrito de Cayma, encontrándose lahares históricos y también material expuesto que podría ser removido durante periodos de lluvia afectando carreteras cercanas y terrenos de cultivo.

➤ **Ubicación**

La zona de estudio está ubicada en el distrito de Cayma, provincia y región Arequipa (Fig. 1). Se encuentra a 17,5 km al oeste del volcán Misti y a 20 km al sureste del Complejo Volcánico Chachani. Las coordenadas UTM y geográficas de la zona de estudio son (Cuadro 1):

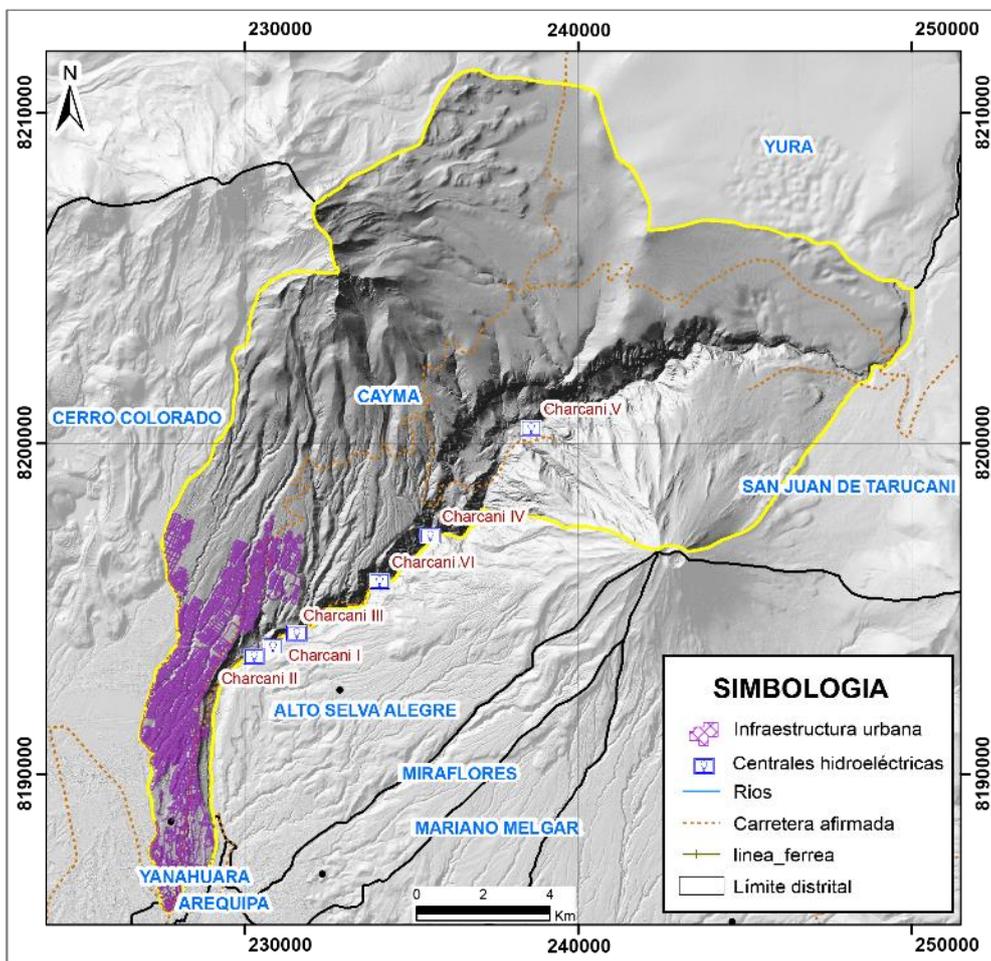


Figura 1. Ubicación del distrito de Cayma, provincia y región Arequipa, según el Instituto Geográfico Nacional - IGN.

UTM – WGS84 – ZONA 19S		Geográficas	
Este	Norte	Latitud	Longitud
228090.17 m	8187161.94 m	16°22'53.34"S	71°32'44.13"O

Cuadro 1. Coordenadas de la plaza del distrito de Cayma, provincia y región de Arequipa.

➤ **Accesibilidad**

El acceso vía terrestre al distrito de Cayma, desde el observatorio vulcanológico (OVI) del INGEMMET, sigue la siguiente ruta:

Ruta	Tipo de vía	Distancia (km)	Tiempo estimado
OVI - av. José Abelardo Quiñones	Asfaltada	0.75	4 minutos
av. José Abelardo Quiñones –	Asfaltada	0.40	3 minutos

av. Trinidad Morán			
av. Trinidad Morán - av. Cayma	Asfaltada	1.10	5 minutos

Cuadro 2. Rutas y accesos al distrito de Cayma, provincia y departamento de Arequipa.

➤ Aspectos socioeconómicos

El distrito de Cayma alberga alrededor de 91935 habitantes, con 33112 viviendas, 29806 viviendas ocupadas, 21674 viviendas construidas con material de ladrillo o bloque con cemento, 2907 construidas con material de adobe, tapia, quincha, piedra con barro, madera, triplay u otro (INEI, 2017). Entre la población del distrito de Cayma 6789 personas se dedican a ocupaciones elementales (peón, vendedores ambulantes y afines), 947 personas su fuente de ingreso es por trabajos de agricultura, agropecuarios, forestales y pesqueros. Además 2759 personas se encuentran desempleadas (INEI, 2017).

➤ Precipitación pluvial

En el distrito de Cayma el periodo de precipitaciones ocurre entre los meses de diciembre a marzo (época húmeda) y durante los meses de abril a noviembre hay ausencia de las mismas (época seca). Según la información disponible del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), la estación Pampilla entre los años 1931 al 2020 (Fig. 2), muestra que en el distrito de Cayma se ha generado una precipitación máxima de 125 mm, precipitación intermedia de 50 mm y la precipitación mínima de 25 mm.

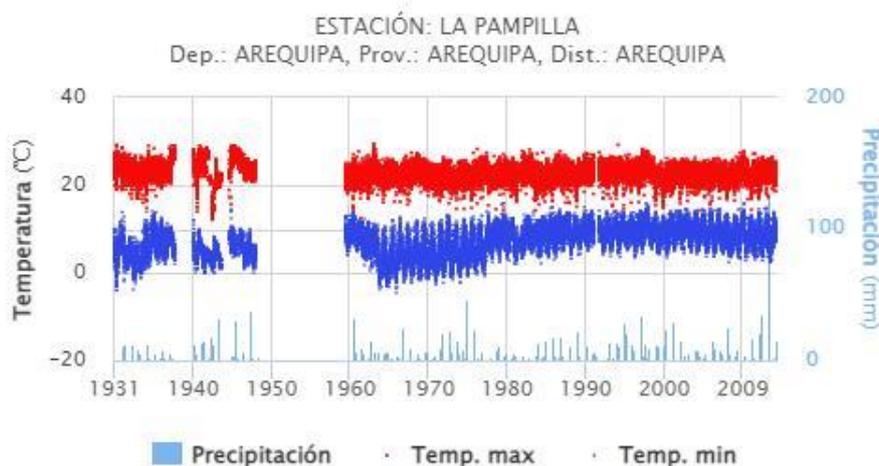


Figura 2. Histograma de precipitación diaria de la estación pampilla (SENAMHI).

2. DEFINICIONES

2.1. Erupción volcánica

Son los procesos durante los cuales el magma y sus gases asociados (Fig. 3) ascienden hacia la corteza y son emitidos hacia la superficie de la Tierra y la atmósfera. Las erupciones volcánicas varían ampliamente, tanto en magnitud como en duración y muestran un amplio espectro de estilos eruptivos y procesos. Los vulcanólogos

describen tradicionalmente las erupciones en términos derivados de los tipos de actividad característicos de volcanes particulares o regiones volcánicas (Siebert et al, 2015).



Figura 3. Erupción del volcán Ubinas del 3 de setiembre del 2013. Fuente: Observatorio Vulcanológico del INGEMMET.

2.2. Complejo Volcánico Chachani

Es un aparato volcánico que se encuentra formado por al menos 12 edificios volcánicos, divididos por edificios antiguos y recientes (Fig. 4), entre ellos cinco conos compuestos, cuatro cúmulo-domos y un voluminoso conjunto de domos-colada, además, un extenso campo de lavas hacia el oeste, sur y suroeste. El Complejo Volcánico Chachani es considerado como un sistema de larga duración, cuya actividad habría durado al menos 1.2 Ma de edad.



Figura 4. Edificios del sur del Complejo Volcánico Chachani.

2.3.Lahares

Los lahares se producen durante una erupción o tranquilidad volcánica (Tilling, 1993). Ocurren cuando grandes masas de agua mezclados con sedimentos volcánicos se desplazan quebrada abajo, que comúnmente incorporan agua y sedimentos adicionales (Fig. 5). Los fragmentos de roca contenidos en los lahares los hacen especialmente destructivos; el abundante líquido contenido en estos les permite fluir sobre pendientes suaves e inundar áreas lejanas a su origen. Pueden comprender uno o más tipos de flujos, los que incluyen ‘flujos de detritos’ y ‘flujos hiperconcentrados’ o ‘transicionales’. Las transiciones entre los tipos de flujos son definidos en base a la fracción de sólidos que poseen; sin embargo, estas transiciones son gradacionales y dependen de otros factores, como el tamaño de los sedimentos, mineralogía de arcillas, agitación de las partículas y la energía del flujo (Vallance & Iverson, 2015).

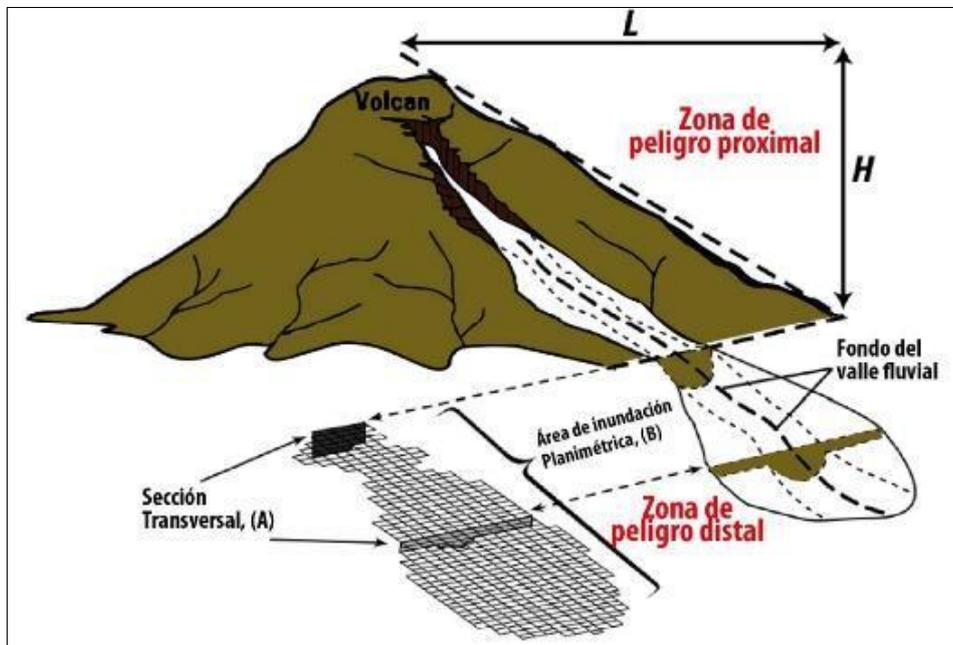


Figura 5. Trayectoria de un lahar idealizado y relaciones geométricas entre H y L , que describen la extensión de la zona de peligro proximal. A y B, describen la extensión de la zona de peligro de inundación del lahar distal. (Iverson, et al, 1998).

2.4.Lahares primarios

Los lahares primarios se originan durante erupciones de volcanes nevados (Fig. 6), son el resultado de la combinación de mecanismos físicos relacionados con el fenómeno eruptivo como la expulsión de ceniza, material piroclástico y flujos de lava incandescente que provocan el derretimiento súbito de una porción del glaciar (Vera et al, 2019).



Figura 6. Depósitos de lahares primarios del volcán Coropuna, Condesuyos-Arequipa. Fuente: Google Earth.

2.5.Lahares secundarios

Los lahares secundarios se originan en los flancos de los volcanes, arrastrando sedimentos compuestos de depósitos piroclásticos recientes y no consolidados. Estos flujos pueden transportarse hasta cientos de kilómetros corriente abajo desde el cono volcánico, se componen principalmente de roca, ceniza y agua (Fig. 7). Típicamente se generan por infiltración de aguas lluvia, debido a la precipitación que sigue a la depositación de tefra u otros depósitos asociados a una erupción volcánica (Fuentes, D; 2015).



Figura 7. Lahares secundarios recientes en la quebrada Canchero.

2.4. Corriente de densidad piroclásticas (PDC)

Son corrientes extremadamente calientes, llegan a tener temperaturas entre 300 a 700° C, conformadas por una mezcla de ceniza, fragmentos de rocas y gases. Descienden por los flancos del volcán a grandes velocidades, se construye por una parte inferior densa y otra menos densa conocida como oleada piroclástica, compuesta por una nube de gases y ceniza destruyendo, calcinando y enterrando todo lo que se encuentra a su paso.

3. CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO

3.1. Pendiente del terreno

La pendiente de los terrenos es uno de los principales factores dinámicos y particularmente de los flujos de detritos (lahares), ya que determinan la cantidad de energía cinética y potencial de una masa inestable (Sánchez et al, 2002).

Para la elaboración del mapa de pendientes del distrito de Cayma se utilizó un mapa topográfico y el modelo de elevación digital (DEM), obtenido por medio de la imágenes satelitales SPOT 10 m, utilizando el software ArcGis 10.5.

Según el método (Lugo, 1988) se tomaron en consideración 5 rangos o grados de pendiente de los terrenos, los cuales van desde suave, moderado, fuerte, muy fuerte pendiente y muy escarpado; estos se describen a continuación (Anexo 1).

➤ Suave (0° -3°)

Son terrenos planos con ligera inclinación que se distribuyen a lo largo de las zonas de fondos de valles, planicies, abanicos aluviales y zonas distales de las laderas piroclásticas y volcanoclásticas de los volcanes Misti y Chachani, al extremo noreste del distrito de Cayma.

➤ Moderado (3° -12°)

Los terrenos de pendiente moderada se presentan principalmente en zonas de laderas piroclásticas y volcanoclásticas, flujos de lava en bloques y planicies piroclásticas y volcanoclásticas hacia el norte y sureste del CVC.

➤ Fuerte (12° -30°)

Estas pendientes se presentan en el edificio Estribo del CVC al norte del distrito de Cayma y en el estratocono inferior y superior del volcán Misti.

➤ Muy fuerte (30° -45°)

Se encuentran distribuidas en las laderas de los estratovolcanes Estribo y Misti, domo Cabrerías, formando acantilados y en el cañón del río Chili.

➤ **Muy escarpado (>45°)**

En el distrito de Cayma este tipo de pendientes se presentan en las partes altas del cañón del río Chili y en las partes más elevadas del edificio Estribo del CVC.

3.2.Unidades geomorfológicas

Para la elaboración del mapa geomorfológico (Anexo 2), se ha empleado las especificaciones técnicas DGAR-ET-002 V-2 para clasificar y caracterizar las unidades geomorfológicas elaboradas por el INGEMMET a escala 1:25,000.

3.2.1. Geformas de carácter volcánico

➤ **Estratovolcán (EV)**

Esta geoforma corresponde al edificio Estribo, el cual se encuentra formado por sucesiones de flujos de lava, corrientes de densidad piroclástica (PDC) y depósitos de caídas de tefras. El edificio ha sido afectado por la glaciación, dejando 3 anfiteatros de hasta 1,5 km de ancho. Presenta un drenaje paralelo, con pendientes muy fuertes (30° a 45°) a muy escarpadas (>45°) y alcanza una altitud máxima de 5300 msnm.

➤ **Estratocono inferior (EC-in)**

El estratocono inferior del Misti (Fig.8), se ubica entre los 3000 y 4400 msnm. Se caracteriza por presentar pendientes moderadas a fuertes (entre 12° y 30°), y un sistema de drenaje radial, con quebradas de 10 a 50 m de profundidad. Los flujos de lava poseen entre 10 y 50 m de espesor. Superficialmente está cubierto por depósitos volcanoclásticos (Mariño et al., 2016).

➤ **Estratocono superior (EC-su)**

El estratocono superior (Fig. 8) del volcán Misti se extiende entre los 4400 y 5822 msnm. Posee moderada a fuerte pendiente, entre 30° y 70°, además de un drenaje radial. Está conformado por flujos de lava emplazados entre 50 y 14 mil años según Thouret et al., (2001), que son parcialmente cubiertos por depósitos de caídas piroclásticas históricas.

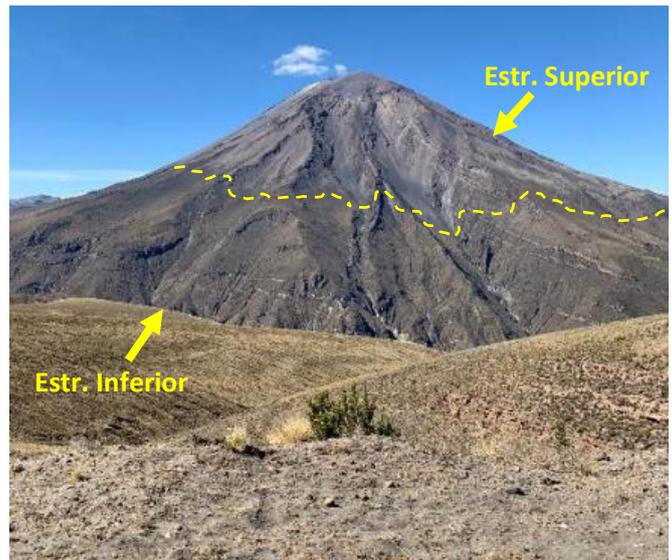


Figura 8. Estratocono inferior y superior del volcán misti.

➤ **Colina o lomada de flujo de lava (CL-fl)**

En la zona de estudio se ubica al este del Complejo Volcánico Chachani, entre los 4200 a 4400 m s.n.m. en el sector de Pampa Cañahuas, la erosión de los flujos de lava ha generado superficies redondeadas y de pendiente suave ($<20^\circ$ de inclinación) que a su vez se encuentran disectadas por valles y quebradas. Estas colinas de lavas están orientadas en forma de un semicírculo que podrían representar el borde de una posible caldera formada después de la erupción de las Ignimbritas Aeropuerto de Arequipa (García et al., 1997), sobre la cual se habría construido el Complejo Volcánico Chachani.

➤ **Ladera piroclástica y volcanoclástica (LA-pv)**

La ladera piroclástica y volcanoclástica está relacionada a afloramientos de depósitos de corrientes de densidad piroclástica de bloques y ceniza, tefra, lahares y depósitos volcanoclásticos del Chachani. Estos depósitos se caracterizan por presentar material no consolidado, drenaje paralelo. Las quebradas que atraviesan el área urbana presentan pendientes fuertes (12° - 30°), mientras que las más distales son muy fuertes (30° - 45°). Estos depósitos constituyen gran parte del distrito de Cayma.

➤ **Ladera piroclástica y de avalancha de escombros (LA-pav)**

La Ladera de avalancha de escombros ubicada a la margen derecha del río Chili, se encuentran a una altitud máxima de 3250 m s.n.m. presenta pequeñas colinas cónicas de 140 m de diámetro asociadas a la presencia de megabloques, correspondiendo al depósito de avalancha de escombros producto del colapso del flanco noroeste del volcán Misti. Presentan pendientes moderadas (3° a 12°) a fuertes (12° - 30°).

➤ **Flujo de lava en bloques del pleistoceno tardío (FL-bpt)**

En el distrito de Cayma hacia el norte, se observan flujos de lava en bloques del pleistoceno tardío correspondientes al edificio Estribo, principalmente en las cabeceras de cuencas, muchos de estos flujos de lava se encuentran bastante erosionados, sin embargo, es posible identificar en algunos la dirección de flujo. Los flujos de lava alcanzan distancias máximas de 5 km desde la fuente de origen y poseen espesores que oscilan entre 30 y 170 metros en los frentes de lava.

➤ **Domo-coladas**

El domo-coladas Cabrerías se ubica al norte del distrito de Cayma, en el sector sureste del Chachani, presenta una altitud de 4340 m s.n.m., ocupando un área aproximada de 10.2 km²; esta geoforma posee pendientes fuertes (12°-30°) a muy fuertes (30°-45°), con diámetro de 700 m y un espesor de 110 m.

3.2.2. Geoformas de carácter glacial

➤ **Morrena anterior al máximo avance glacial (MO-a-mag)**

Estas morrenas se ubican a 4km al suroeste de la cumbre del edificio Estribo, alcanzan hasta 1,78 km de distancia y se encuentran a 3880 m s.n.m. de altitud. Presentan superficies ovaladas con espesores de 300 m, ancho de 400 m aproximadamente y pendientes fuertes (12°-30°) a muy fuertes (30°-45°).

➤ **Morrena neoglacial (MO-n)**

Estas geoformas se originaron durante los últimos 12 mil años, se encuentran hacia el norte del distrito de Cayma, con formas alargadas y sinuosas, con 4600 m s.n.m. de altitud, varias llegando a preservar los frentes centrales, este tipo de morrenas corresponden a la segunda generación después de MO-a-mag.

3.2.3. Geoformas de carácter fluvial y deposicional

➤ **Abanico aluvial (A-a)**

Es una geoforma deposicional que se ubica al oeste del distrito de Cayma, se encuentra limitado con la planicie ignimbrítica, también por la ladera piroclástica y volcanoclástica, presenta pendientes suaves (0°-3°) presentando un drenaje dendrítico-radial.

➤ **Abanico de deshielo (A-d)**

Corresponde a depósitos fluvioglaciares, producto del deshielo de los glaciares en la parte alta del edificio Estribo a 4950 m s.n.m. estos depósitos se caracterizan por presentar drenaje dendrítico con quebradas de poca profundidad entre 1 y 5 m.

➤ **Planicie aluvial (PL-a)**

Se encuentra al noreste del distrito de Cayma en la Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca, hacia el oeste y al extremo sur del distrito, posee un relieve semi plano con pendientes suaves (0° - 3°), se encuentra limitada por laderas y planicies piroclásticas y volcanoclásticas, además presenta un drenaje paralelo.

➤ **Valle encañonado o valle-cañón (VII-e)**

Esta geoforma se encuentra ubicado entre los dos volcanes Misti y Chachani (Fig. 9) al límite del distrito de Cayma. Las laderas del cañón del río Chili presentan pendientes muy pronunciadas con 60° aproximadamente alcanzando una profundidad de 800-1000 m.



Figura 9. Valle encañonado del río Chili.

3.2.4. Geoformas de carácter antrópico

➤ **Represa Aguada Blanca**

Esta geoforma antrópica se construyó en el año de 1972, perteneciente a la Cuenca del río Chili llegando a alcanzar una altitud de 3740 m s.n.m. con una longitud de corona de 80 m y de 5m de ancho con una capacidad de 43Hm³.

4. CONTEXTO GEOLÓGICO

En el distrito de Cayma, el análisis geológico inicial se desarrolló en base a las Cartas Geológicas elaboradas por el INGEMMET a escala 1: 50 000 pertenecientes al cuadrángulo de Characato (33t4) y Arequipa (33s1). Posteriormente en el proyecto GA17D “Estudio de peligros del Complejo Volcánico Chachani” (2018, 2019, 2020 y 2021) y el proyecto GA17F “: Estudiar y Evaluar los peligros de los volcanes Chachani” se cartografió a escala 1: 25 000 (Anexo 3). A continuación, se describen las características de dichas formaciones y/o secuencias.

4.1. Unidades Litoestratigráficas

4.1.1. Gneis de Charcani (PP-ch)

En el valle del río Chili aflora el gneis Charcani, posee una granulometría gruesa a media, se encuentra bandeado; presenta niveles de esquistos micáceos y filitas; esta unidad se encuentra datada en 1012 ± 52 Ma de edad (Mariño et al, 2016). Presenta de moderada a baja erosión por el grado de consolidación que presenta la litología.

4.1.2. Ignimbrita Río Chili (Nm-II)

Aflora en toda la depresión de Arequipa hacia la base de los volcanes Misti y Chachani. Esta ignimbrita de 50 a 200 m de espesor, endurecida a parcialmente consolidada, por sectores se encuentra formando disyunción columnar (Fig. 10), con pómez deformado (fiammes) y desvitrificación generalizada, posee alto contenido de fenocristales de plagioclasa, anfíboles, biotita, sanidina, cuarzo y óxidos de Fe-Ti (Paquereau et al., 2006).



Figura 10. Ignimbrita Río Chili en el sector de Chapi Chico.

4.1.3. Ignimbrita La joya (Np-Ij)

Aflora en las zonas de Yarabamba, río Chili, Yura y La Joya, a lo largo de casi 800 km². Los depósitos no son soldados a ligeramente soldados y poseen espesores de 5 a 80 m y presentan fiammes. Ha sido datada en 4.89 a 4.78 Ma de edad y posee alto contenido de plagioclasa, sanidina, cuarzo, biotita, óxidos de Fe-Ti y anfíbol. De composición riolítica (Paquereau et al., 2006).

4.1.4. Depósitos volcanoclásticos (Qp-volc)

Secuencias intercaladas de depósitos de lahares, flujos de escoria, caídas de escoria y caídas de pómez, aflora en las ambas márgenes del cañón del río Chili, en la zona se encuentra

superponiendo a la ignimbrita La Joya y por sectores a la ignimbrita Río Chili, asimismo infrayace al Complejo Volcánico Chachani.

4.1.5. Depósitos piroclásticos (Qr-pi)

Depósitos piroclásticos distribuidos ampliamente al norte del volcán Misti y al este del Chachani, estos depósitos se encuentran representados por alternancia de capas de arena, lapilli y ceniza volcánica que a su vez se encuentran cubiertos en algunos sectores por depósitos clásticos más modernos.

4.1.6. Estratovolcán Estribo (Qp-Es 1,2, 3, 4, 5 y 6)

Este voluminoso estratovolcán está ubicado al noreste del distrito de Cayma, en el extremo sureste de Complejo Volcánico Chachani. Presenta seis unidades volcánicas Estribo 1, 2, 3, 4, 5 (Fig. 11) y 6.

Los depósitos iniciales del Estribo exhiben sedimentos volcanoclásticos cubiertos por depósitos hidroclásticos en el sector de “Charcani Grande”, las cuales contienen bombas tipo corteza de pan de tamaño decimétrico con textura brechada, intercaladas con depósitos de caída de pómez. Esta sucesión volcanoclástica tiene un espesor de 200 - 300 m, que se extiende a ambos márgenes del cañón del río Chili. La sucesión volcanoclástica, que abarca depósitos de lahar intercalados con depósitos de caída de pómez, se adelgaza hacia el sur; alcanzando los 50 m en Alto Cayma. Los flujos de lava andesítico son emplazados sobre las ignimbritas del Río Chili y La Joya en el cañón río Chili. También se encuentra sobre la unidad rosada superior de la ignimbrita Aeropuerto de Arequipa, la cual fue datada en 1.63 Ma (Paquereau-Lebti et al., 2006). Los depósitos volcanoclásticos podrían ser los primeros productos posteriores al colapso de la caldera y de la denudación de los edificios anteriores al Complejo Volcánico Chachani. Mientras que el Estribo medio consiste en flujos de lava andesítica, flujos de escoria y depósitos piroclásticos. Una discordancia angular ubicada a aproximadamente a 4,800 m s.n.m. permite distinguir la unidad inferior de la intermedia. Por otro lado, los flujos de lava andesítica del Estribo superior (Qp-Es5, 6) se extendieron a 10.4 km al noreste del cráter. Algunas unidades de flujos de lava han sido datadas entre 694.1 ± 74.9 ka y 808.5 ± 62.7 ka (Aguilar et al., 2022).



Figura 11. Unidad 5 del estratovolcán Estribo.

4.1.7. Domos-Colada Cabrerías (Qp-cab)

Estas unidades consisten en domos de lava y un grueso depósito de corriente de densidad piroclástica (PDC) de bloques y cenizas. El depósito piroclástico se encuentra a 9 km de la plaza del distrito de Cayma y representa uno de los depósitos de PDC de gran densidad, producido por el colapso de Cabrerías, que se ha emplazado en el flanco sur de los volcanes Estribo y el nevado Chachani. La unidad fue datada en 56.5 ± 31.6 ka de edad (Aguilar et al., 2022). El depósito tiene entre 10 y 15 m de espesor y contiene bloques densos porfiríticos, de composición dacítica, de hasta 1.5 m de diámetro. El depósito es suelto, matriz soportada de aproximadamente 60% de matriz y 40% de bloques en promedio, es posible observar una ligera laminación en algunos depósitos. Este depósito se encuentra poco consolidado de fácil erosión.

4.1.8. Avalancha de escombros (Av)

Estos depósitos se encuentran sobre la ignimbrita Aeropuerto de Arequipa. Alcanzó un recorrido mayor a los 22 km en dirección SO. Se encuentra compuesto por colinas cónicas (hummocks) (Fig. 12) y fragmentos heterogéneos de rocas pobremente consolidadas o no consolidadas, meteorizadas y de fácil erosión.



Figura 12. Bloques de roca (hummocks) sobre la avalancha de escombros.

4.1.9. Flujos de lava andesítica (Fl-Ba-Inf)

Estas lavas afloran entre 10 y 14 km al suroeste del Misti, presentan coloración gris verdosa, matriz afanítica y fenocristales de plagioclasas, anfíbol y piroxenos. Poseen espesores entre 25 y 50 m. Se encuentran infrayaciendo a los depósitos de avalancha de escombros, este depósito se encuentra poco fracturada y ligera meteorización. Datado en 6 Ma de edad (Rivera, 2010).

4.1.10. Edificio Misti 1 (Fl-m1)

Se encuentra formando la base del volcán Misti. Posee pendientes bajas y está formado por flujos de lava y depósitos de avalanchas de escombros, intercalados con depósitos volcanoclásticos y flujos de escoria. Este edificio se emplazó posiblemente entre 833 y 112 ka de edad. Las lavas poseen composición andesítica (60.4 a 62.2 % de SiO₂) y dacítica (64.2 % de SiO₂). Los depósitos de avalanchas de escombros presentan alta meteorización (Mariño et al, 2016) y moderado a alto fracturamiento.

4.1.11. Edificio Misti 2 (Fl-m2)

Fue construido entre los 112 y 40 ka de edad aproximadamente (Thouret et al., 2001). Está conformado por una intercalación de flujos de lava, flujos piroclásticos de bloques y ceniza, flujos de escoria, flujos piroclásticos de pómez y ceniza, así como caídas piroclásticas. Los depósitos de este edificio poseen composición andesítica (58.3 a 62.7 % SiO₂) y dacítica (63 % SiO₂) (Mariño et al, 2016). Los depósitos presentan baja consolidación y meteorización moderada a alta.

4.1.12. Edificio Misti 3 (Fl-m3)

El edificio Misti 3 se emplazó después de 40-50 ka, hasta 14 ka de edad, aproximadamente. Encontrándose a una altitud de 4400 y 5400 m s.n.m., está conformado por flujos de lavas en bloques, domos, flujos piroclásticos de bloques y ceniza, flujos piroclásticos de escoria, caídas y

oleadas piroclásticas. Los depósitos de este grupo poseen composición andesítica (57.4 a 62.4 % SiO₂), dacítica (63.4 a 66.3 % SiO₂) y riolítica (72.3 a 73.6 % SiO₂) (Mariño et al, 2016). Algunas secuencias de caída de pómez se encuentran meteorizadas y poco consolidadas.

4.1.13. Edificio Misti 4 (CC-m4-1)

El edificio Misti 4 (Fig. 13) se edificó por encima de una discontinuidad estructural; está ubicado alrededor de los 5400 msnm. Emplazándose en los últimos 11 mil años, producto principalmente de erupciones explosivas que emplazaron depósitos piroclásticos de pómez y ceniza, flujos de escoria, caídas de ceniza, caídas de pómez, así como oleadas piroclásticas. Estos depósitos poseen composición andesítica (56.9 a 62.6 % SiO₂) a dacítica (63.0 a 63.1 % SiO₂) (Mariño et al, 2016). Los depósitos se encuentran poco consolidados y meteorización moderada a alta.

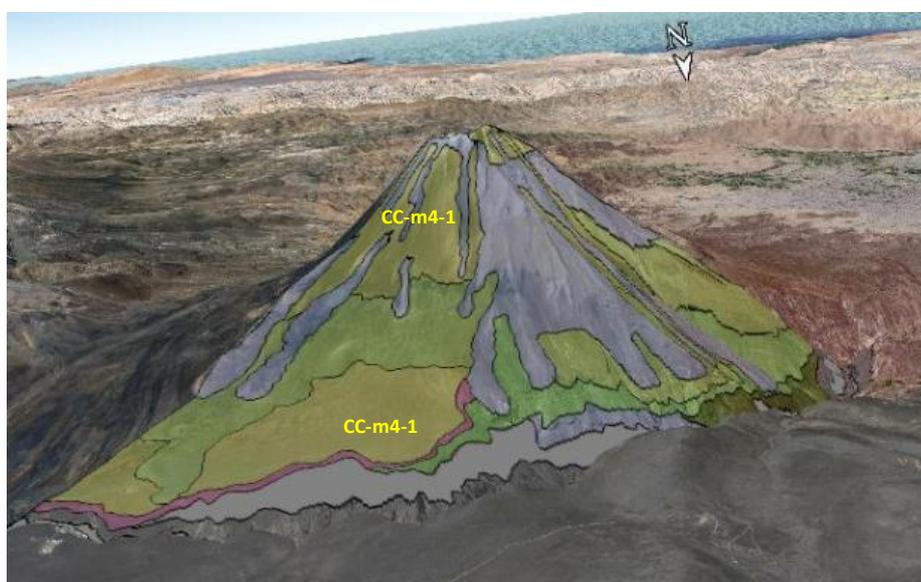


Figura 13. Unidades CC-m4-1 perteneciente al estratovolcán Misti.

4.1.14. Depósitos de morrenas (H-mo)

Corresponden a morrenas ubicadas al norte del distrito de Cayma (Fig. 14) cercanos a la cumbre del estratovolcán Estribo. Poseen formas alargadas. Presenta una mezcla heterométrica de bloques de rocas, soportados por una matriz areno-limosa suelta. Los bloques se encuentran fracturados inmersos en matriz poco consolidada.



Figura 14. Morrenas neoglaciares al noreste del Complejo Volcánico Chachani.

4.1.15. Depósitos fluvioglaciares (H-Flg)

Los depósitos fluvioglaciares se encuentran en los flancos del edificio Estribo, al extremo norte del distrito de Cayma; estos depósitos en su mayoría se presentan en los bordes de los flujos de lava del sector este, sobre pendientes moderadas a fuertes. Se caracterizan por presentar grava y arena formada frente a glaciares de los edificios volcánicos formando surcos glaciares. Estos depósitos presentan poca consolidación y alta meteorización.

4.1.16. Depósitos coluviales (H-co)

Los depósitos coluviales son abundantes en los flancos del volcán y en los frentes de los flujos de lava, especialmente en sectores de moderada a fuerte pendiente ($> 20^\circ$). Se caracterizan por presentar clastos angulosos, centimétricos y decimétricos. La mayoría de los depósitos se encuentran formando secuencias interestratificadas con lahares. Se encuentran clastos poco fracturados con matriz poco consolidada.

4.1.17. Depósitos aluviales (H-al)

Se encuentran distribuidos por todo el distrito de Cayma, principalmente en el río Chili y en la zona sur, espesores variables, bloques heterométricos, soportados en matriz de areno-limoso. Depósitos poco consolidados con clastos ligeramente fracturados.

4.1.18. Depósitos Lahares recientes (H-La)

Se han identificado varios depósitos de lahar emplazados en las quebradas en los diferentes flancos del Complejo Volcánico Chachani, principalmente en el distrito de Cayma en las quebradas: Innominada, Tributaria, Pastoraíz, San Pedro, Villa Continental, Azufra (sector Gamarra), Azufra (sector Lari Lari y Tucos), Azufra, Canchero (Fig. 15) y Chullo.

En todos los casos los lahares han alcanzado más de 12 km de distancia. Los depósitos de lahar poseen espesores de 0.15 a 0.5 m, pero forman secuencias que en total pueden alcanzar hasta 5 m de espesor. Están conformados por bloques subredondeadas y subangulosas de hasta 1.8 m, también gravas de composición andesítica englobadas en matriz limo-arcillosas.



Figura 15. Depósitos de lahares recientes en la quebrada Canchero.

5. EVALUACIÓN DE PELIGRO GEOLÓGICO POR FLUJO DE DETRITOS (LAHARES)

El principal peligro geológico en el distrito de Cayma son los flujos de detritos o lahares, cuyo factor desencadenante son las precipitaciones pluviales (lluvias), que contribuyen a la desestabilización de las laderas o taludes. Identificándose lahares antiguos del Pleistoceno y del Holoceno, así como lahares recientes que se encuentran en el cauce de las quebradas.

Para el Complejo Volcánico Chachani, se ha elaborado el mapa de peligros volcánicos por lahares, en el cual se considera las quebradas: Tacra, Pisac, SN1, Cabrería, Innominada, Tributaria, Pastoraíz, San Pedro, Villa Continental, Azufra (Gamarra), Azufra (Lari Lari y Tucos), Azufra, Canchero y Chullo en el distrito de Cayma, realizándose una evaluación de puntos críticos en las quebradas que atraviesan áreas urbanas: Innominada, Tributaria, Pastoraíz,

La parte alta de la quebrada Innominada atraviesa el Asentamiento Humano (A.H.). Los Jazmines, en las laderas de la quebrada se observa el PDC de bloques y cenizas Cabrerías (Fig. 17), con bloques densos de más 1 metro que podrían ser arrancadas y arrastradas por los flujos en temporadas de lluvia intensa. En el cauce de la quebrada se han identificado lahares recientes de espesores centimétricos.



Figura 17. Quebrada Innominada con afloramiento de PDCs Cabrerías.

En la parte intermedia a baja de la quebrada se encuentra el A.H. Ciudad de los Pioneros, donde de igual forma se observa lahares recientes y material no consolidado del PDC Cabrerías. En los cruces afirmados se avista material de construcción y desechos (Fig.18).



Figura 18. Botadero de basura cercano a la quebrada Innominada y al cruce afirmado del A.H. Los Jazmines.

5.2. Quebrada Tributaria

La quebrada tributaria se ubica al sureste del distrito de Cayma, considerándose como una quebrada secundaria por la distancia de recorrido (2.2 km) y por la afluencia a una quebrada de mayor extensión (quebrada Pastoraíz), durante el recorrido esta descende por la zona urbana del

distrito pasando por el A.H. Primero de Junio, Asociación de Vivienda (A.V.) Rafael Belaunde Diez Canseco, Pueblo Joven (P.J.) Virgen de Chapi y el A.H. José Abelardo Quiñones. En las laderas se han reconocido lahares antiguos (~Pleistoceno), depósitos de tefras y material retrabajado con bloques lávicos porfíricos y afaníticos de hasta 2 m de diámetro, este material no se encuentra consolidado.

La parte alta de la quebrada Tributaria ubicada en el A.H. Primero de Junio, presenta pendientes moderadas (3° - 12°) a fuertes (12° - 30°). En las laderas y el cauce de la quebrada se observa lahares recientes, en el A.H. se ha construido muros de contención con una altitud de 4 metros (Fig. 19).



Figura 19. Quebrada tributaria con un muro de contención en la margen izquierda.

En el curso medio de la quebrada Tributaria en la A.V. Rafael Belaunde Diez Canseco las pendientes son moderadas (3° - 12°). En las laderas se ha identificado material de desmonte y en el cauce lahares recientes de tamaño centimétrico. En ese sector a 10 m del cauce la población ha construido viviendas de ladrillos y material prefabricado. Mientras que el mismo cauce se han construido 2 canchas deportivas (Fig. 20).



Figura 20. Canchas deportivas en la quebrada Tributaria.

La quebrada Tributaria en su curso bajo, en la confluencia con la quebrada Pastoraíz, presenta pendientes moderadas (3° - 12°) a suaves (0° - 3°). El mayor problema en este sector radica en las construcciones hechas en una de las laderas de la quebrada (Fig. 21).



Figura 21. Viviendas de ladrillos y material prefabricado en la quebrada Tributaria.

5.3. Quebrada Pastoraíz

La quebrada Pastoraíz nace en el flanco sureste del Complejo volcánico Chachani (Fig. 22), extendiéndose en dirección NE a SO con una extensión de 10.5 km, siendo su afluente principal el PDC Cabrerías, confluyendo con la quebrada Chulloal final del recorrido. Los depósitos identificados en la quebrada son: lahares antiguos y recientes, PDC Cabrerías, caídas de tefra del Chachani y Misti, así como material re trabajado.

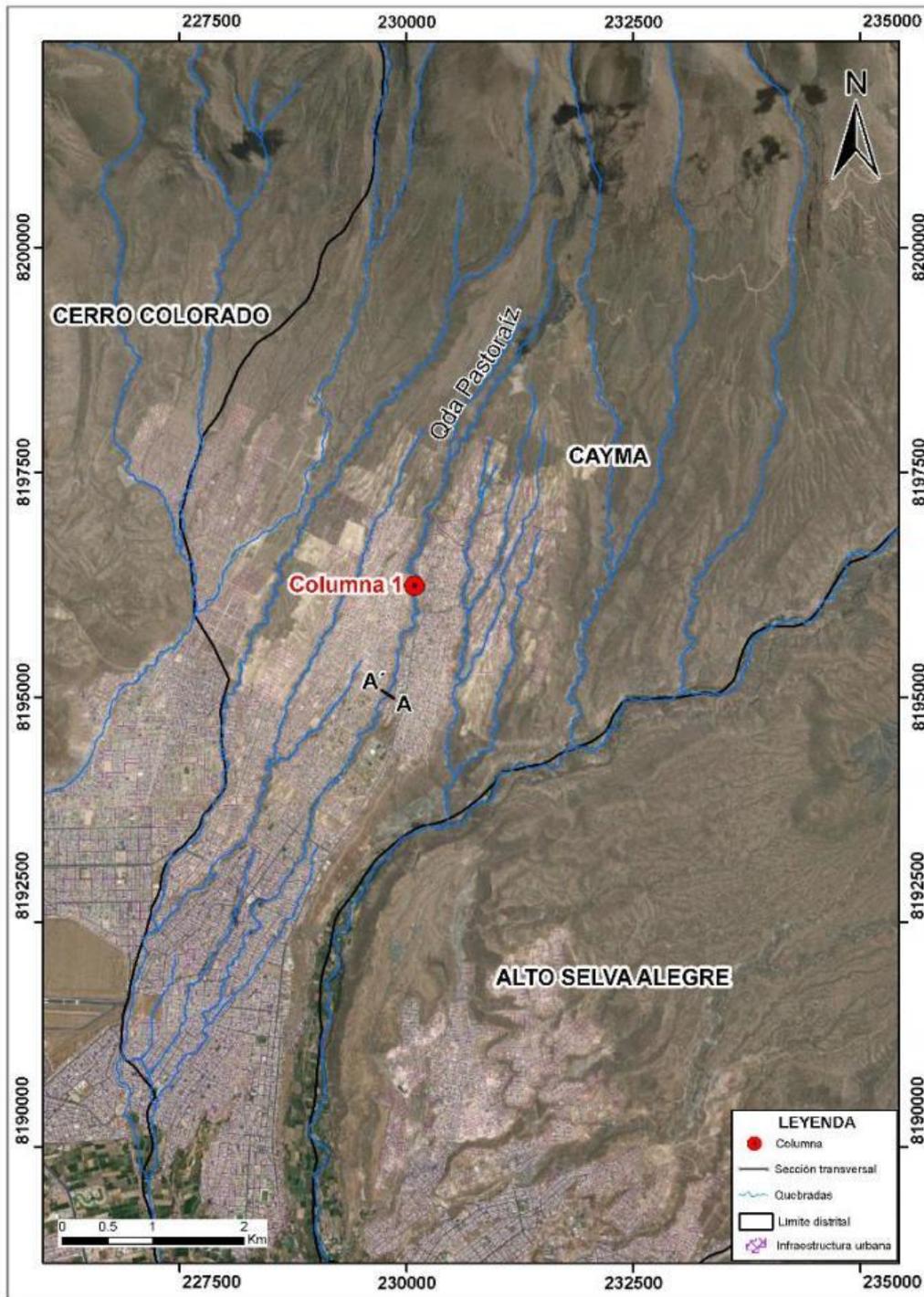


Figura 22. Mapa de ubicación de perfiles y columnas en la quebrada Pastoraíz.

En las laderas de la quebrada Pastoraíz se encontraron en ambos flancos depósitos de PDC Cabrerías, terrazas de depósitos de lahares antiguos y en el cauce depósitos de lahares con clastos lávicos porfiríticos heterométricos. Asimismo, se elaboró un perfil transversal A-A' en dirección E-O (Fig. 23), observándose los depósitos antes mencionados.

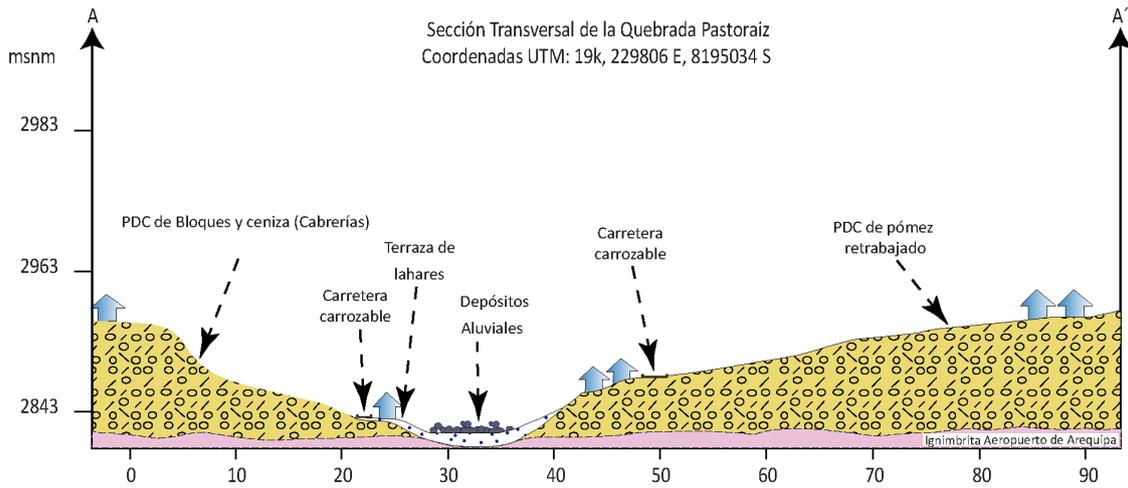


Figura 23. Sección transversal A – A' de la parte alta de la quebrada Pastoraiz.

En este sector de la quebrada se ha identificado 7 niveles de lahares antiguos (Fig. 24), con espesores que oscilan entre 0.3 a 2.5 m, la mayoría matriz soportado, constituido por cenizas finas a gruesas y bloques heterométricos subredondeados. Asimismo, se observa depósitos aluviales adosados a los lahares antiguos.

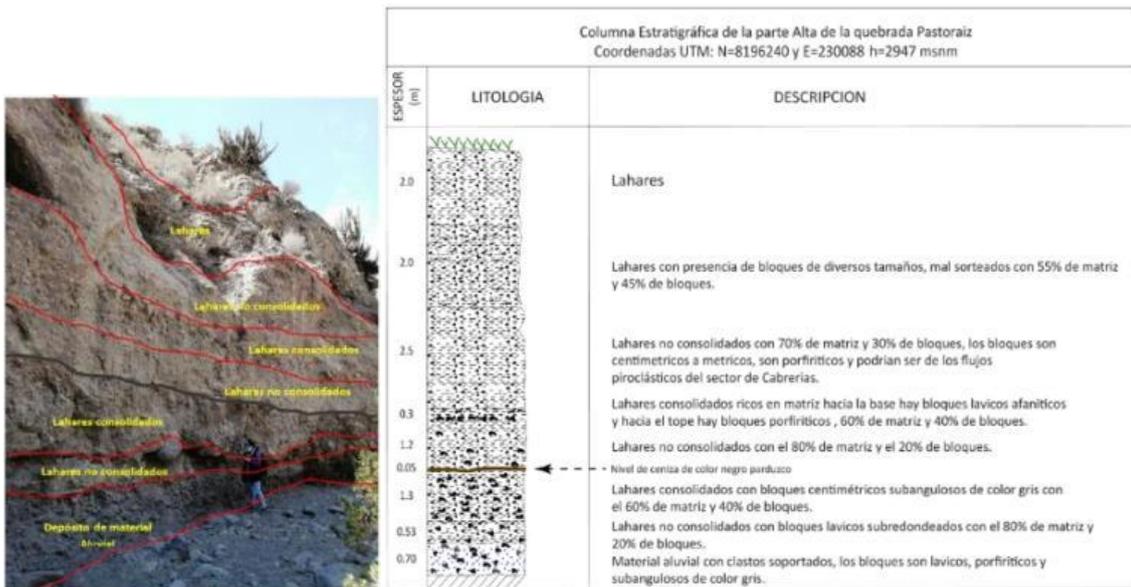


Figura 24. Hacia la derecha fotografía de la columna y a la izquierda la digitalización de la misma.

5.4. Quebrada San Pedro

La quebrada San Pedro nace en la parte alta del distrito de Cayma posee una altitud de 2680 m s.n.m. (parte alta), posee un recorrido de 3 km y confluye al final del recorrido con la quebrada Azufral, con pendientes suaves (0°-3°), el ancho del cauce varía entre 6 y 12 metros y la profundidad de la quebrada es >7 metros.

La quebrada San Pedro inicia en el C.H. Dean Valdivia, con espesores de hasta 8 m, con un ancho de cauce promedio de 45 m. La quebrada ha sido rellenada por material de desmonte, dando lugar

a terrazas antrópicas, en cauce se ha identificado lahares recientes. Además, se ha observado infraestructura como áreas recreativas y canchas deportivas (Fig. 25).



Figura 25. Parte alta de la quebrada San Pedro mostrando áreas recreativas y una cancha deportiva.

En el curso medio de la quebrada (Fig. 26) se encuentra a 2590 m s.n.m., presenta pendientes fuertes (12° - 30°), posee 75 metros de ancho de quebrada promedio, cruza la asociación Señor de Huanca y la urbanización Juan Pablo II. En las laderas de la quebrada se han identificado depósitos de lahares antiguos y en el cauce lahares recientes. También se observan obras de infraestructura como terrazas de cultivo y una cancha deportiva.



Figura 26. Quebrada San Pedro en el sector medio.

El sector bajo de la quebrada San Pedro se encuentra a una altitud de 2514 m s.n.m., con 50 m de ancho promedio de cauce, las laderas presentan pendientes suaves (0° - 9°), esta quebrada cruza la urbanización Buenos Aires de Cayma Zona C, durante su recorrido confluye con la quebrada

Azufral (Fig. 27). Se observan depósitos de lahares antiguos cubiertos por material antrópico (basura) y desmote. En el cauce se han identificado lahares recientes de matriz soportada.



Figura 27. Sector bajo de la quebrada San Pedro en confluencia con la quebrada Azufral.

5.5. Quebrada Villa Continental

La quebrada Villa Continental se ubica al este del distrito de Cayma, a una altitud de 2600 m s.n.m., confluye con la quebrada Azufral a una altitud de 2520 m s.n.m., posee un desnivel de 80 m, recorre una distancia de 1.3 km, con pendientes moderadas (3° - 12°). La quebrada inicia en el C.H. Dean Valdivia Sector 12, pasando por la urbanización Cesar Vallejo y villa Continental.

En las laderas de la quebrada Villa Continental del sector alto presenta laderas poco pronunciadas con ~44 m de ancho de quebrada, compuesto por depósitos residuales, depósitos aluviales de matriz limosa de fácil erosión. Además, material de desmote en algunos sectores (Fig. 28).



Figura 28. Sector alto de la quebrada Villa continental, observándose depósitos residuales y de desmote.

La quebrada Villa Continental en el sector bajo confluye con la quebrada Azufral (Fig. 29), en este sector las laderas presentan pendientes moderadas (3° - 12°) y la quebrada se encuentra con ancho promedio de 48 m, observándose depósitos retrabajados y de desmonte, también se encuentran escarpas de hasta 3 m.



Figura 29. Dirección de la quebrada Villa Continental en confluencia con la quebrada Azufral.

5.6. Quebrada Azufral (sector Gamarra)

La quebrada Azufral (sector Gamarra) forma parte de las quebradas que descienden del Chachani, se encuentra a una altitud de 3160 m s.n.m. y 2600 m s.n.m. quebrada abajo, generando un desnivel de 560 metros, con laderas que poseen pendientes fuertes a muy fuertes en la cabecera de la quebrada y pendientes moderadas a suaves en el sector bajo de la quebrada, posee un recorrido de 6.9 km en dirección noreste-suroeste. Asimismo, existe una quebrada secundaria de 1.6 km, que confluye por la margen derecha, durante su trayecto pasa muy cerca de la A.V. Cabrerías I y el A.H. Once de Mayo.

A lo largo de la quebrada se han encontrado material retrabajado, depósitos de flujos piroclásticos, depósitos de lahares, depósitos de caída de pómez retrabajada. En algunas zonas de la quebrada se encontró material aluvial con presencia de bloques de tamaños decimétricos. Durante la inspección en la zona se ha levantado una columna estratigráfica (Columna 2) y un perfil geológico (B'-B) (Fig. 30).

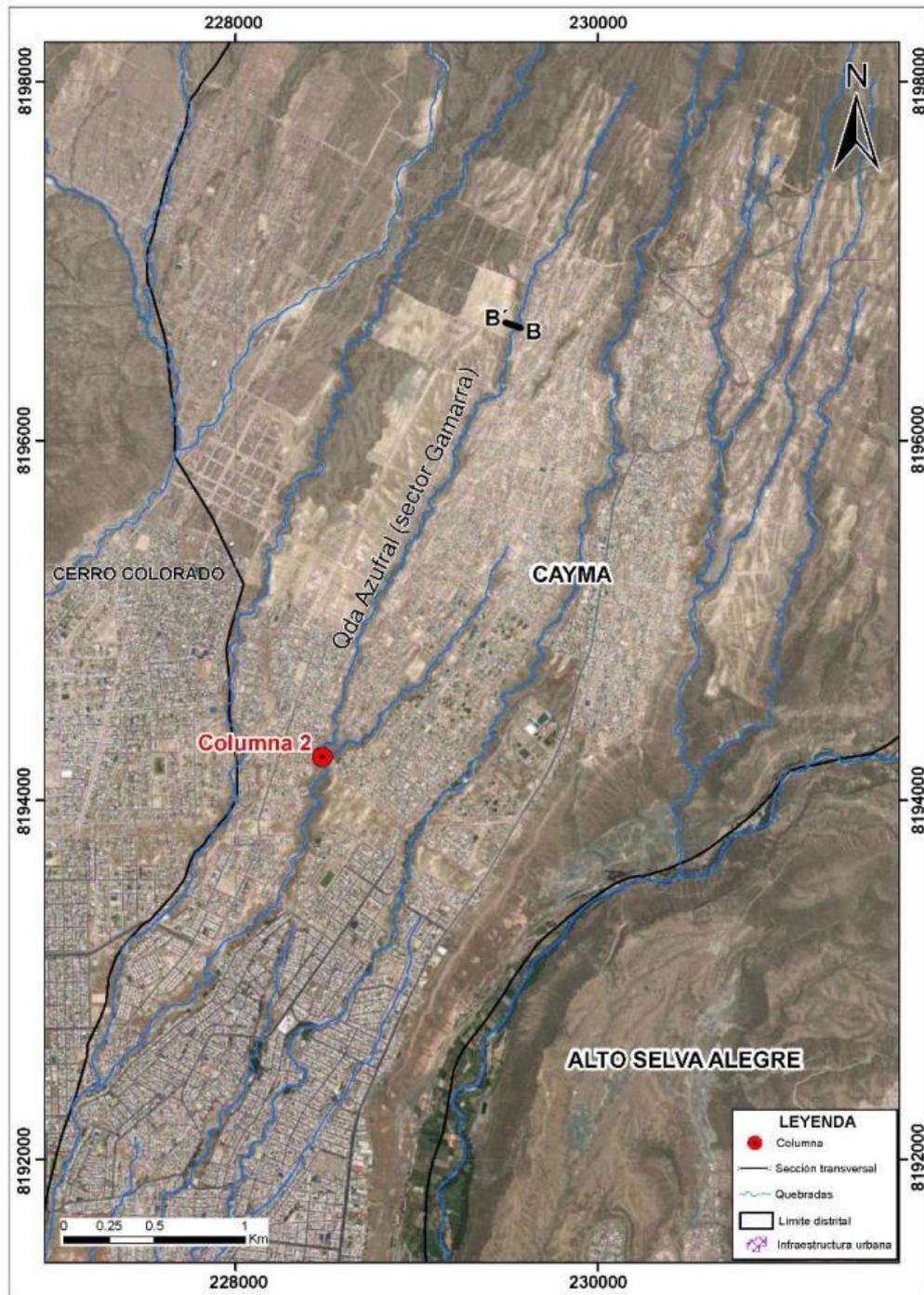


Figura 30. Mapa de ubicación de perfiles y columnas en la quebrada Azufral (Sector Gamarra).

En las laderas de la quebrada Azufral (sector Gamarra) se puede apreciar depósitos de PDC de bloques y ceniza retrabajado, como se muestra en la sección transversal B-B' (Fig. 31, 32). Además de lahares antiguos (pleistoceno y holoceno), en el cauce de la quebrada se encuentra depósitos aluviales con bloques heterométricos.

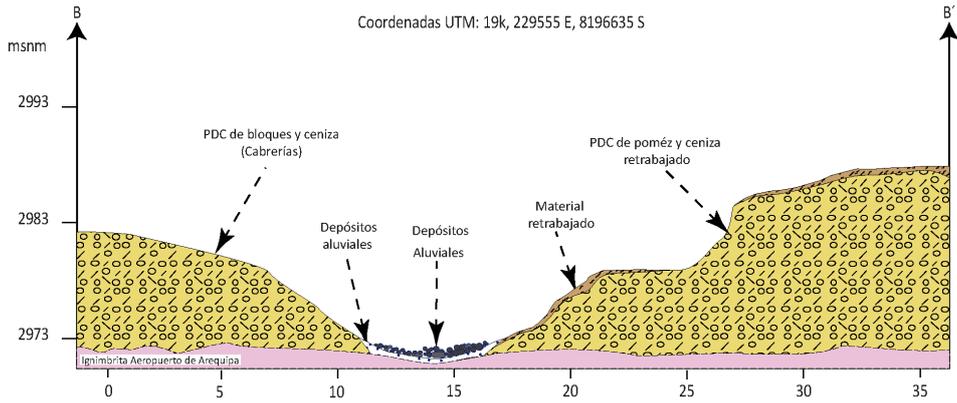


Figura 31. Perfil B – B´ de la Quebrada Azufral (sector Gamarra).



Figura 32. Zona de levantamiento del perfil B-B´ de la Quebrada Azufral (sector Gamarra). (Coordenadas UTM WGS84 229555 E, 8196635 N).

La columna (Fig. 33) fue elaborada en la ladera derecha quebrada abajo, constituido por potentes depósitos de ceniza, lahares, PDC de bloques y ceniza mayores a 1 m superpuestos por el suelo (material retrabajado).

ESPESOR (m)	LITOLOGIA	DESCRIPCION
0.3	[Symbol: Green grass]	Material retrabajado.
1.8	[Symbol: Yellow circles]	Depósito de flujos piroclásticos con presencia de poméz y cenizas retrabajadas.
4.8	[Symbol: Grey dots]	Depósito de lahares retrabajados.
2.0	[Symbol: Orange circles]	Depósito de flujos piroclásticos con presencia de poméz y cenizas retrabajadas.
1.9	[Symbol: Yellow circles]	Depósito de caída de poméz retrabajada.

Figura 33. Columna estratigráfica levantada en el sector intermedio de la quebrada Azufral (sector Gamarra) (Coordenadas UTM WGS84 229555 E, 8196635 N).

5.7. Quebrada Azufral (sector Lari Lari y Tucos)

La quebrada Azufral (sector Lari Lari y Tucos) está localizada en el distrito de Cayma, tiene una extensión 11.1 km, su afluente principal es el domo-colada Cabrerías, en varias sectores de la quebrada se observan esos depósitos de bloques y cenizas, los depósitos de lahares tienen espesores entre 50 cm y 1.5 m, muchos con bloques lávicos andesíticos, dacíticos de forma subangulosa a subredondeada con tamaños heterométricos, matriz soportada y masiva. En la quebrada se ha elaborado un perfil geológico (C-C') y una columna estratigráfica (Fig. 34).

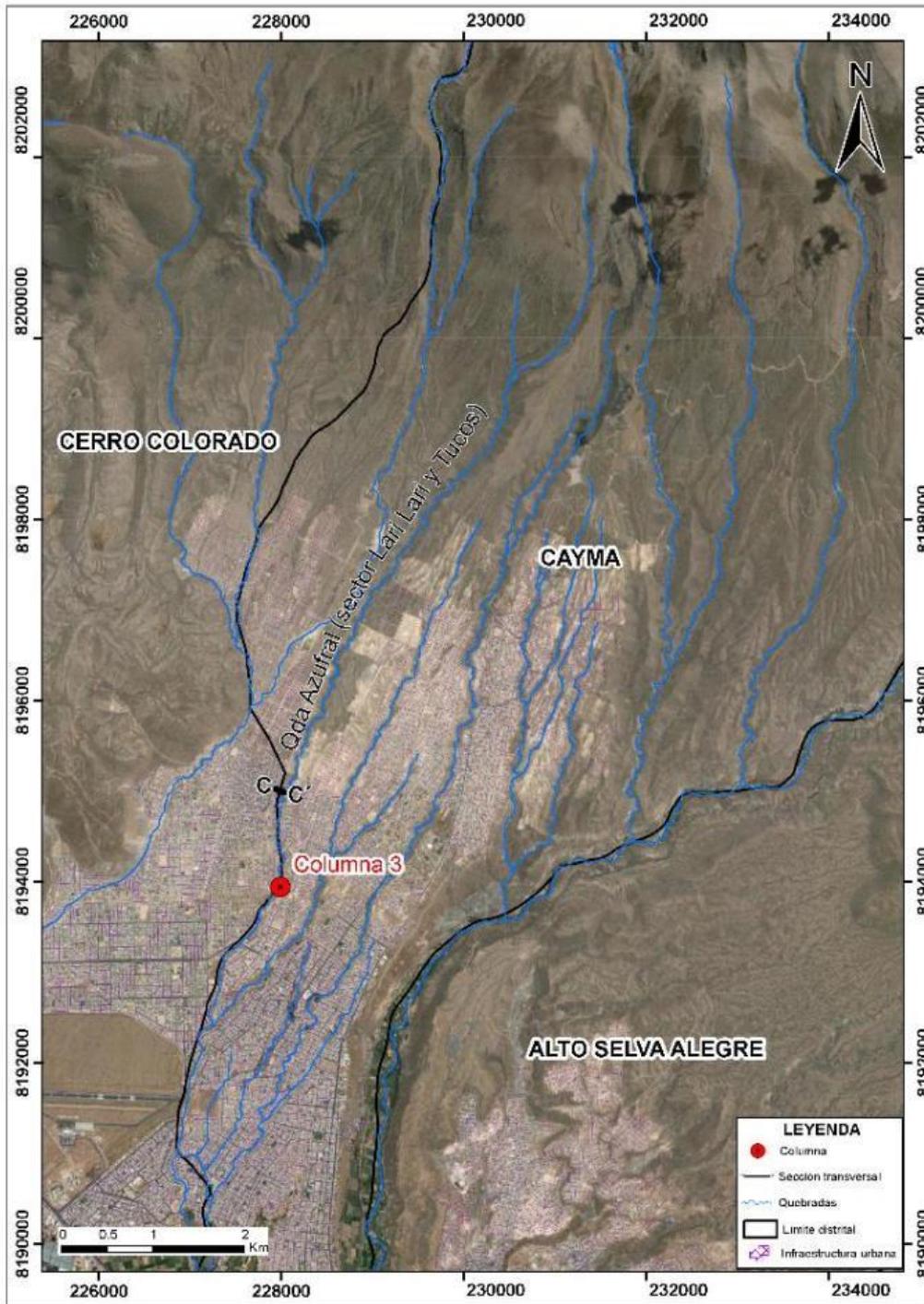


Figura 34. Mapa de ubicación de perfiles y columna en la quebrada Azufral (Sector Lari Lari y Tucos).

La quebrada Azufral (sector Lari Lari y Tucos) las laderas presentan depósitos del PDC del domo-colada Cabrerías, adosados depósitos de material residual (desmonte y basura) (Fig. 35, 36) y en el cauce depósitos de lahares recientes con bloques subangulosos y subredondeados de tamaños decimétricos y centimétricos.

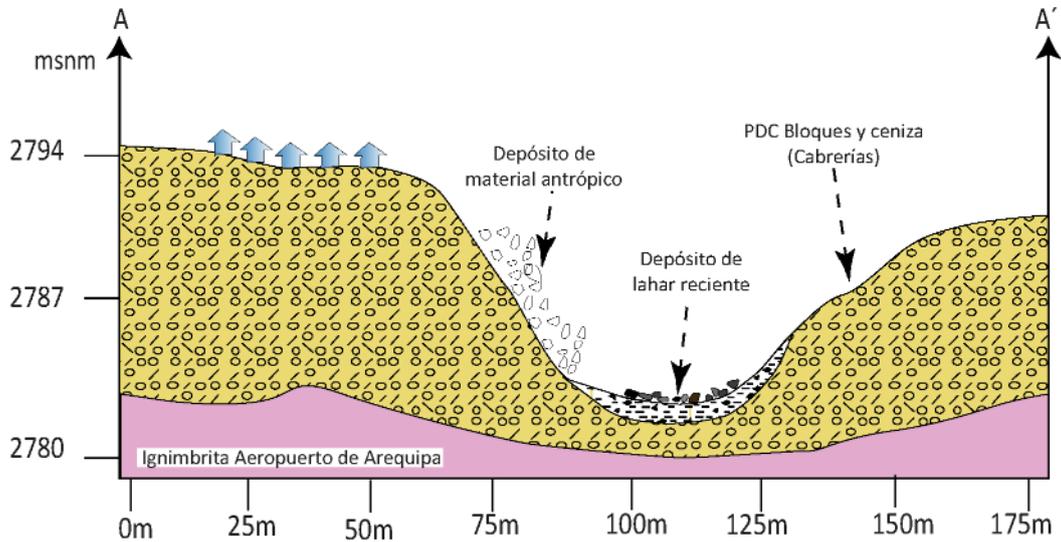


Figura 35. Sección transversal C – C' de la quebrada Azufral (sector Lari Lari y tucos).



Figura 36. Zona de levantamiento del perfil E-E' de la Quebrada Azufral (sector Lari Lari y Tucos) (Coordenadas UTM WGS84 227948 E, 8195021 N).

En las laderas de la quebrada Azufral (sector Lari Lari y Tucos), hacia la base se observan depósitos de lahares antiguos (pleistoceno y holoceno) que alcanzan una altitud de hasta 12 m, con clastos volcánicos de tamaños heterométricos < 50 cm (Fig. 35), con un nivel intermedio de depósitos de caída de pómez; en el tope se encuentran depósitos del PDC de bloques y ceniza del domo-colada Cabrerías, alcanzando una espesor de 10 m recubiertos por material re trabajado (suelo) con un espesor ~ 50 cm (Fig. 37).

Columna Estratigráfica quebrada de Gamarra Coordenadas UTM: N=8193941 y E=227989 h=2699 msnm		
ESPESOR (m)	LITOLOGIA	DESCRIPCION
0.50		Suelo actual
10.00		Depósito de flujo piroclásticos con presencia de bloques y cenizas de color gris rosáceo, con abundantes bloques subangulosos en una matriz soportada
1.00		Depósito de lahares con una matriz soportada de color anaranjado con presencia de bloques subredondeados de tamaños $\leq 30\text{cm}$.
3.00		Depósito de lahares con matriz soportada en la parte superior con presencia de fragmentos líticos angulosos y en la parte inferior se nota depósitos con clastos soportados con presencia de bloques subredondeados de tamaños $\leq 40\text{cm}$.
7.00		Depósito de lahares hiperconcentrados y laminados en la parte superior, en la parte inferior se nota la presencia de lahares en una matriz soportada con bloques escasos de unos 50cm de \varnothing .
0.60		Depósito de caída de flujos piroclásticos y pómez blanquecina
4.00		Depósito de lahares laminados de color gris blanquecino en una matriz soportada y con presencia de escoria.

Figura 37. Columna estratigráfica de la quebrada Azufra (Sector Lari Lari y Tucos).

5.8. Quebrada Canchero

La quebrada Canchero se ubica en la parte más occidental del distrito de Cayma con una extensión de 11 km recorriendo el distrito de Cayma, con una altitud de 4880 m s.n.m. (parte alta) y 2830 m s.n.m. (parte baja), con un desnivel de 2050 metros. En la parte alta las laderas presentan pendientes fuertes (12° - 30°) a muy fuertes (30° - 45°), en el sector medio pendientes muy fuertes (30° - 45°) a muy escarpadas ($>45^\circ$) y en el sector bajo pendientes fuertes (12° - 30°) a moderados (3° - 12°), con anchos de cauce variable entre 3 – 48 m.

La quebrada Canchero transcurre por zonas no urbanizadas sin embargo en el sector bajo recorre sobre la Urb. Villa Oliva (Fig.38); encontrándose depósitos de lahares antiguos, en el cauce depósitos de lahares recientes de espesores decimétricos a centimétricos.

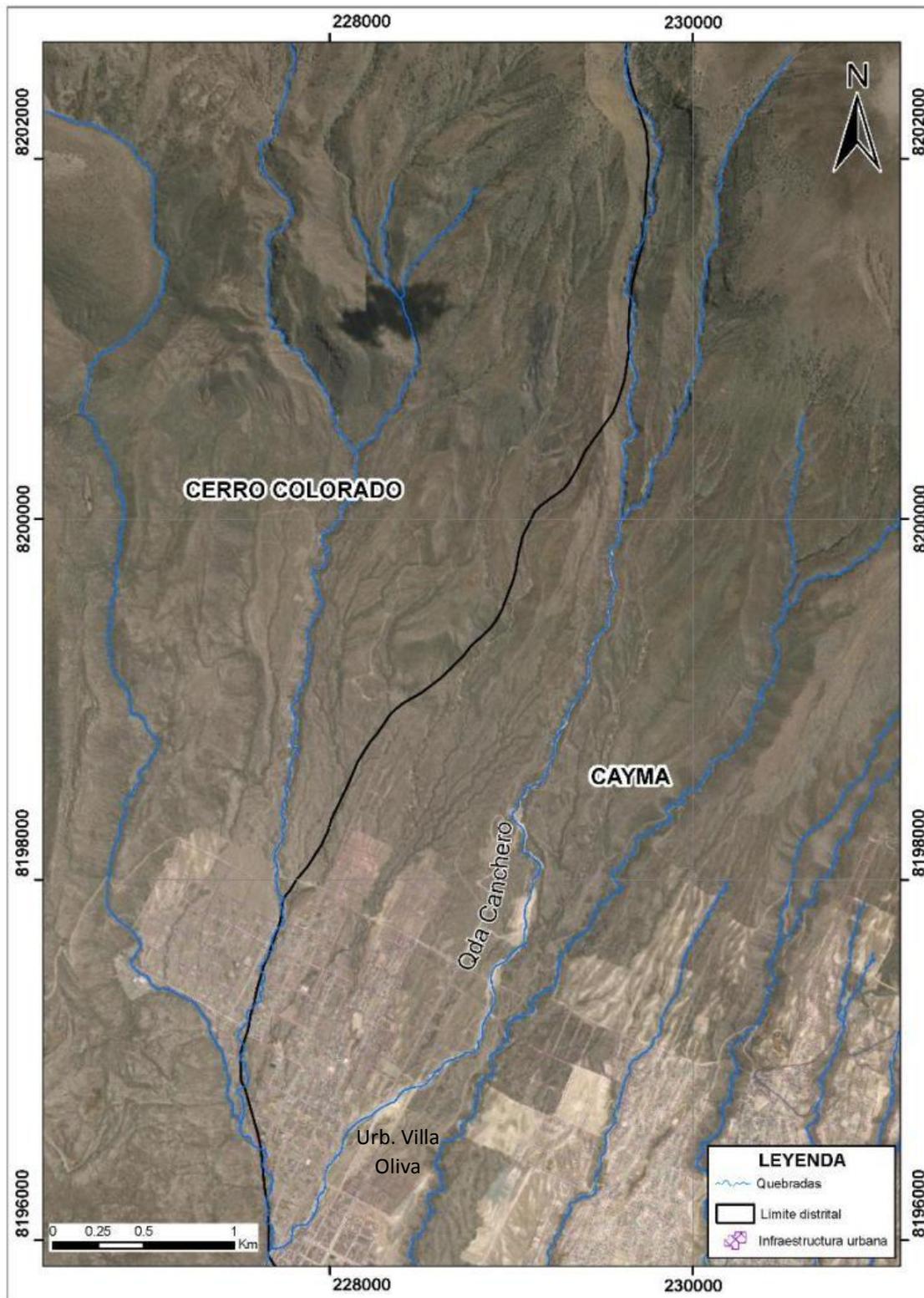


Figura 38. Mapa de ubicación de la quebrada Canchero.

5.9. Quebrada Chullo

La quebrada Chullo está localizada en el distrito de Yanahuara y Cayma alcanzando una extensión de 4.8 km en esta última, se encuentra a 2500 m s.n.m. en el sector alto de la quebrada y 2350 m s.n.m. hasta el límite distrital con Yanahuara (Fig. 39), encontrándose un desnivel de 150 m, sus afluentes principales son las quebradas Pastoraíz y Azufral (confluencia de Qda. Villa

Continental y San Pedro). Esta quebrada presenta varios puntos críticos puesto que durante el recorrido atraviesa numerosas zonas urbanas. La quebrada presenta entre 3 a 8 m de ancho promedio, en el sector alto se identificó lahares antiguos y recientes, así como material antrópico. Finaliza su recorrido confluyendo con el río Chili.

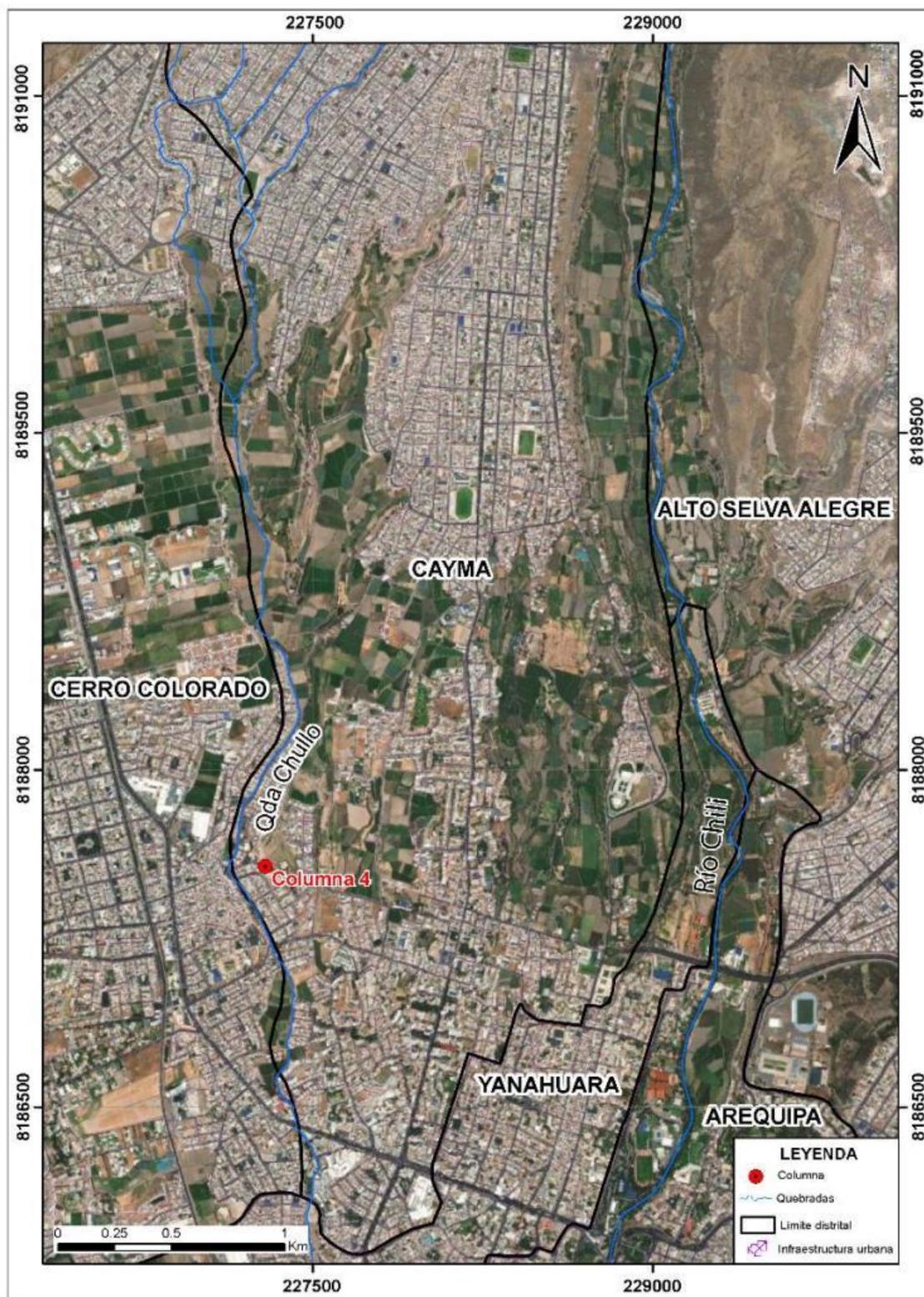


Figura 39. Mapa de ubicación de la quebrada Chullo y la divisoria de aguas.

En la parte más septentrional (norte) de la quebrada Chullo se encuentra a 2500 m s.n.m., con pendientes fuertes (12° - 30°) con hasta 8 metros de ancho de cauce, se presentan depósitos de

bloques y ceniza, lahares, depósitos de escombros y depósitos aluviales con clastos heterométricos (Fig. 40).



Figura 40. Quebrada Chullo parte alta.

En el sector medio de la quebrada, se puede apreciar tanto en la margen izquierda como en la margen derecha la presencia de lahares antiguos y recientes en la base; también se observa la construcción de viviendas en ambos márgenes, el cauce ha ido erosionando las laderas de la quebrada y al mismo tiempo socavando generando mayor profundidad del mismo (Fig.41).



Figura 41. Quebrada Chullo año 2014 (izquierda) y año 2021(derecha), se observa que el cauce de la quebrada ha erosionado la ladera y socavando el curso del mismo (Coordenadas UTM WGS84 227322 E, 8187219 N).

Geológicamente las laderas en esta quebrada presentan depósitos antiguos de lahares no consolidados de matriz soportada < 1m con bloques heterométricos y de pómez centimétricos, infrayacidos por niveles centimétricos de depósitos de caída, seguido por un nivel de ceniza parda blanquesina, superpuesta por depósitos de lahares de espesor variables con niveles intermedios de caída de pómez y escoria (Fig. 42).

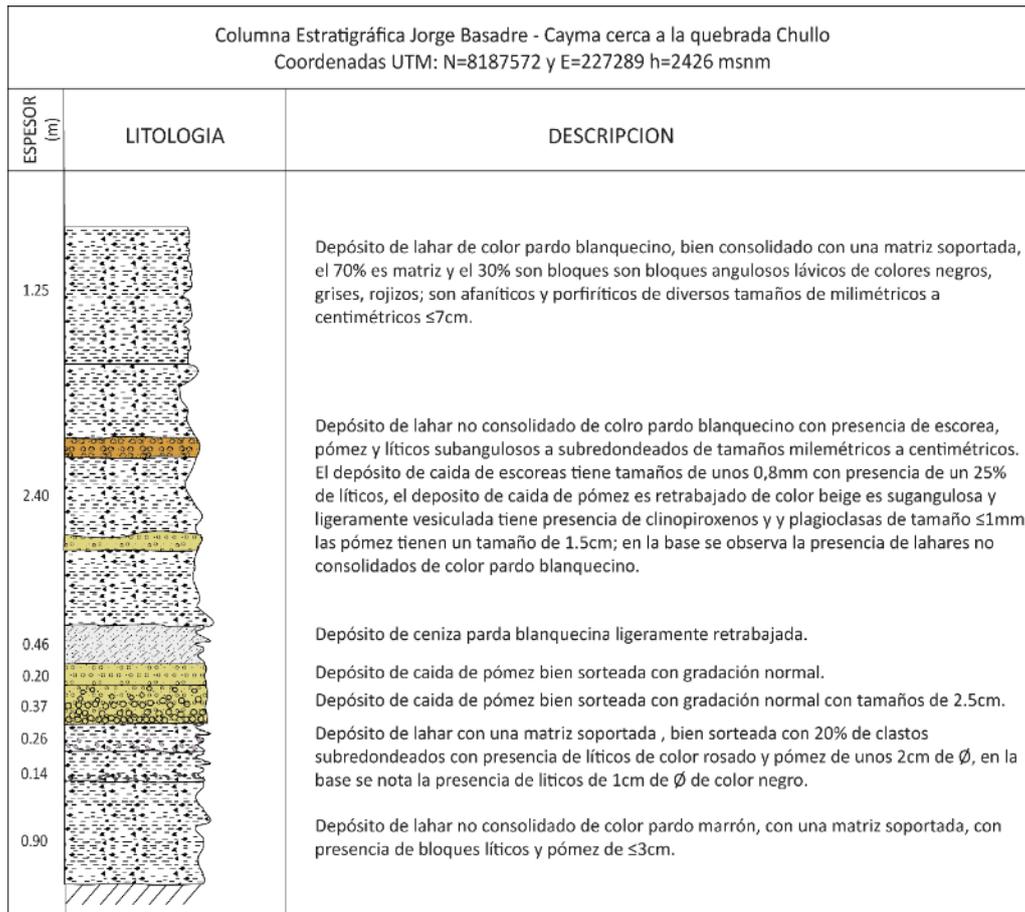


Figura 42. Columna estratigráfica en la quebrada Chullo.

En el sector más meridional de la quebrada Chullo del distrito de Cayma se encuentra a 2350 m s.n.m. presenta pendientes fuertes (12° - 30°) a moderadas (3° a 12°), observándose muros de concreto en las laderas (URB. Mirasol de Cayma, Santa Elisa, Jorge Basadre, Ángeles de Cayma, Monte Rosa, frutales, Avigde y explanada), con depósitos aluviales en el cauce, depósitos de lahares recientes y depósitos residuales (Fig. 43).



Figura 43. Quebrada Chullo al límite del distrito de Cayma y Yanahuara observándose material residual y muros de concreto.

6. SIMULACIONES DE FLUJOS DE DETRITOS (LAHARES)

La simulación de lahares para el distrito de Cayma (Anexo 4), se realizó en el código VolcFlow (Kelfoun & Druit, 2005), es un modelo que fue desarrollado para la simulación de flujos volcánicos en el Laboratorio de magmas y volcanes, de la universidad Blaise Pascal, en Clermont-Ferrand (Francia), por el Dr. Karim Kelfoun y colaboradores, para delimitar objetivamente las zonas de amenaza de lahares.

La simulación con el VolcFlow permite simular la trayectoria de flujos densos, flujos diluidos a partir de los flujos densos y la sedimentación de los flujos diluidos, basado en el promedio vertical de las ecuaciones de conservación de la masa (Ecuación 1) y la cantidad de movimiento (Ecuaciones 2 y 3) (INGEMMET, 2022). Los parámetros utilizados para el modelado de los diferentes flujos se describen a continuación:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0. \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gh \sin \alpha_x - \frac{1}{2} K_{actpass} \frac{\partial}{\partial x}(gh^2 \cos \alpha) + \frac{T_x}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(hvu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2) = gh \sin \alpha_y - \frac{1}{2} K_{actpass} \frac{\partial}{\partial y}(gh^2 \cos \alpha) + \frac{T_y}{\rho} \quad (3)$$

Donde:

- h: Es el espesor del flujo
- u: = (u, v) es la velocidad del flujo
- α : Pendiente del terreno
- ρ : Densidad aparente
- T: Retardo de esfuerzo - “Savage y Hunter (1989)” $K_{actpass}$: Coeficiente de presión terrestre - “Inversión y Denlinger (2001)”

6.1. Procedimientos previos a las simulaciones de lahares

6.1.1. Determinación de volumen de lahar

La precipitación en la zona generará los flujos de detritos (lahares secundarios), en el distrito de Cayma. En base a esto para determinar el volumen adecuado para las simulaciones de lahares secundarios es necesario tener depósitos de otros fenómenos volcánicos como depósitos de bloques y ceniza, que pueden ser removilizados con la presencia de lluvias. El volumen de esta será por la mezcla de material depositado no consolidado propenso a removilización y de la precipitación pluvial en cada drenaje en los alrededores del distrito de Cayma, debido a esto es necesario determinar estos 2 volúmenes.

Según algunos autores el porcentaje varía desde 40 % de sedimentos y 60 % de agua (Vásconez et al, 2009); 50 % de agua y 50 % de sedimentos (Vallance J. W., 2001); 70 % de agua y 30 % de sedimentos (Córdoba et al, 2015).

6.1.2. Determinación de quebradas y volúmenes para lahares secundarios

Para la determinación de las zonas susceptibles a lahares se realizó un análisis de las quebradas provenientes del complejo volcánico Chachani, que contemplan la jurisdicción del distrito de Cayma, poniendo énfasis en aquellas quebradas que pueden afectar a zonas pobladas ubicadas aguas debajo de las mismas.

En consecuencia, se ha determinado un total de drenajes por donde podrían ocurrir este tipo de peligros. Las quebradas como Innominada, Tributaria, Pastoraíz, San Pedro, Villa Continental, Azufral (sector Gamarra), Azufral (sector Lari Lari y Tucos), Azufral y

Chullo, quienes están directamente relacionadas con zonas pobladas del distrito de Cayma (Fig. 16).

En cuanto a la definición de volúmenes para simulaciones numéricas, primero se ha calculado el volumen de agua entrante en cada cuenca hidrográfica, considerando la precipitación máxima diaria comprendida en la estación la Pampilla desde 1931 a 2020 (SENAMHI, 2020), el área de las líneas divisorias que trazan la separación entre dos vertientes o cuencas fluviales limítrofes. Producto de esto se obtendrá la cantidad o volumen de máxima escurrida y disponible en superficie.

Posteriormente se ha calculado el volumen de material disponible en cada cuenca hidrográfica adoptando espesores aproximados de los depósitos en cada cuenca, producto de este cálculo se obtiene volúmenes máximos de material disponible para ser mezclado con agua y generar lahares.

Finalmente, en función de la ubicación de cada cuenca hidrográfica y del tipo de material volcánico que cada una de estas puedan llegar a tener en las quebradas del CVC se ha utilizado el 60 % volumen de agua y 40 % de volumen de escombros, el cual representa el 100 % del volumen total de lahar producido.

$$Vt (lahar) = V_{Agua} + V_{sedimentos}$$
$$100 \% = 60 \% + 40 \%$$

Sin embargo, el cálculo de volumen de H₂O es igual a la precipitación por el área de la zona de generación de lahares.

$$V_{H_2O} = Pr * A_{(Lahares)}$$

Donde:

V_{H_2O} = Volumen de H₂O

Pr = Precipitación

$A_{(Lahares)}$ = Área de generación de lahares (Fig. 44).

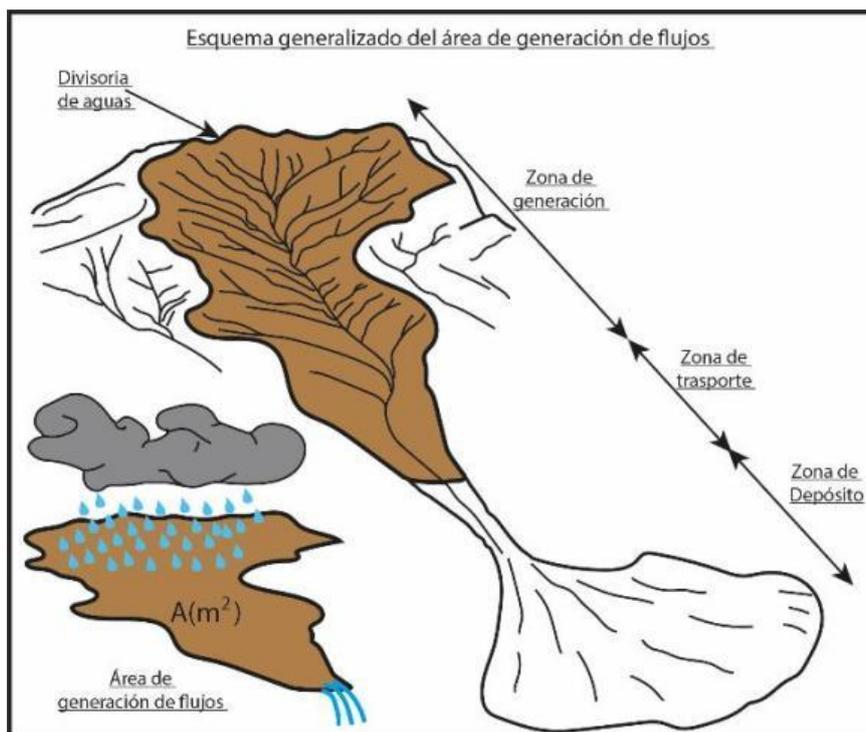


Figura 44. Esquema generalizado del área de generación de un flujo de detritos y lahares secundarios. (tomado de Soncco., Y. et al 2021. Libro de resúmenes extendidos XX Congreso Peruano de Geología, (2021)).

6.1.3. Procedimiento para simulación en VolcFlow

6.1.3.1. Preparación del modelo digital de elevación DEM

Previo a la simulación de los lahares en el VolcFlow, se debe preparar el modelo digital de elevación, con la finalidad de optimizar el tiempo de duración de las simulaciones y el reconocimiento correcto por el programa VolcFlow. Dicha preparación del DEM se realiza en el software Surfer, herramienta informática que permite la creación de mapas, visualización de datos en 2D Y 3D y el geoprocésamiento. El procesamiento de cambio de formato necesario del DEM es el siguiente:

1. Abrir el DEM que por defecto se encuentra en formato .tiff
2. Se guarda sin modificar, en formato GRD Surfer 6 Binary Grid (.grd); ya que este es el formato que ha sido programado para que VolcFlow reconozca el DEM.
3. Posteriormente tendremos ya exportado el DEM en formato “.grd” listo para ingresarlo a nuestros parámetros de entrada de VolcFlow.

6.1.3.2. Definición de la fuente

La fuente debe ser definida con un área específica para ser ingresada en VolcFlow. Dicha área debe estar representada de color negro en un archivo ráster .tiff, con transparencia y del mismo tamaño que nuestro DEM a utilizar en las simulaciones, lo cual podremos realizarlo en el software Adobe Photoshop CS6.

Con el procedimiento antes indicado se logra obtener un archivo .tiff de nuestra área fuente, con transparencia y del mismo tamaño de nuestro DEM que se ingresa en VolcFlow, lo cual es clave para VolcFlow corra correctamente sin errores.

6.1.3.3. Ingreso de datos en VolcFlow

Para realizar simulaciones con el código VolcFlow, se necesita de un script adicional de fuente que debe ser desarrollado particularmente, en el cual se especifican archivos de entrada como un Modelo Digital de Elevación (DEM), el área de la fuente que se va a simular y se especifican los archivos de salida, que pueden ser una serie de datos a exportar o simplemente un video de la simulación realizada; teniendo la opción de al final de cada simulación poder manipular los resultados, existen opciones en MatLab para exportar archivos .tif .img. jpg de los depósitos de cada simulación o incluso realizar representaciones en 3D.

Aquí se especifica el DEM del área en la cual realizaremos la simulación en formato (.grd), el área de la fuente del material en formato .tif, las dimensiones en pixeles del área de la simulación (tamaño en pixeles de nuestro DEM), el tiempo activo de alimentación del material, el volumen del material, tiempo máximo de la simulación y el valor de la gravedad.

6.2. Volúmenes empleados en la simulación de flujos de detritos (lahares)

Qda/Río	Área de generación de lahares	Precipitación			Volumen		
		BAJA	MODERADA	ALTA	Alto peligro	Moderado peligro	Bajo peligro
Taccra	2733173	0.025	0.05	0.125	113882.2	227764.4	569411.042
Pisac	6449331	0.025	0.05	0.125	268722.1	537444.3	1343610.6
SN1	2036972	0.025	0.05	0.125	84873.8	169747.7	424369.2
Cabreria	5105069	0.025	0.05	0.125	212711.2	425422.4	1063556.0
Imnominada (Quebrada principal)	761246	0.025	0.05	0.125	31718.6	63437.2	158592.9
Tributaria	575161.04	0.025	0.05	0.125	23965.0	289306.0	119825.2
Pastoraiz	1605374	0.025	0.05	0.125	66890.6	133781.2	334452.9
San Pedro	1000000	0.025	0.05	0.125	41666.7	83333.3	208333.3
Villa Continental	275000	0.025	0.05	0.125	11458.3	22916.7	57291.7
Azufra (Sector Gamarra)	3802554	0.025	0.05	0.125	158439.8	316879.5	792198.8
Azufra (Sector Lari Lari y Tucos)	2737280	0.025	0.05	0.125	114053.3	228106.7	570266.7
Azufra	3931915	0.025	0.05	0.125	163829.8	327659.6	819149.0
Canchero	9459679	0.025	0.05	0.125	394153.3	788306.6	1970766.5
Chullo	21905611	0.025	0.05	0.125	912733.8	1825467.6	4563669.0

Tabla 1. Cálculo de volumen del lahar de las quebradas del distrito de Cayma, resultado de la multiplicación del área de generación de lahares por los distintos grados de precipitación (baja, media y alta).

6.3. Resultados de simulación de flujo de detritos (lahares) en el distrito de Cayma.

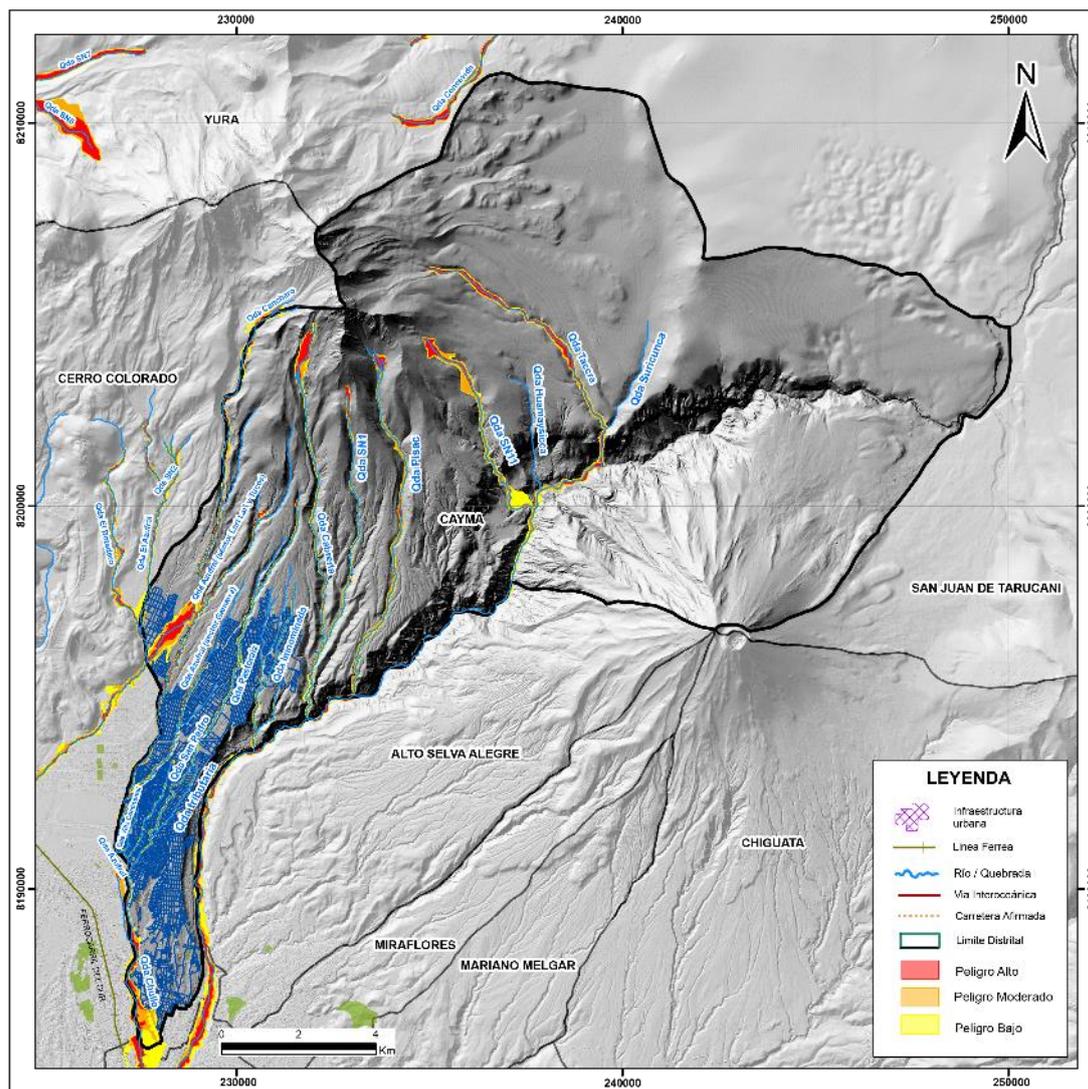


Figura 45. Mapa de lahares del distrito de Cayma.

7. POSIBLE INFRAESTRUCTURA AFECTADA POR LAHARES

Se ha considerado como infraestructura a los cruces afirmados, reservorios de agua, canchas deportivas, puentes, hospitales, comisarias, parques, instituciones educativas de inicial, primaria y secundaria; sin embargo, en algunas quebradas también se ven expuestas las viviendas para lo cual se requiere un estudio más detallado en esos sectores. Estas infraestructuras con posible afectación se encuentran en la quebrada Innomiada, Tributaria, pastoraíz, San Pedro, Villa Continental, Azufra (Gamarra), Azufra (Lari Lari y Tucos), Azufra y Chullo como se muestra en la tabla 2.

Nombre de quebrada	Punto crítico	Este	Norte	Nivel de peligrosidad
Innomiada	Cruce afirmado	230831.3	8197193.3	Alto
	Cruce afirmado	230691.4	8196762.3	Alto
	Cruce afirmado	230689.5	8196432.3	Alto
	Cruce afirmado	231356.4	8198017.9	Alto
	Cruce afirmado	231241.3	8197474.6	Alto
	Cruce afirmado	231440.9	8197505.3	Alto
	Cruce afirmado	231511.6	8197871.9	Alto

Tributaria	Cruce afirmado	229024.5	8193354.3	Alto
	Reservorio de agua	228999.7	8193113.9	Bajo
	Cruce afirmado	228722.6	8192541.5	Alto
	Cancha deportiva	228642.4	8192463.1	Alto
	Cancha deportiva	228629.0	8192414.0	Alto
	Cancha deportiva	228057.3	8191628.2	Alto
Pastoraíz	Cruce afirmado	230347.2	8197190.8	Alto
	Cruce afirmado	230097.0	8196243.9	Alto
	Cruce afirmado	230075.4	8195920.0	Alto
	Cruce afirmado	229910.3	8195442.1	Alto
	Cruce afirmado	229798.5	8195050.1	Alto
	Puente	228918.2	8193512.3	Alto
	Cancha deportiva	228572.4	8192826.6	Moderado
	Puente	228447.1	8192738.7	Alto
	Puente	228022.7	8191980.0	Alto
	Puente	227984.5	8191858.2	Alto
	Cruce afirmado	227931.1	8191617.5	Alto
	Puente	227799.5	8191379.8	Alto
	Puente	227758.6	8191273.3	Alto
	Parque	227790.8	8191306.6	Alto
	IE. Inicial	227800.9	8191274.0	Bajo
	I.E. Ángeles del Sur	228062.2	8191868.1	Bajo
	Puente	227762.6	8191162.0	Alto
	Cruce afirmado	227532.4	8190978.5	Alto
	Puente	227481.4	8190874.2	Alto
	Puente	227429.8	8190767.0	Alto
Parque	227415.8	8190699.2	Moderado	
San Pedro	Cruce afirmado	228220.3	8192987.1	Alto
	Cruce afirmado	228137.5	8192682.4	Alto
	Cruce afirmado	227743.2	8191873.5	Alto
	Cancha deportiva	227559.4	8191605.7	Moderado
Villa Continental	Cruce afirmado	227379.7	8191796.0	Alto
	I.E. Villa Continental	227146.0	8191184.3	Bajo
	Cancha deportiva	227206.9	8191144.3	Moderado
Azufral (sector Gamarra)	Cruce afirmado	227948.6	8193222.9	Alto
	Puente	227352.2	8192530.2	Alto
Azufral (Lari Lari y Tucos)	IE. bosques de Ghetzemani	227351.0	8192744.0	Bajo
Azufral	IE Pasitos de Jesús	227129.9	8192053.4	Bajo
	Cancha deportiva	227026.9	8191806.6	Bajo
	Puente	226994.6	8191713.2	Alto
	Cruce afirmado	226946.2	8191442.3	Alto
	Cruce afirmado	226911.7	8191214.4	Alto
	Cruce afirmado	227059.6	8190982.2	Alto
Chullo	Puente	227187.2	8190322.4	Alto
	Puente	227127.0	8187569.0	Alto
	Cruce afirmado	227192.7	8189619.7	Alto
	IE Dulces Sonrisas	227219.6	8187561.8	Alto
	IE Pequeñeces	227294.7	8187381.9	Moderado
	IE Learning Kids	227278.8	8187349.1	Moderado
	IE Rey de Reyes	227592.8	8186800.6	Moderado

IE Garabatos	227807.0	8186812.4	Moderado
IE Michigan School	227894.2	8186642.2	Bajo
IE CEBA - Honorio Delgado Espinoza	227744.8	8186502.5	Bajo
IE Crip San Juan de Dios	227570.774	8186412.8	Moderado
IE Honorio Delgado Espinoza	227734.2	8186452.6	Moderado
IE HOLT & BEST Tractors	227841.7	8186440.7	Bajo
IE Di Glave	227801.8	8186303.9	Bajo
Sencico -Arequipa	227847.6	8186231.4	Moderado
IE Lord Byron	227531.0	8186093.9	Moderado
IE Flora Tristan	227893.0	8186105.7	Moderado
IE Roxana	227760.4	8186089.6	Bajo
IE ABC Español	227662.2	8186055.8	Bajo
IE El Ave Maria	227625.1	8186005.8	Bajo
IE Mi pequeño espacio	227863.7	8186015.1	Bajo
IE ARS LIBITUM	227814.6	8185918.6	Bajo
IE CEBA - 40081 CESAR AUGUSTO MAZEIRA ACOSTA	227698.6	8185883.0	Bajo
Policlínico Garcia Bragagnini S.R.L.	227795.1	8186006.8	Moderado

Tabla 2. Ubicación (UTM WGS84) de los puntos críticos y el nivel de peligrosidad en las quebradas que atraviesan áreas urbanas en el distrito de Cayma.

7.1. Simulación en la quebrada Innominada

De acuerdo con los resultados de simulación para flujos de detritos (lahares) en la quebrada Innominada se observa 7 cruces afirmados que podrían verse afectados todos con un nivel de peligrosidad “alto”, para un escenario de precipitación de 25 mm (Fig. 46).

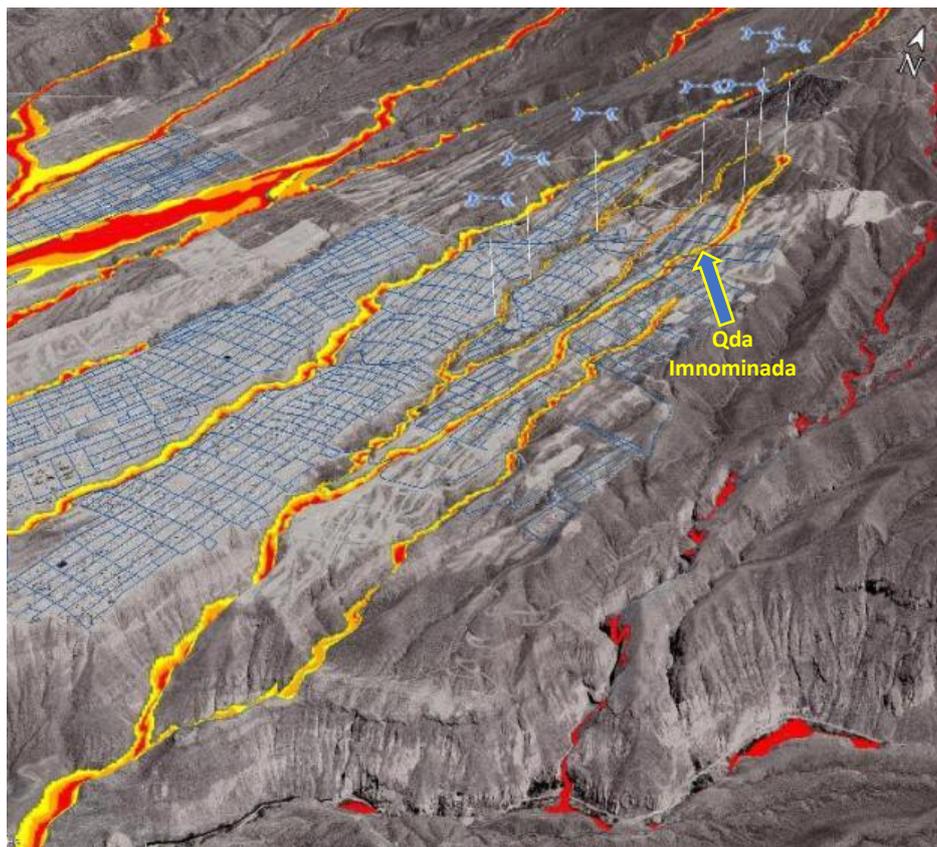


Figura 46. Simulación de lahares en la quebrada Imnominada.

7.2. Simulación en la quebrada Tributaria

La quebrada Tributaria presenta 5 puntos crítico, entre los cuales se encuentran 2 cruces afirmados (avenidas principales), 3 canchas deportivas ubicadas en la quebrada y/o cerca de ella todos con un nivel de peligrosidad “alto” y un reservorio de agua muy cercano a la quebrada con un nivel de peligrosidad “bajo” (Fig. 47).

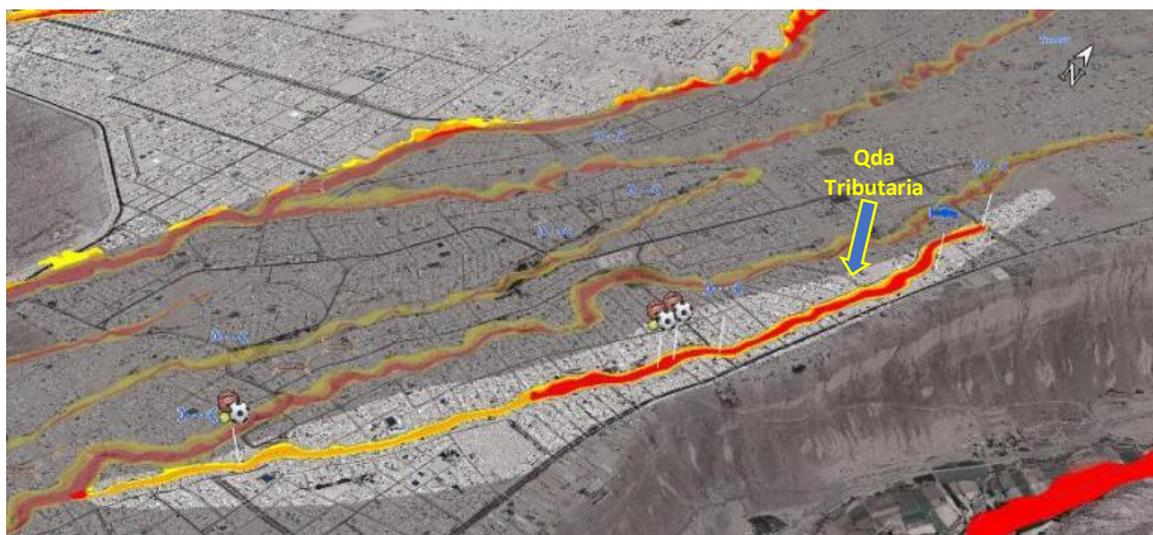


Figura 47. Simulación de lahares en la quebrada Tributaria.

7.3. Simulación en la quebrada Pastorazáiz

Los puntos críticos en la quebrada Pastorazáiz (Fig. 48) son: 7 cruces afirmados (Fig. 49), 9 puentes (Fig. 50, 51) y 1 parque con un índice de peligrosidad alto; con un índice de peligrosidad “moderado” se presenta 1 parque y 1 cancha deportiva. Asimismo, 2 instituciones educativas de inicial y primaria por la cercanía a la quebrada Pastorazáiz presentan un índice de peligrosidad “bajo”.

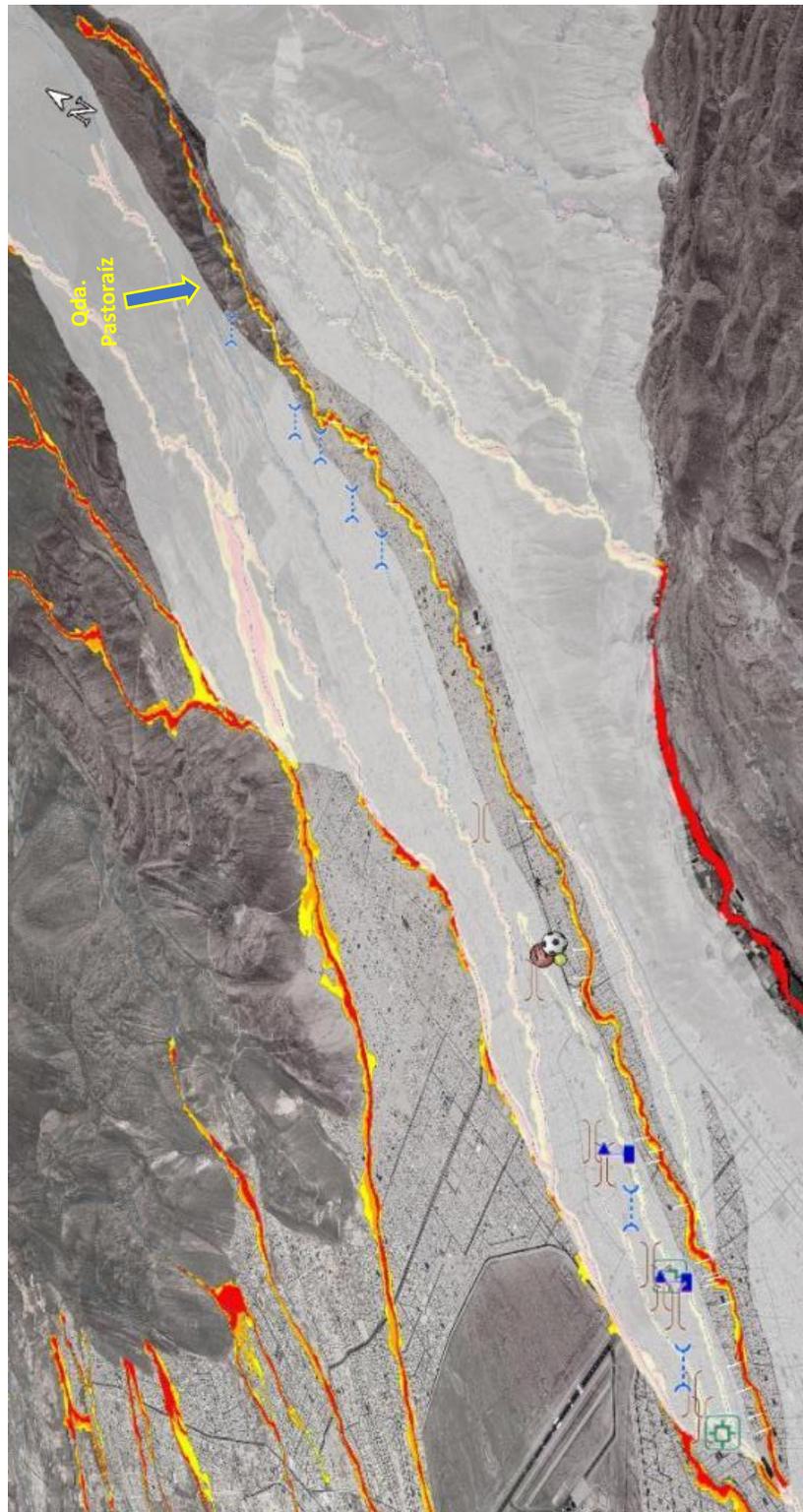


Figura 48. Simulación de lahares (peligro bajo, moderado y alto) en la quebrada Pastorazáiz.



Figura 49. Puente en el sector alto, quebrada Pastoraíz.



Figura 50. Puente sector medio, quebrada Pastoraíz.



Figura 51. Muros de menos de 1 metro, quebrada Pastoraíz.

7.4. Simulación en la quebrada San Pedro

En la quebrada San Pedro se encuentran 4 puntos críticos (Fig. 52): 3 cruces afirmados que se encuentran de manera transversal al cauce de la quebrada con un nivel de peligro “alto” y 1 cancha deportiva con un nivel de peligro “moderado” por la cerca de esta.

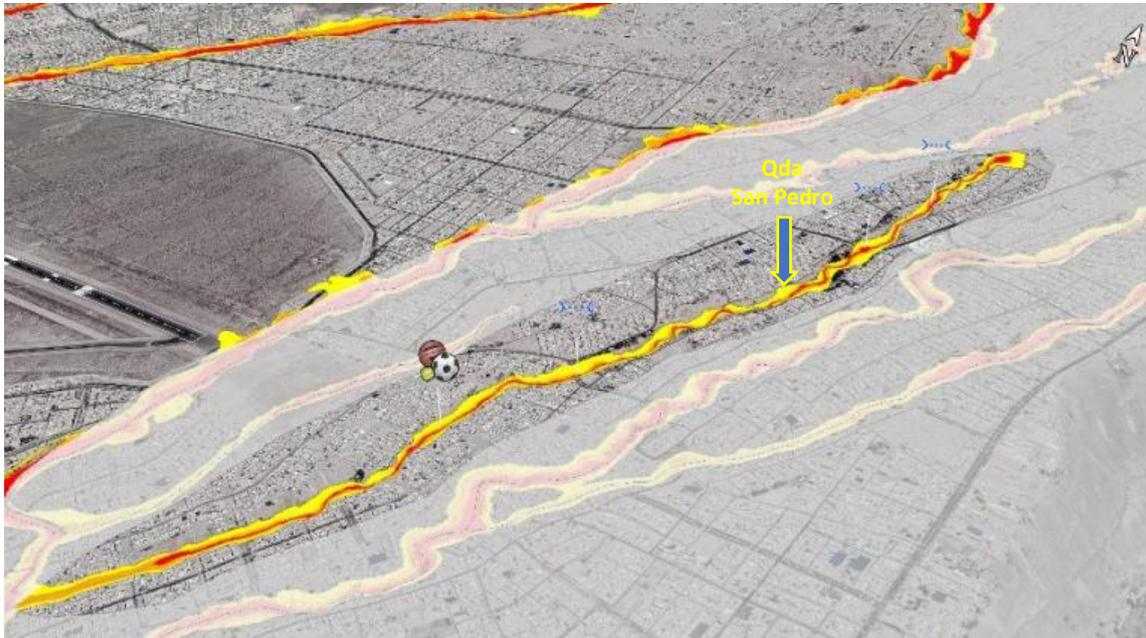


Figura 52. Simulación de lahares (peligro bajo, moderado y alto) en la quebrada San Pedro.

7.5. Simulación en la quebrada Villa Continental

Se ubican 3 puntos críticos en la quebrada Villa Continental (Fig. 53): Un cruce afirmado (carretera principal) por donde a su vez la población ha construido viviendas sobre la quebrada lo cual representa un gran peligro alto, con un nivel de peligrosidad “alto”, una cancha deportiva muy cerca al cauce de quebrada con un nivel “moderado” y el área recreativa de la I.E. Villa Continental con un nivel de peligrosidad bajo.



Figura 53. Simulación de lahares (peligro bajo, moderado y alto) en la quebrada Villa Continental.

7.6. Simulación en la quebrada Azufral (sector Gamarra, Lari Lari y Tucos)

En la quebrada Azufral (sector de Gamarra) se encuentra 2 puntos críticos (Fig. 54): 1 cruce afirmado (Fig. 55) y 1 puente (Fig. 56) que intersectan a la quebrada, generando un nivel de peligrosidad “alto”.

El punto crítico en la quebrada Azufral (sector Lari Lari y Tucos) es I.E. Bosques de Ghetzemani, con un nivel de peligrosidad “bajo”. Del mismo modo quebrada arriba se encuentran cerca la I.E. Cristo Rey y Nazareno quienes también podrían verse afectados por la cercanía a la quebrada.

La confluencia entre la quebrada Gamarra y la quebrada Lari Lari y Tucos representa un peligro de nivel de peligro “moderado”, en esta zona se han construido viviendas que podían verse afectadas. Después de la confluencia la quebrada continúa, encontrándose 4 puntos críticos con nivel alto: 3 cruces afirmados y 1 puente. Además 2 infraestructuras con un nivel de peligrosidad “bajo”: 1 cancha deportiva y la I.E. Pasitos de Jesús. El puesto de Salud Buenos Aires de Cayma también podría verse afectado, pues está cerca a la quebrada Azufral.

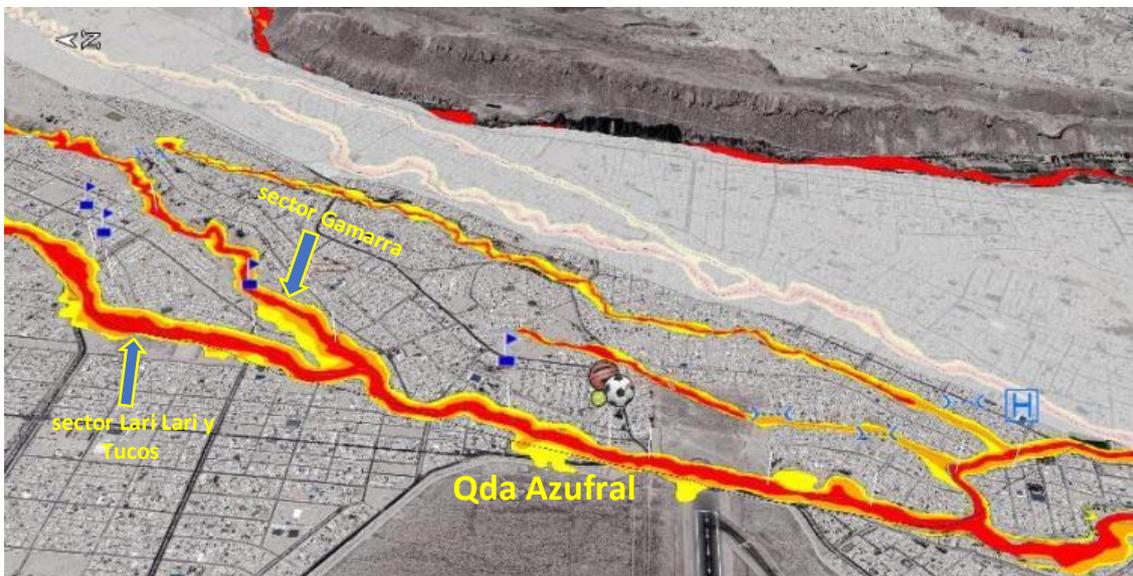


Figura 54. Simulación de lahares (peligro bajo, moderado y alto) en la quebrada Azufral.



Figura 55. Cruce afirmado (Punto crítico), sector de Gamarra, observándose depósitos de desmonte y basura vertidos en la quebrada.



Figura 56. Puente (Punto crítico) en la quebrada Azufral (sector Gamarra), observándose PDC Cabrerías. En margen derecho.

7.7. Simulación en la quebrada Canchero

En la quebrada Canchero, las infraestructuras que podrían verse afectadas por un eventual flujo de lahares son viviendas ubicadas en el fundo Cabrerías y la Urb. Villa Oliva presentando un nivel de peligrosidad de bajo, medio y alto grado (Fig. 57).

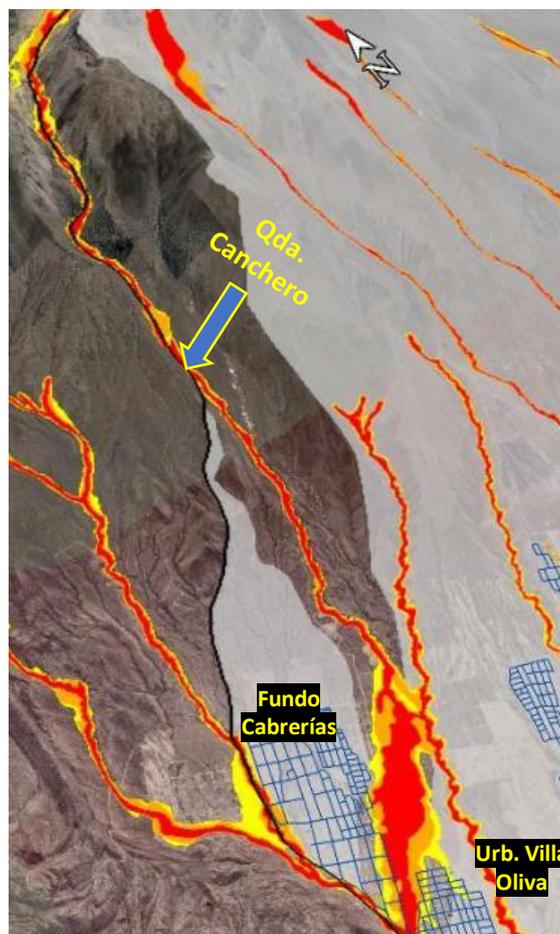


Figura 57. Quebrada Canchero atravesando áreas urbanas.

7.8. Simulación en la quebrada Chullo

En la quebrada Chullo se encuentran 3 puntos críticos (Fig. 58) con nivel de peligrosidad “alto”: 2 puentes (Fig. 59), 1 I.E. inicial (Dulces Sonrisas), 10 puntos críticos con nivel de peligrosidad “moderado”: 9 de esas infraestructuras son instituciones educativas como el colegio Lord Byron (Fig. 60) y 1 policlínico. Asimismo, se encuentra 10 puntos con nivel de peligrosidad “bajo”, correspondientes a instituciones educativas de inicial, primaria, secundaria y técnica.

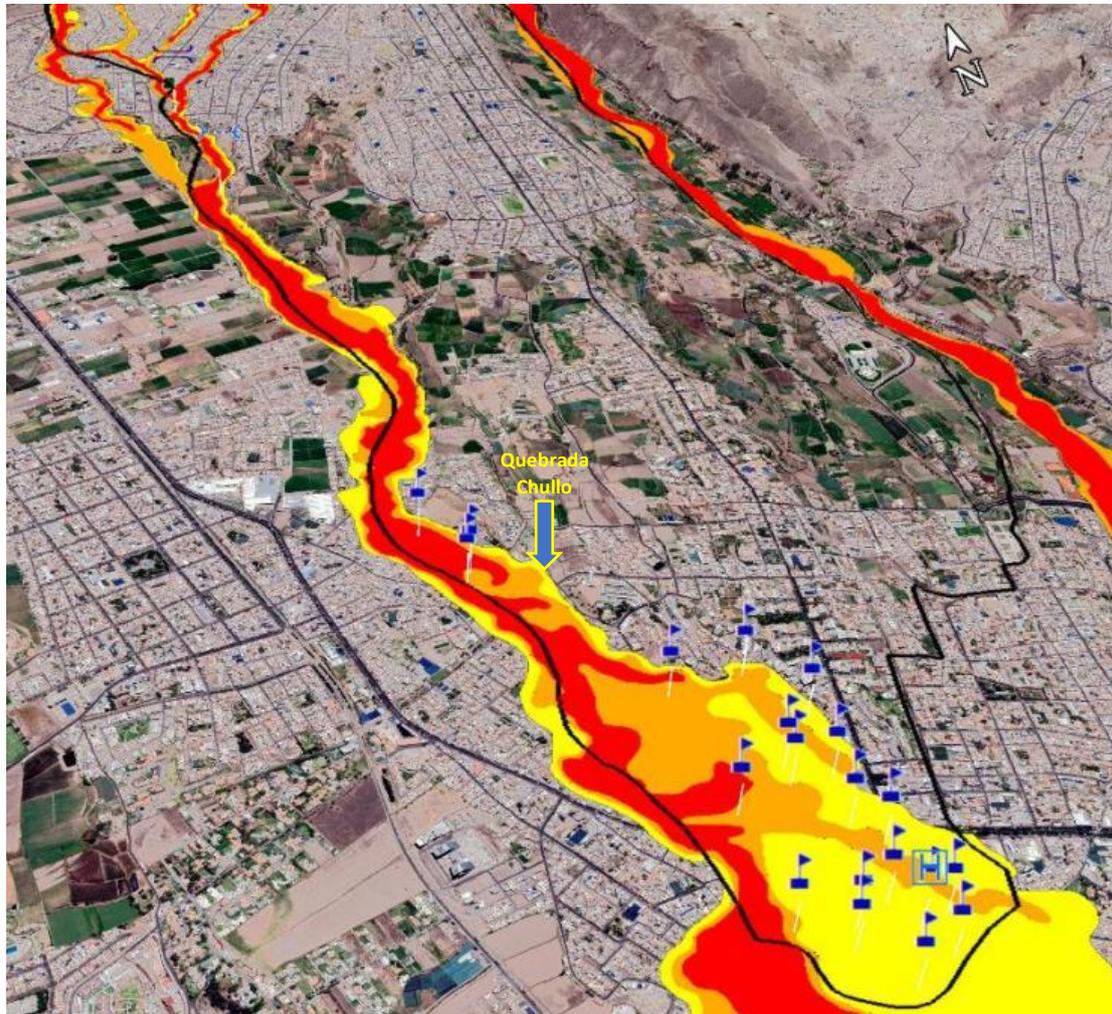


Figura 58. Simulación de lahares (peligro bajo, moderado y alto) en la quebrada Chullo.



Figura 59. Puente en el sector alto de la quebrada Chullo (Coordenadas UTM WGS84 227127 E, 8187569 N).



Figura 60. La quebrada Chullo pasando cerca al Colegio Lord Byron de acuerdo a la simulación presenta un nivel de peligrosidad "Moderado".

8. CONCLUSIONES

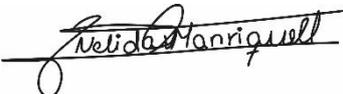
1. El distrito de Cayma (Parte urbana), se encuentra asentada sobre flujos de bloques y ceniza perteneciente al domo-colada Cabrerías y hacia el sur se encuentran depósitos aluviales, asimismo presentan quebradas que descienden desde las partes altas del Complejo Volcánico Chachani con lahares del pleistoceno consolidados y del holoceno poco consolidados a moderada consolidación.
2. Se identificaron 13 quebradas por donde se pueden generar flujos de detritos (lahares) y se hizo el análisis de puntos críticos en 8 quebradas que atraviesan la parte urbana: Innominada, Tributaria, Pastoraíz, San Pedro, Villa Continental, Azufra (sector Gamarra; Lari Lari y Tucos), Canchero y Chullo.
3. La quebrada Innominada presenta 7 puntos críticos con niveles de **peligrosidad alto**. La quebrada Tributaria presenta 6 puntos críticos con niveles de **peligrosidad alto y bajo**. La quebrada Pastoraíz presenta 21 puntos críticos con niveles de **peligrosidad alto, moderado y bajo**. La quebrada San Pedro presenta 4 puntos críticos con niveles de **peligrosidad alto y moderado**. La quebrada Villa Continental presenta 3 puntos críticos con niveles de **peligrosidad alto, moderado y bajo**. La quebrada Azufra (sector Lari Lari y Tucos y sector Gamarra) presenta 9 puntos críticos con niveles de **peligrosidad alto y bajo**. La quebrada Canchero no presenta puntos críticos. La quebrada Chullo presenta 23 puntos críticos con un nivel de **peligrosidad alto, moderado y bajo**.

9. RECOMENDACIONES

- Implementar un sistema de alerta temprano (SAT) para los lahares sobre todo en las quebradas más activas del distrito de Cayma.
- Se deben ampliar y no reducir los cauces de las torrenteras, se debe respetar su cauce natural.
- Se sugiere construir muros de contención o disipadores de energía, para ello se debe realizar un estudio completo en tramos de quebradas identificados como zonas críticas
- Realizar la limpieza de los cauces de las quebradas de forma periódica.
- La autoridad local pertinente debe emitir ordenanzas para prohibir: La construcción de viviendas en zonas de alto peligro por lahares en los cauces de las quebradas, la ocupación en las fajas marginales o el límite natural de un río o quebrada y finalmente la expansión urbana hacia los cauces de las quebradas.
- Sensibilizar a la población a través de talleres y charlas con el objetivo de concientizar sobre la construcción de viviendas o infraestructura área susceptibles a la ocurrencia de lahares.
- Utilizar la información generada para elaborar planes de contingencia en las zonas afectadas por lahares.



Ing. LIONEL V. FIDEL SMOLL
Director
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico
INGEMMET



Ing. Nérida Manrique Llerena

BIBLIOGRAFÍA

- Córdoba, G., G. V., F. S. M., G. V. J., D. B., & G., S. (2015). Secondary lahar hazard assessment for Villa la Angostura, Argentina, using Two-Phase-Titan modelling code during 2011 Cordón Caulle eruption. *European Geosciences union*, 9p.
- Fuentes, D.; (2015). Lahares secundarios: análisis de parámetros físicos en depósitos pirolásticos y su relación con los mecanismos generadores. Tesis Pregrado: Universidad de Chile.
- INEI. (2017). Instituto Nacional de Estadística e Informática, Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. Lima.
- INEI. (2017). Instituto Nacional de Estadística e Informática, Resultados definitivos sobre la Población Económicamente Activa del departamento de Arequipa de los Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. Lima.
- INGEMMET. (Extraído el 03 de febrero del 2022). Observatorio vulcanológico del Ingemmet (OVI). Obtenido de Tipos de erupciones: , desde http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page_id=102#:~:text=Las%20erupciones%20volc%C3%A1nicas%20son%20el,roca%20fundida%2C%20gases%20y%20cristales.&text=Si%20los%20gases%20del%20magma,a%20la%20superficie%20sin%20explotar.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo geológico. (2022). Evaluación de peligros geológicos por flujo de detritos (lahares) en el centro poblado Yalaque y en la quebrada El Volcán. Distritos La Capilla y Quinistaquillas, Provincia de General Sánchez Cerro, Departamento Moquegua. 54p: ngemmet, Informe Técnico N° A7212.
- Iverson, R., Schilling, S., & Vallance, J. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, v. 110, N°8, 12p.
- Kelfoun, K., & Druit, t. T. (2005). Numerical modelling of the emplacement of the 7500 BP Socompa rock avalanche, Chile. *J. Geophys. Res.*, B12202, doi : 10.1029/2005JB003758, 13p.
- Lugo, J. (1988). Elementos de geomorfología aplicada: Métodos cartográficos. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mariño, J., Rivera, M., Thouret, J., & Macedo, L. (2016). Geología y mapa de peligros del volcán Misti. INGEMMET. Lima: Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica.
- Sánchez, R., Mayorga, R., & Urrego, L. &. (2002). Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamientos en tiempo real. Simposio Latinoamericano de Control de Erosión, 1, Bucaramanga, 8p.
- Siebert, L., Cottrell, E., E, V., & Andrews A. (2015). *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)*. U.S. National Museum of Natural History, Smithsonian Institution, Washington, DC, USA.
- Tilling, R. (1993). Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos, Santa Fé, Nuevo México. Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, 2-3 julio 1989. [s.l.], 125p.
- Vallance, J. W. (2001). Lahars. En H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, & J. Stix, *Encyclopedia of Volcanoes*. Londres: Academic Press.

- Vallance, J., & Iverson, R. (2015). Lahars and their deposits. Encyclopedia of volcanoes, 26p.
- Vásconez, R., Hall, M., & Mothes, P. (2009). Devastadores flujos de lodo disparados en el volcán Carihuairazo por el terremoto del 20 de Junio de 1698. Revista Politécnica. Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador, 20p.
- Vera, P., Ortega, P., Casa, E., Santamaría, J., & Hidalgo, X. (2019). Modelación Numérica y Mapas de Afectación por Flujo de Lahares Primarios en el Drenaje Sur del Volcán Cotopaxi. Revista Politécnica, 11p.

ANEXO: MAPAS

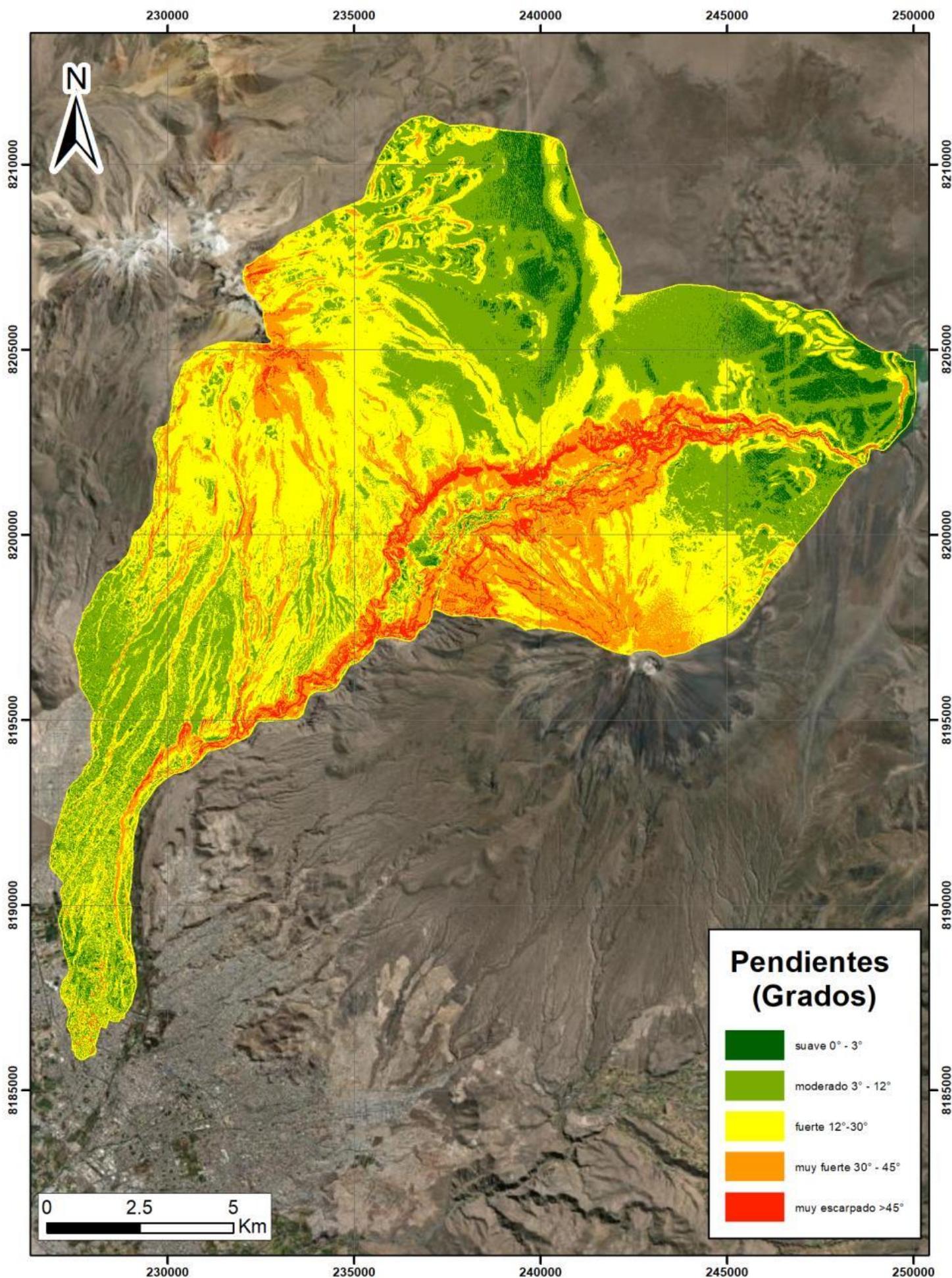
- 1:** Mapa de pendientes del terreno del distrito de Cayma a partir de un modelo digital de elevaciones de 3m de resolución. Fuente: Elaboración Propia.

- 2:** Mapa geomorfológico del distrito de La Capilla a partir de la clasificación de unidades geomorfológicas de la especificación técnica DGAR-ET-002 V-2 elaborada por el INGEMMET a escala 1:25,000. Fuente: Elaboración Propia.

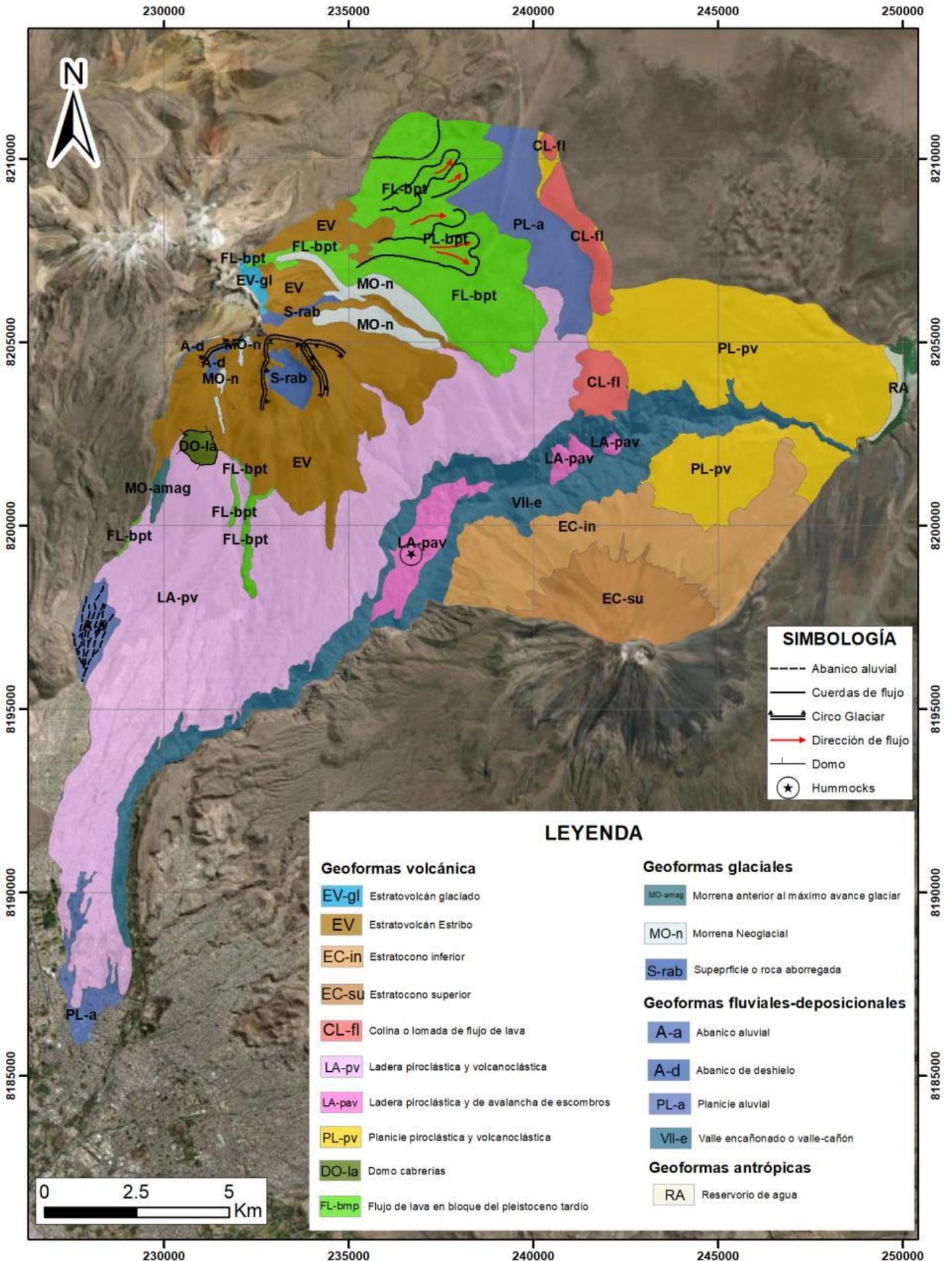
- 3:** Mapa geológico del distrito de Cayma. Fuente: Elaboración Propia.

- 4:** Mapa de simulación de flujo de detritos (lahares), en el distrito de Cayma. Fuente: Elaboración Propia.

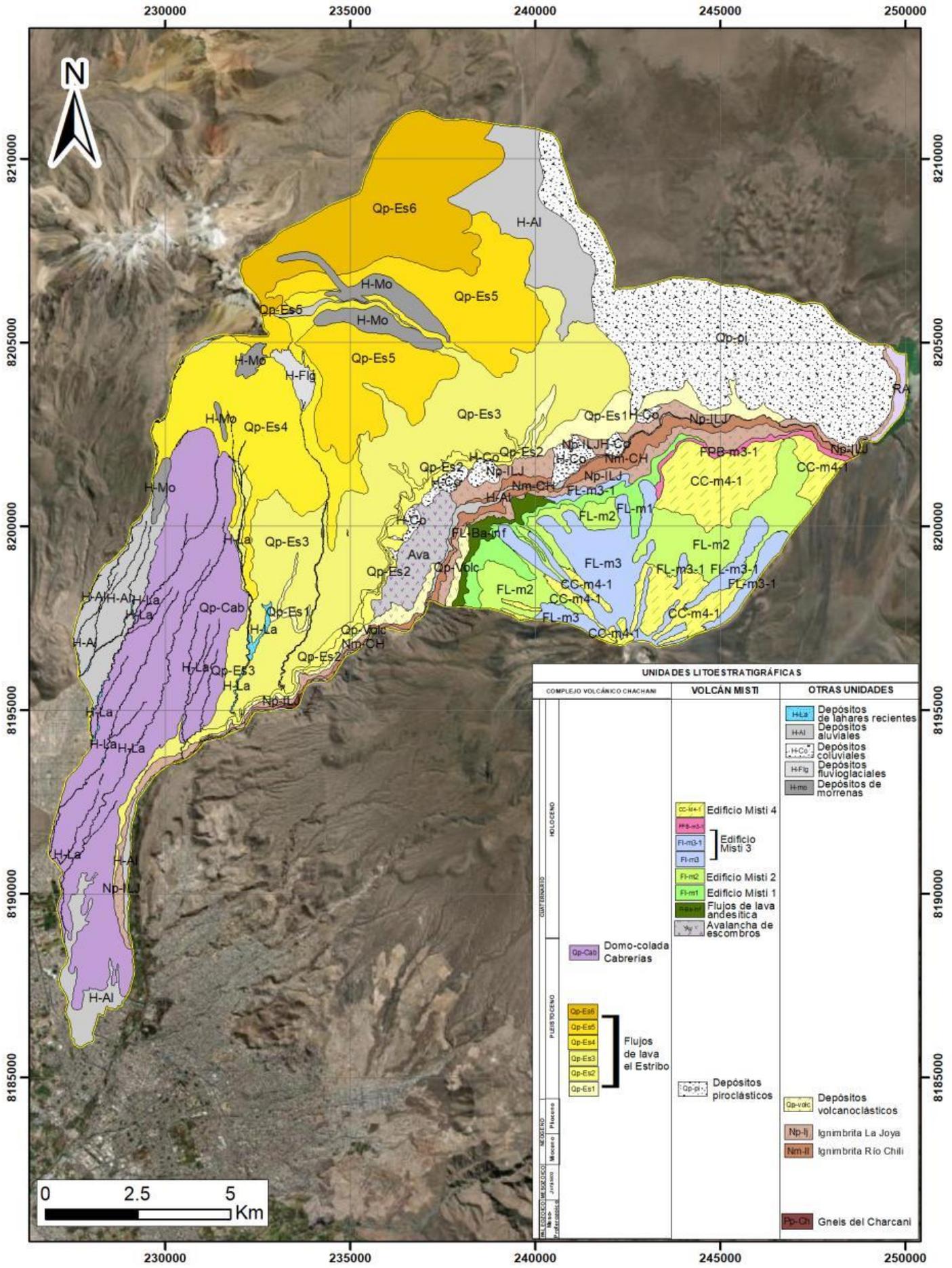
MAPA DE PENDIENTES DEL DISTRITO DE CAYMA



MAPA DE GEOMORFOLÓGICO DEL DISTRITO DE CAYMA



MAPA GEOLÓGICO DEL DISTRITO DE CAYMA



UNIDAD DE LITOE STRATIGRÁFICAS		
COMPLEJO VOLCÁNICO CHACHANI	VOLCÁN MISTI	OTRAS UNIDADES
<p>HOLOCENO</p> <p>H-La Depositos de lahares recientes</p> <p>H-AI Depositos aluviales</p> <p>H-Co Depositos coluviales</p> <p>H-Fig Depositos fluvio-glaciales</p> <p>H-mo Depositos de morrenas</p>	<p>CC-m4-1 Edificio Misti 4</p> <p>FL-m3-1 Edificio Misti 3</p> <p>FL-m3 Edificio Misti 3</p> <p>FL-m2 Edificio Misti 2</p> <p>FL-m1 Edificio Misti 1</p> <p>FL-a Flujos de lava andesítica</p> <p>FL-Basinf Avalancha de escombros</p>	<p>Qp-Es6 Flujos de lava el Estribo</p> <p>Qp-Es5 Flujos de lava el Estribo</p> <p>Qp-Es4 Flujos de lava el Estribo</p> <p>Qp-Es3 Flujos de lava el Estribo</p> <p>Qp-Es2 Flujos de lava el Estribo</p> <p>Qp-Es1 Flujos de lava el Estribo</p> <p>Qp-pl Depositos piroclásticos</p> <p>Qp-alc Depositos volcanoclasticos</p> <p>Np-lj Ignimbrita La Joya</p> <p>Nm-ll Ignimbrita Río Chili</p> <p>Pp-Ch Gneis del Charcani</p>
<p>CUATERNARIO</p> <p>Qp-Cab Domo-colada Cabrerías</p>		
<p>PLEISTOCENO</p>		
<p>MIOCENO</p> <p>Mp-Placense Placense</p> <p>Mp-Jurassico Jurassico</p> <p>Mp-Andesítico Andesítico</p>		

