

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO  
ABAD DEL CUSCO  
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y  
METALÚRGICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



**“EVALUACIÓN DE PELIGRO POR OCURRENCIA DE  
LAHARES (FLUJOS DE LODO) EN EL COMPLEJO  
VOLCÁNICO CHACHANI-AREQUIPA”**

TESIS PRESENTADA POR:

Bch. HILDA MARLENI ALAVI CONDORI

Para optar el título profesional de  
**Ingeniero Geólogo**

ASESORES:

Mgt. JOSÉ DIONICIO CÁRDENAS ROQUE-UNSAAC

Mgt. NÉLIDA MANRIQUE LLERENA-INGEMMET

Mgt. RIGOBERTO AGUILAR CONTRERAS-INGEMMET

CUSCO - PERÚ

2020

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	5
INTRODUCCIÓN .....	7
CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES.....	9
1.1 Ubicación .....	9
1.2 Antecedentes .....	9
1.3 Marco conceptual .....	11
1.4 Planteamiento del problema.....	19
1.5 Justificación .....	20
1.6 Objetivos .....	20
1.7 Hipótesis .....	21
1.8 Variables .....	21
1.9 Metodología de Investigación .....	21
1.10 Metodología de Trabajo .....	21
1.11 Clima.....	22
1.12 Población.....	25
CAPÍTULO II: GEOMORFOLOGÍA .....	27
2.1 Geoformas del Complejo Volcánico Chachani.....	27
2.1.1 Geoformas de origen glacial .....	27
2.1.2 Geoformas de origen volcánico.....	30
2.1.3 Otras Unidades .....	34
CAPÍTULO III: GEOLOGÍA.....	37
3.1 Contexto Estructural Regional del área del Arequipa .....	37
3.2 Contexto Estratigráfico Regional.....	41
3.4 Geología del Complejo Volcánico Chachani.....	45
CAPITULO IV: ESTRATIGRAFÍA DEL SUR DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CHACHANI.....	54
4.1. Secuencia piroclástica del volcán Chachani, sector suroeste del Complejo Volcánico Chachani (Qp-Sp).....	54
4.2 Secuencia volcanoclástica, del sector suroeste del complejo volcánico Chachani (Qp-Sv).....	57
4.3 Depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas “domo Potrero” (Qp-Ptr) ....	59
4.4 Secuencia piroclástica del Complejo Volcánico Chachani, sector sureste del Complejo Volcánico Chachani (Qp-Sp) .....	60
4.5 Secuencia volcanoclástica, del sector sureste del Complejo Volcánico Chachani (Qp-Sv).....	63
4.6. Depósitos de flujo piroclástico de bloques y cenizas “domo Cabrerías” (Qp-Ptr) .....	64

4.7	Secuencia de caída de lapilli de pómez del volcán Misti .....	65
4.8	Secuencia volcanoclástica del sector sur del Complejo Volcánico Chachani .....	66
4.9.	Depósitos de lahares recientes .....	67
4.10.	Descripción de las quebradas del sur del complejo volcánico Chachani .....	68
4.10.1.	Quebrada Pastoraíz .....	69
4.10.2	Quebrada Quesquemania .....	74
4.10.3	Quebrada Gamarra.....	78
4.10.4	Quebrada Chullo .....	83
4.10.5.	Quebrada Estanquillo .....	87
4.10.6	Quebrada Añashuayco .....	92
4.10.7	Quebrada Municipal .....	96
4.10.8	Quebrada Virgen de Socorro.....	99
4.10.9	Quebrada Apacheta.....	103
4.10.10	Quebrada Honda .....	107
4.10.11	Quebrada Los Andenes .....	111
CAPITULO V: MODELAMIENTO DE LAHARES EN EL SUR DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CHACHANI .....		115
5.1	Método por simulación numérica.....	115
5.2	Modelamiento de lahares .....	115
5.3	LaharZ.....	115
5.3.1	Datos para el procesamiento con el programa LaharZ .....	117
5.3.2	Parametros de LAHARZ.....	117
5.3.3	Modelamiento con el programa Lahar Z.....	120
CAPITULO VI: EVALUACIÓN DE PELIGRO POR LAHARES.....		125
6.1	Cálculo de volumen del lahar para un escenario alto, moderado y bajo peligro del sur del Complejo Volcánico Chachani.....	126
6.2.	Mapa de peligro por lahares del sur del complejo volcánico Chachani .....	130
CAPÍTULO VII: DISCUSIONES .....		133
7.1	Depósitos de lahares que afloran al sur del Complejo Volcánico Chachani .....	133
7.2	Correlación estratigráfica de los depósitos de lahares.....	134
7.3	Volumen de los lahares del Sur del Perú .....	139
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		141
CONCLUSIONES .....		141
RECOMENDACIONES .....		143
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		144
LISTADO DE FIGURAS Y FOTOGRAFÍAS .....		148
LISTADO DE TABLAS .....		151

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

°C	Grado Centígrado
DEM	Digital Elevation Model- Modelo Digital de Terreno
INGEMMET	Instituto Geológico Minero y Metalurgico
CVC	Complejo Volcánico Chachani.
LAHARZ	Modelo físico y estadístico, que utiliza dos ecuaciones con el fin de delinear zonas de amenaza por flujos de escombros.
TITAN 2D	Programa informático desarrollado con el propósito de simular avalanchas granulares secas sobre modelos de elevación digital del terreno natura.
FLO 2D	Modelo Hidráulico bidimensional basado en la conservación de volumen en inundaciones y flujos de escombros
MSF	Modelo de Flujo de Dirección Única Modificado. Fue desarrollado para determinar las zonas de peligro asociadas a flujos de detritos.
RAMMS	Es un programa para la simulación de un amplio espectro de remoción en masa, para flujos de detritos
HEC-RAS	Hydrological Engineering Center- River Analysis System
GRID	Cuadrícula
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
OVI	Observatorio Vulcanológico de INGEMMET
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
UTM	Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator
H/L	Indicador de movilidad de flujo
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
mm	milímetros
cm	centímetros
ka	Kilo años o mil años
M.a	Millones de años
M m <sup>3</sup>	Millones de metros cúbicos

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, le doy infinitamente gracias a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y felicidad.

Agradezco a mis padres, Cristobal Alavi Yupanqui y Paulina Condori Yucra, por su apoyo incondicional, que a pesar de las dificultades y problemas siempre estuvieron conmigo para, ayudarme. A mis mejores amigas y a las personas que más aprecio Jhalizon Ali, Sonia, Ruth Saly y Karina que con su optimismo y perseverancia me ayudaron a enfrentar los caminos difíciles de la vida y seguir con mis ideales.

A FONDECYT por la subvención brindada al presente trabajo de investigación, según convenio de cofinanciamiento N° 158-2017 FONDECYT denominado “Determinación de los periodos de recurrencia y procesos desencadenantes de erupciones explosivas recientes de los volcanes Misti y Chachani: Implicaciones para la gestión del riesgo volcánico en Arequipa.

Agradezco a mis asesores del INGEMMET Mgt. Nélide Manrique Llerena y Mgt. Rigoberto Aguilar Contreras, quienes impartieron sus conocimientos, sus enseñanzas en campo y sus consejos, las que han sido fundamentales para la elaboración de esta Tesis.

De una manera especial agradezco al Dr. Marco Rivera Porras, por su confianza, apoyo, enseñanza y por las revisiones detalladas de la tesis.

A mi asesor académico, Mgt. José Cárdenas Roque, por las observaciones y sugerencias que conllevaron a la culminación de esta tesis.

A la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica cuyos docentes me impartieron conocimientos y enseñanzas muy importantes para mi formación como profesional.

Esta tesis se ha realizado con la colaboración de muchas personas que me brindaron su apoyo en todo momento. Por tanto quiero agradecerles a todos ellos cuanto han hecho por mí, para que este trabajo saliera de la mejor manera posible.

## RESUMEN

En el sur del Perú, el Complejo Volcánico Chachani (CVC), se encuentra ubicado a 22 km al noroeste del centro histórico de la ciudad de Arequipa, donde habitan más de 1 millón de habitantes. Según el último censo, al sur del Complejo Volcánico Chachani habitan más de 350,000 habitantes.

A partir de los trabajos de campo se han reconocido 11 quebradas principales (Pastoraiz, Quesquemania, Gamarra, Chullo, Estanquillo, Añashuayco, Municipal, Virgen de Socorro, Apacheta, Honda y Los Andenes); las cuales han sido cartografiadas a escala 1:10,000 y atraviesan los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura. En dichas quebradas se han identificado depósitos volcanoclasticos, piroclásticos, flujo piroclástico de bloques y cenizas provenientes de los domos Potreros y Caberías, caída de lapilli de pómez del volcán Misti y lahares recientes. Así mismo ha sido posible reconocer cuatro generaciones de lahares en diferentes épocas tomando en cuenta la posición estratigráfica: La primera generación de lahares y más antigua se deposita directamente sobre la ignimbrita Aeropuerto y se encuentra en los distritos de Cerro Colorado y Yura, la segunda generación de lahares se depositan sobre los depósitos piroclásticos del volcán Chachani, y se ubican en los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura, la tercera generación de lahares se depositan sobre los depósitos piroclásticos del volcán Misti y se encuentra en el distrito de Cerro Colorado y la cuarta generación de lahares está relacionada a los depósitos lahares recientes, popularmente conocidos como huaycos. Estos depósitos de lahares recientes se encuentran en todas las quebradas que surcan el sur del CVC.

Con la finalidad de zonificar las zonas de peligro frente a la generación de lahares se ha elaborado un mapa de peligros por lahares al sur del Complejo Volcánico Chachani, primero se calcularon tres volúmenes; de los cuales el primer volumen se calculó en base a los datos de precipitación intensa presentado en los meses de verano, el segundo y el tercer volumen se tomó de los datos de volumen de Complejo Volcánico Sabancaya (Perú) y del Complejo Volcánico Pichincha (Ecuador). Estos volúmenes corresponden a tres escenarios: zonas de bajo, moderado y alto peligro, como resultado se obtuvo 2 millones de m<sup>3</sup> para la zona de alto peligro, 5 millones de m<sup>3</sup> para la zona de moderado peligro y 9 millones de m<sup>3</sup> para la zona de bajo peligro. Para realizar la simulación de los resultados obtenidos, se utilizó el programa LaharZ y un DEM de 12 m de resolución, que permitieron determinar las áreas afectadas por flujos de lahares.

Cada año en época de lluvia se suscitan lahares en las quebradas que descienden del sur del Complejo Volcánico Chachani identificadas; lo cual representa un riesgo para la población. Por lo tanto las zonas más propensas a ser afectadas por flujos de lahares son los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura, Yanahuara, Uchumayo, Tiabaya y Sachaca, donde habitan cerca de 400,000 pobladores, existen más de 300 Instituciones Educativas y 7 centros de salud.

## INTRODUCCIÓN

Complejo Volcánico Chachani se encuentra ubicado en el sur peruano, y forma parte de los cuatro volcanes potencialmente activos: Chachani, Sara Sara, Solimana y Ampato; es decir volcanes que presentaron actividad eruptiva anterior al Holoceno (Bromley et al., 2019). El Chachani forma una cadena volcánica junto con el Misti (activo) y el Pichu Pichu (extinto) en dirección NO-SE en el límite norte y noreste de la depresión de Arequipa. En el área de Arequipa el Chachani se ha construido sobre las secuencias ignimbríticas, “Río Chili”, “La Joya”, “Aeropuerto de Arequipa” y “Tufo Yura”; los cuales se emplazaron entre el Mioceno y el Pleistoceno (13.19-1.02 M.a; Paquereau-Lebti et al., 2006)

La actividad volcánica generalmente representa una amenaza para la población asentada en zonas aledañas. Los productos emitidos por la actividad eruptiva de los volcanes son la materia prima para la ocurrencia de lahares; los cuales son flujos gravitacionales compuestos por agua y sedimentos volcánicos que se desplazan por las laderas de un volcán (Vallance, 2000). Muchas veces ocurren durante periodos eruptivos, pero igualmente pueden ocurrir en periodos de no actividad volcánica (Bardintzeff y Mcbirney, 2000).

El trabajo de campo ha permitido identificar depósitos de lahares en las quebradas del sector sur del Complejo Volcánico Chachani, los que se habrían emplazado durante distintos episodios. En los últimos años y en la actualidad se ha evidenciado la ocurrencia de lahares debido a las lluvias inusuales registradas en la parte alta del complejo volcánico. Un ejemplo de ello ocurrió en febrero del 2018, fecha en la cual las constantes precipitaciones pluviales originaron la reactivación de la quebrada Añashuayco (distrito de Cerro Colorado) por donde discurrió lahares que se movilizaron por su cauce, causando la muerte de una persona, daños en viviendas y vías de comunicación (Fuente: El comercio, 2018).

El desencadenamiento de futuros lahares que descendan del Complejo Volcánico Chachani puede incrementar el riesgo, causar víctimas y daños a la propiedad en Arequipa. En efecto, la presencia de nuevas invasiones y construcciones en zonas de torrenteras o quebradas del flanco sur del complejo volcánico Chachani están volviendo a la ciudad de Arequipa cada vez más vulnerable a este fenómeno.

La presente tesis muestra la evaluación de peligros ante la ocurrencia de lahares en los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura por las cuales cruzan las quebradas que descenden del Complejo Volcánico Chachani, realizado en base a datos de campo y el modelamiento numérico con el software LAHARZ, el cual es ampliamente utilizado para delinear las zonas que pueden ser afectadas o inundadas por lahares (Iverson y Schilling, 1998). Esto nos permitirá identificar las áreas en peligro por ocurrencia de lahares (flujos

de lodo) en la ciudad de Arequipa, cuya información contribuirá en la prevención y mitigación de desastres originados por lahares.

El trabajo ha sido desarrollado en el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, Arequipa y está enmarcado dentro del convenio de cofinanciamiento FONDECYT- INGEMMET (convenio N°158-2017-FONDECYT), proyecto de Investigación Básica: “Determinación de los periodos de recurrencia y procesos desencadenantes de erupciones explosivas recientes de los volcanes Misti y Chachani: implicaciones para la gestión del riesgo volcánico en Arequipa”.

## CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES

### 1.1 Ubicación

El Complejo Volcánico Chachani (CVC) está localizado hacia el norte de la ciudad de Arequipa, a 22 km del centro de la ciudad (Figura 1.1.). Las principales quebradas que descienden del CVC, se localizan al sur y abarcan los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura, de la provincia y región Arequipa.

Las coordenadas UTM que delimitan el área de estudio son las siguientes:

214924E – 8214474N; 238783E – 8198416N

195727E – 8190850N; 213618E – 8181187N

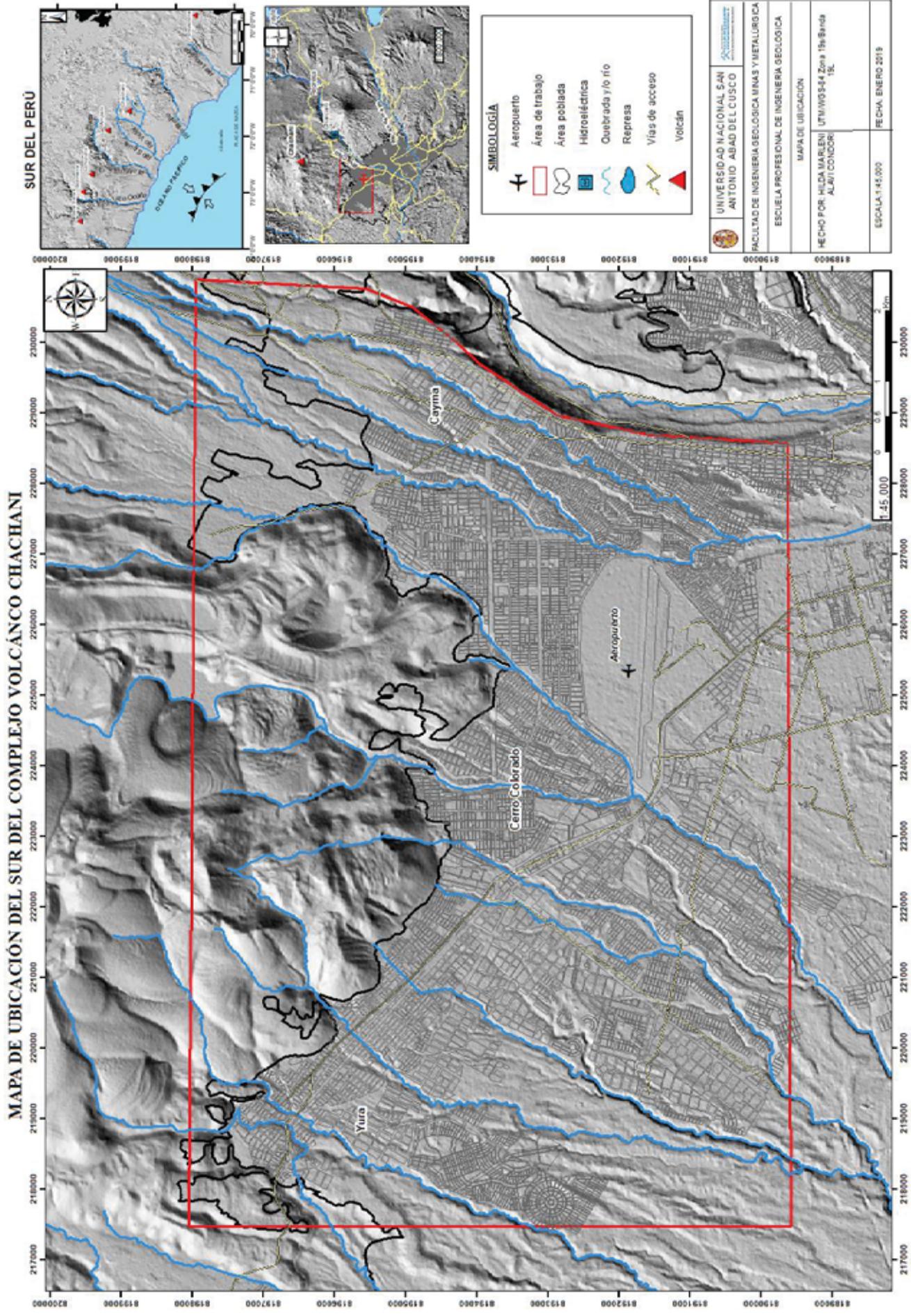
### 1.2 Antecedentes

Durante los últimos años la población asentada al sur del CVC ha incrementado. Actualmente, existen pocos trabajos sobre estudios geológicos y evaluación de peligros por ocurrencia de lahares en esta zona. A continuación, se presentan algunos de los estudios que se han realizado en el CVC y en los alrededores:

Aguilar, R. y Vela, J. (2018), en el Informe Técnico N°A6811 (INGEMMET), “Evaluación de peligros en la quebrada Matagente-Charcani”, describen los lahares provenientes del flanco noreste del volcán Misti, causados por las intensas precipitaciones pluviales. Estos lahares afectaron el muro de protección construido en la margen derecha del río Chili, provocando la ruptura de la tubería de conducción y dejando sin suministro de agua potable por 11 días a la ciudad de Arequipa.

Núñez, H. y Peñalva, J. (2018), publicaron en la universidad Blaise Pascal (Francia) un estudio sobre “Evaluación de vulnerabilidad y gestión del riesgo de desastres en el Cono Norte (Piedemonte del Chachani) de la ciudad de Arequipa”, en el cual determinaron las zonas de alto peligro por inundación, y explicaron que la generación de estos lahares se debe a la presencia de lluvias en los meses de diciembre a marzo, y a la extracción de material de cantera.

Vela, J. y Cuno, J. (2017), en el Informe Técnico N°A6786, (INGEMMET), realizaron una evaluación de “Peligros geológicos en la asociación de vivienda los Jazmines de Cayma”, al sur del volcán Chachani, determinando que la asociación Los Jazmines se encuentra asentada sobre depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza del volcán Chachani y secuencias de caída de téfras del volcán Misti, y en las quebradas aledaña. En la zona de estudio se observaron depósitos de lahares históricos y recientes, lo cual indica que la posibilidad de ocurrencia de lahares es latente.



**Figura 1.1.** Mapa de ubicación del área de estudio, el cual abarca los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura. Fuente: Elaboración propia.

Arapa, R. (2017), en el estudio sobre “Análisis de los daños producidos por el flujo de detritos en la quebrada el Chullo en enero de 2017, Arequipa, Perú”, determinó que la quebrada Chullo representa un riesgo muy alto en las temporadas de lluvia por la presencia de material suelto y antropogénico.

Aguilar, R. (2015), realizó una tesis de Maestría, sobre el Complejo Volcánico Chachani “Long-lived magmatic systems: the post-caldera Chachani volcanic complex case study (Peru)”, en la cual determina las edades de los doce edificios volcánicos y luego agrupa estratigráficamente en tres grupos, según la edad  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ : lavas de Pre-Chachani (>1.28 Ma), Edificios Antiguos (<1000-640 ka) y los Edificios Jóvenes (>400-640 ka).

Paquereau-Lebti, P., Thouret J. C., Worner, G., Fonari, M. (2006), en su artículo “Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, Southern Peru: Stratigraphical and petrological correlations” en la universidad de Blaise Pascal (Francia), Realizaron un estudio estratigráfico de las ignimbritas Miocenas-Pleistocenas que se encuentran en los alrededores del complejo volcánico Chachani, denominadas: “Ignimbrita del Río Chili”, “Ignimbrita de la Joya”, “Ignimbrita del Aeropuerto de Arequipa” y el “Tufo Yura”.

García, F.F., Chorowicz, J. y Legros, F. (1997). Realizaron el estudio “La caldera Chachani, gran centro explosivo Plioceno-Holoceno del Sur del Perú”; en el cual identificaron estructuras volcánicas utilizando imágenes LANDSAT y radar ERS”, sugiriendo la existencia de una gran caldera que fue el centro de emisión de las ignimbritas que yacen en áreas aledañas a la ciudad de Arequipa y sobre la cual yace el CVC.

### **1.3 Marco conceptual**

#### **1.3.1 Volcán**

Un volcán es una formación geológica en la corteza terrestre producto de la acumulación de material volcánico. Se forma cuando el magma rico en gas asciende desde una cámara magmática hacia una fisura pre-existente en la corteza terrestre por medio de un conducto llamado chimenea. Las erupciones de lava, de material piroclástico o combinación de ambos, que se siguen a menudo separadas por largos períodos de inactividad, acaban formando la estructura que llamamos volcán. (Tarbuck, E. y Lutgens, F., 2001)

#### **1.3.2 Tipos de volcanes según su forma**

##### **1.3.2.1 Estratovolcán**

Un estratovolcán, es un tipo de volcán cónico con flancos empinados; él cual se forma por la acumulación sucesiva de materiales piroclásticos y coladas lávicas emitidas desde un mismo sistema magmático y en diferentes erupciones; pueden tener pendientes que superen los 40° (Ortiz, et al, 2004). Como ejemplo están los volcanes más altos de

nuestro país; Coropuna 6768 msnm, Misti con 5822 msnm (Fotografía 1.2.), Ubinas 5670 msnm, Ticsani 5408 msnm, etc.



**Fotografía 1.2.** Vista del volcán Misti, tomada desde el sector de Yura.

### **1.3.2.2 Cono de escoria**

Son volcanes pequeños, que en su cima tienen un cráter en forma de plato, y que raramente ascienden más de 300 m de altura. Se originan a causa de erupciones a través de un solo conducto y se forman cuando un magma que contiene una cantidad pequeña de gas llega a la superficie, acumulándose alrededor de la zona de emisión y construyendo un pequeño cono de escorias, nombre debido al aspecto escoriáceo de estos materiales (Ortiz, et al., 2004). En el Perú se han identificado conos de escoria en los departamentos de Arequipa (Fotografía 1.3.) y Cusco.



**Fotografía 1.3.** Conos de escoria del valle Andahua. Tomada DePeru.com

### **1.3.2.3 Volcán en escudo**

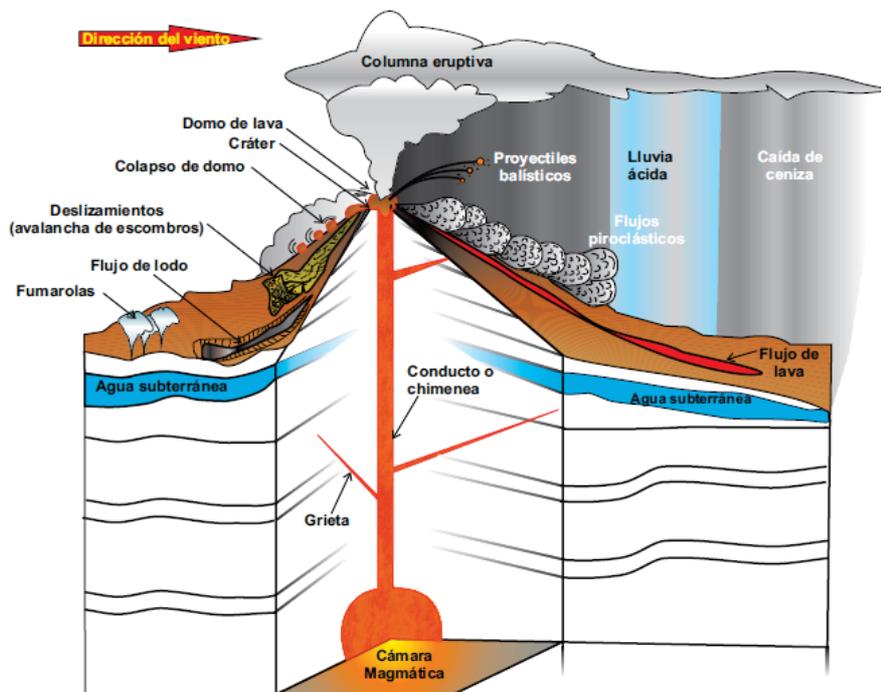
Un volcán en escudo es aquel cuyo diámetro es mucho mayor que su altura. Se forma cuando el magma tiene un contenido muy bajo en gas y al llegar a la superficie, descarga sólo líquido (flujos de lava). Al caer la lava, muy fluida, corre sobre la superficie dando lugar a una colada lávica. La repetición de este proceso, crea una morfología en forma de escudo (Ortiz et al., 2004), como el volcán Kilauea en Hawai (Fotografía 1.4.).



**Fotografía 1.4.** Volcán Kilauea en Hawái. Fotografía tomada por María Ortiz, 2018.

### 1.3.3 Peligros volcánicos

Las erupciones volcánicas son uno de los principales peligros naturales en la Tierra. En los últimos 20 años la población en el Perú ha crecido y se ha expandido, en muchos casos alrededor de los volcanes activos (Sabancaya, Misti, Ubinas, Huaynaputina, Tutupaca, Yucamane y Ticsani) y potencialmente activos (Chachani, Sara Sara, Solimana, Coropuna, Ampato y Casiri). El peligro de una erupción volcánica depende de varios factores, entre ellos: tipo de volcán, el tiempo desde la última erupción, ubicación geográfica, clima local y época del año. Cuanto más tiempo el volcán este en calma, mayor será la erupción (Rymer, 2015). A continuación, se describen los principales peligros volcánicos.



**Figura 1.5.** Diagrama donde se muestran los Principales peligros volcánicos. Fuente: Tomado de Myers et al., 2000.

### **1.3.3.1 Peligro por corriente piroclástica de densidad (PDC)**

Los PDC se consideran como uno de los peligros volcánicos que más daño puede causar ya que se mueven lateralmente, expandiéndose de manera flotante con mezclas de gases calientes y partículas fragmentadas (ceniza, lapilli, bloques) a altas temperaturas y velocidades. Hay tres formas principales en que los PDC se producen: 1) Colapso de la columna de erupción vertical de gases y cenizas 2) Colapso de domo y 3) Explosión lateral o dirigida del domo (Cole al., 2015).

### **1.3.3.2 Peligros por caídas piroclásticas**

Las caídas de piroclásticas se generan durante erupciones explosivas, cuando los fragmentos de roca son expulsados hacia la atmósfera de forma violenta, formando una columna eruptiva que puede alcanzar varias decenas de kilómetros sobre la superficie y que posteriormente caen sobre la superficie terrestre. Los fragmentos más grandes y densos caen cerca del volcán y se denominan bombas o bloques (>64 mm), mientras que las partículas de menor tamaño, denominadas lapilli (2-64 mm) y ceniza (<2 mm) son llevadas por el viento a grandes distancias, luego caen y forman una capa de varios milímetros o centímetros de espesor (Walker, 1971).

### **1.3.3.3 Peligros por avalanchas de escombros**

Las avalanchas de escombros ocurren con poca frecuencia y pueden alcanzar decenas de kilómetros de distancia y se desplazan a gran velocidad, así por ejemplo en el caso del Monte St. Helens, se estimaron velocidades del orden de 240 km/h (Glicken, 1996). Las avalanchas de escombros se producen por deslizamientos súbitos de una parte de los edificios volcánicos, que pueden cubrir cientos de kilómetros cuadrados en unos pocos minutos. Los factores que pueden desencadenar una avalancha son la elevada pendiente del volcán, presencia de fallas, fuertes movimientos sísmicos o explosiones volcánicas (Van y Davies, 2015).

### **1.3.3.4 Peligros por flujos de lava**

Los flujos de lava son derrames de roca fundida o magma a altas temperaturas entre 800 °C y 1200 °C (Kilburn, 2015).

Las velocidades de avance de los flujos de lava varían considerablemente desde unos pocos metros a cientos de metros por hora para flujos de lava silícicos, hasta varios kilómetros por hora para flujos de lava basálticos. Dadas sus velocidades bajas los flujos de lava rara vez constituyen una amenaza para la vida humana (Tilling y Beate, 1993).

### **1.3.3.4 Peligros por gases volcánicos**

Los gases volcánicos son los productos invisibles, pero a menudo continuos de la actividad volcánica. Estos gases, aunque son un peligro relativamente menor en comparación con otros fenómenos volcánicos, pueden tener importantes impactos en el

entorno regional y mundial y pueden contribuir con gases de efecto invernadero a la atmósfera. La emisión de gases en elevaciones altas tendrá menos impacto directo en la población que las columnas de gas de bajo nivel, incluso los volcanes inactivos pueden representar una amenaza para la salud humana y el medio ambiente local (Jones y Rymer, 2015).

Durante las erupciones volcánicas se produce una importante liberación de gases, principalmente vapor de agua; pero también dióxido de carbono, dióxido de azufre, ácido clorhídrico, monóxido de carbono, ácido fluorhídrico, azufre, nitrógeno, cloro y flúor (Hoblitt et al., 1995).

### 1.3.3.5 Peligros por lahares (flujos de lodo)

Los lahares o flujos de lodo, son mezclas de partículas volcánicas de tamaños diversos movilizados por el agua y que fluyen rápidamente (20-60 km/h) por valles y quebradas originados en los volcanes (Tilling, 1993). Se generan durante las erupciones volcánicas o por otros procesos cuando grandes masas de agua se mezclan con sedimentos y descienden por los flancos de los volcanes (Wallance e Iverson, 2015; Tilling, 1993). El agua puede provenir de fuertes lluvias, fusión de hielo o nieve, ríos, o lagunas cratéricas. Los fragmentos de roca transportados por los lahares los hacen especialmente destructivos y a lo largo de nuestra historia han cobrado muchas vidas, tal como se observan en la tabla 1.1.

VOLCÁN	PAÍS	AÑO	N° DE VÍCTIMAS
Galunggung	Indonesia	1822	3,600
Vesubio	Italia	1631	4,000
Kelut	Indonesia	1919	5,110
Nevado Ruiz	Colombia	1945	1,000
Nevado Ruiz	Colombia	1985	23,000
Asama	Japan	1783	550
Agung	Indonesia	1963	200
Ruapehu	New Zealand	1953	151
Cotopaxi	Ecuador	1877	1,000

**Tabla 1.1.** Resumen de los principales lahares que cobraron el mayor número de víctimas en el mundo Fuente: Tomado de Gudmundsson, M., 2015.

En Sudamérica una de las tragedias más grandes registradas ocurrió en la ciudad de Armero-Colombia, el 13 de noviembre de 1985 una pequeña erupción del Nevado del Ruiz origino la ocurrencia de lahares; el cual provocó la muerte de al menos 23,000 habitantes. (Edward et al., 2004)



**Fotografía 1.6.** Ciudad de Armero, 1985. (Fotografía tomado de J. Janda, USGS).

Los días 13, 16, 26 y 27 de enero del 2017 en la ciudad de Arequipa se generaron lahares debido a fuertes precipitaciones que se emplazaron en los distritos de Cayma y Uchumayo canalizándose en la quebrada Chullo y en la variante Uchumayo. Estos lahares en la quebrada Chullo, afectaron a más de 1000 personas, 300 viviendas, puentes y vías de comunicación (Arapa, 2018), mientras que en el Variante Uchumayo tres personas que se desplazaban en dos camionetas fallecieron el 27 de enero a la altura de los kilómetros 11, 12 y 13 (Fotografía 1.7; Fuente: El Búho, 2018).



**Fotografía: 1.7.** Lahares que se produjieron en la variante Uchumayo, 2017. (Arequipa).

Otro evento que generó grandes pérdidas para Arequipa se dio el 15 de febrero del 2018, en la quebrada Añashuayco (distrito de Cerro Colorado). Al igual que el año 2017 debido a fuertes precipitaciones donde se generaron lahares (flujo de lodo) (Fotografía 1.8), que afectaron las vías de comunicación, dejando una persona fallecida y una herida donde se trasladaban en taxi. A lo largo de la quebrada se observaron daños en las viviendas y vías de comunicación (Fuente: RRP noticias, 2018).



**Fotografía: 1.8.** Vista de la quebrada Añashuayco, en febrero 2018. a) Vista de los lahares que afectaron las vías de comunicación en la quebrada Añashuayco – distrito de Cerro Colorado, b), Vista del caudal del lahar cerca de las Canteras de Añashuayco- distrito Cerro Colorado.

### 1.3.5 Clasificación de los lahares

#### Lahares primarios

Se denominan lahares primarios a aquellos que están asociados directamente a una erupción volcánica. Pueden originarse por el emplazamiento de materiales piroclásticos (rocas calientes) sobre un casquete glaciar o cuerpo de nieve cercano al cráter (Nevado del Ruiz-Colombia, 1985), que provoca la fusión del hielo o nieve, genera la mezcla y transporte de los materiales (Pierson et al., 1990). También, puede ser un detonante las intensas precipitaciones, acaecidas durante una erupción volcánica, que remueven los productos eruptivos acumulados en los flancos del volcán, formando torrentes de lodo que bajan por las pendientes del cono volcánico arrastrando todo a su paso (Vallance e Iverson, 2015).

#### Lahares secundarios

Los Lahares secundarios están asociados a lluvias intensas. El material volcánico no consolidado depositado por erupciones anteriores puede ser fácilmente removidos por las lluvias, son de menor magnitud en comparación con los lahares primarios sin embargo son los fenómenos más frecuentes durante periodos de lluvia. Pueden aumentar en tamaño y frecuencia incluso semanas y meses después de una erupción por lo que es

difícil de predecir (Vallance e Iverson, 2015). Como es el caso del volcán Ubinas en 2016, durante el mes de febrero de 2016, las autoridades y pobladores del valle de Ubinas reportaron el emplazamiento de lahares en los ríos Volcanmayo, Para y Anascapa. Estos lahares afectaron terrenos de cultivo, vías de acceso y canales de irrigación (Mariño, et al., 2016).

### **1.3.6 características de los depósitos de lahares**

Los depósitos de lahares están formados por flujos hiperconcentrados y de escombros, las cuales se clasifican según el porcentaje de agua y sedimento que contienen los depósitos.

#### **Flujo de escombros**

Es un flujo rico en sedimentos. Son mal clasificados, contienen desde arcilla hasta grandes bloques de tamaños métricos. Este puede ser monolítico, pero comúnmente son heterolítico con partículas sub angulares a angulares. Exhiben vesículas en la matriz, que resultan del atrapamiento de burbujas en el avance del flujo, son extremadamente compactos (Vallance e Iverson, 2015).



**Fotografía 1.9.** Depósito de flujo de escombros.

#### **Flujo hiperconcentrado**

Tienen una característica intermedia entre flujos de escombros y depósitos aluviales. Pueden ser masivos, pero comúnmente presentan una estratificación débil, definido por capas horizontales finas. El rango de las partículas va desde los limos hasta el tamaño de las arenas, teniendo ocasionalmente gravillas, cantos rodados o roca (Vallance e Iverson, 2015).



**Fotografía 1.10.** Depósito de flujo hiperconcentrado.

### **1.3.7 Factores principales que condicionan la formación de lahares**

Existen tres condiciones imprescindibles para que se generen lahares en un volcán: primero, una topografía con una pendiente lo suficiente inclinada como para permitir el desplazamiento inicial del flujo lahario, segundo la existencia de material no consolidado susceptible de ser removido, y el tercero un aporte del agua (Vallance, 2000).

### **1.4 Planteamiento del problema**

El complejo volcánico Chachani forma parte de un grupo de volcanes potencialmente activos localizados en la cordillera occidental de los Andes del sur del Perú (Francis y de Silva, 1991), el cual se encuentra a 14 km de los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura.

El crecimiento de la población en el sur del complejo volcánico Chachani (Distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura), en los últimos años se da de manera muy acelerada, lo más lamentable es que, se ha realizado de una manera desordenada sin planificación e incluso llegando a cerrar las quebradas principales que descienden del complejo. Sin considerar los peligros volcánicos, como son los lahares (flujos de lodo); los cuales se presentan debido a las intensas precipitaciones que ocurren en los meses de verano, afectando a las poblaciones localizadas en los márgenes de las quebradas.

A pesar de que todos los años ocurren lahares en las quebradas que descienden del Complejo Volcánico Chachani, este sector de Arequipa aún no cuenta con estudios de peligros volcánicos, ni mapas por ocurrencia de lahares.

### **1.4.1 Formulación del problema**

¿Cuál es el nivel de peligrosidad por la ocurrencia de lahares en el sur del complejo volcánico Chachani”, específicamente en los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura, de la ciudad de Arequipa?

### **1.5 Justificación**

La ciudad de Arequipa es la segunda ciudad más grande del Perú con más de un 1 millón de habitantes (INEI, 2018) que viven a los alrededores del Complejo Volcánico Chachani y del volcán Misti. En los meses de verano, suelen presentarse fuertes precipitaciones pluviales que originan la ocurrencia de lahares, y en algunos casos pueden ocasionar pérdida de vidas humanas y materiales, como es el caso que ocurrió en los distritos de Cerro Colorado y Uchumayo.

Por lo tanto, se realizó un cartografiado geológico a escala 1:10000 y la simulación de los lahares con el software Lahar Z, con la finalidad de obtener un mapa de peligros por ocurrencia de lahares, el cual podría ser utilizado en el ordenamiento territorial y como fuente de información a la población asentada en zonas cercanas al Complejo Volcánico Chachani.

### **1.6 Objetivos**

#### **1.6.1 Objetivo general**

- Evaluar el peligro volcánico por la ocurrencia de lahares (flujos de lodo) en el sur del Complejo Volcánico Chachani

#### **1.6.2 Objetivos específicos**

- Identificar los depósitos volcánicos que afloran al sur del complejo volcánico Chachani, en base a datos de campo e imágenes satelitales.
- Determinar los volúmenes de los lahares, que se generarían por ocurrencia de lahares en el sur del Complejo Volcánico Chachani, en base a datos de campo.
- Evaluar el nivel de peligrosidad por ocurrencia de lahares en base al modelamiento con el software LaharZ.

## 1.7 Hipótesis

- El estudio de la evaluación de peligros por ocurrencia de lahares en el sur del Complejo Volcánico Chachani nos permitirá conocer las zonas que podrían ser afectadas en el caso de ocurrencia de lahares, por precipitaciones intensas.

## 1.8 Variables

### 1.8.1 Variable Independiente.

- Geomorfología
- Geología
- Geología estructural
- Hidrogeología
- Mineralogía

### 1.8.2 Variable Dependiente.

- Evaluación de peligro por ocurrencia de lahares (flujos de lodo) en el Complejo Volcánico Chachani.

## 1.9 Metodología de Investigación

### 1.9.1 Tipo de investigación

Tipo descriptivo y analítico, ya que se pretende describir las características observadas y medibles para luego hacer un análisis de las variables.

### 1.9.2 Metodología de la investigación

**1.9.2.1 Diseño de la investigación:** Observacional y según la cronología de las observaciones es de tipo prospectivo transversal.

**1.9.2.2 Población:** Depósitos de lahares emplazados en las quebradas que descienden del Complejo Volcánico Chachani.

**1.9.2.3 Muestra:** Población asentada sobre los depósitos de lahares recientes; las cuales se encuentran en las riveras de las quebradas que descienden del sur del Complejo Volcánico Chachani.

### 1.10 Metodología de Trabajo

La metodología empleada para elaborar esta tesis consta de 3 partes, las cuales son descritas a continuación:

### **1.10.1 Trabajo en gabinete**

- Recopilación de información bibliográfica sobre: el Complejo Volcánico Chachani, historia eruptiva, entorno geológico, terminología volcánica, esta información ha sido investigado de los artículos científicos, tesis, libros y boletines geológicos del Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET), para realizar el estudio de peligro por ocurrencia de lahares.
- Para el cartografiado geológico se utilizó la base topográfica a escala 1:10000; el cual se obtuvo a partir del DEM de 10 metros de resolución.
- Para el procesamiento de imágenes satelitales, así como también para la digitalización del mapa geológico se utilizó los programas ArcGis 10.1 y Google Earth.
- Se utilizó el cuadrángulo de Arequipa (hoja 33-S) Carta Geológica Nacional, como base para realizar el mapeo geológico de los depósitos de lahares.

### **1.10.2 Trabajo de campo**

El trabajo de campo se dividió en 3 campañas de 20 días cada una, repartidas en los meses de noviembre del 2018, marzo y junio del 2019, las cuales están financiadas por el convenio FONDECYT-INGEMMET.

Este trabajo de campo consistió en lo siguiente:

- Cartografiado geológico de los depósitos de lahares a escala 1:10,000.
- Levantamiento de columnas estratigráficas y perfiles transversales de los depósitos de lahares del sur del Complejo Volcánico Chachani.

### **1.10.3 Trabajo de gabinete**

- Se digitalizaron las columnas estratigráficas y perfiles transversales de las quebradas que descienden del sur del Complejo Volcánico Chachani con el programa CoreDRAW7
- Se realizó la digitalización del mapa geológico a escala 1:10,000
- Se realizó un mapa de peligro con datos de campo y el programa LAHARZ.
- Redacción de la tesis.

## **1.11 Clima**

El clima es un factor importante que influye en la ocurrencia de lahares, ya que las precipitaciones pluviales constituyen una de las fuentes para el transporte de los depósitos no consolidados.

El área de influencia del Complejo volcánico Chachani presenta un clima predominantemente seco en los meses de (mayo-diciembre) y precipitaciones pluviales en los meses de (enero-abril).

Los datos de precipitación mostrada en la tabla 1.3, fueron obtenidos del servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), el cual cuenta con las estaciones que actualmente funcionan (Fig. 1.11).

- La estación Patahuasi-Arequipa se encuentra en el distrito de Yura, ubicado a 18 km al norte del Complejo Volcánico Chachani (N: 8223428.34, E: 241642.26), con una altitud de 4035 msnm. Según los registros de esta estación las precipitaciones intentas se dieron durante los meses de enero, febrero, marzo y abril, alcanzando una precipitación máxima y mínima de 166-15mm /mes, respectivamente.
- La estación Pampa de Arrieros se encuentra, en el distrito de Yura ubicado a 16 km al noroeste del Complejo Volcánico Chachani (N: 8222357; E: 223017.38) con una altitud de 3715 msnm. Esta estación registró datos de precipitación, de los meses de enero, febrero, marzo y abril, con precipitación máxima y mínima de 201-0.2 mm/mes, respectivamente. Cabe señalar que los datos de esta estación se utilizaran para determinar el volumen de lahar.
- La estación Frayle, se encuentra en el distrito de San Juan de Tarucani, a 30 km al noreste del volcán Chachani (N: 82126994.59; E: 265917.1), con una altitud 4131 msnm. Esta estación registró datos de precipitación de los meses de enero, febrero, marzo y abril, con precipitación máxima y mínima de 137.9 -15.3 mm/mes, respectivamente.
- La estación la Pampilla, se encuentra en la ciudad de Arequipa, a 23 km al sureste del volcán Chachani (N: 8184581.35; E: 230500.90), con una altitud 2365 msnm. Esta estación registró datos de precipitación de los meses de enero, febrero, marzo y abril, con precipitación máxima y mínima de 18.79 y 0.04 mm/mes, respectivamente.

A continuación, se muestra en la tabla 1.2, las precipitaciones presentadas en los meses de enero, febrero, marzo y abril. Con sus respectivas estaciones Hidrometeorológicas

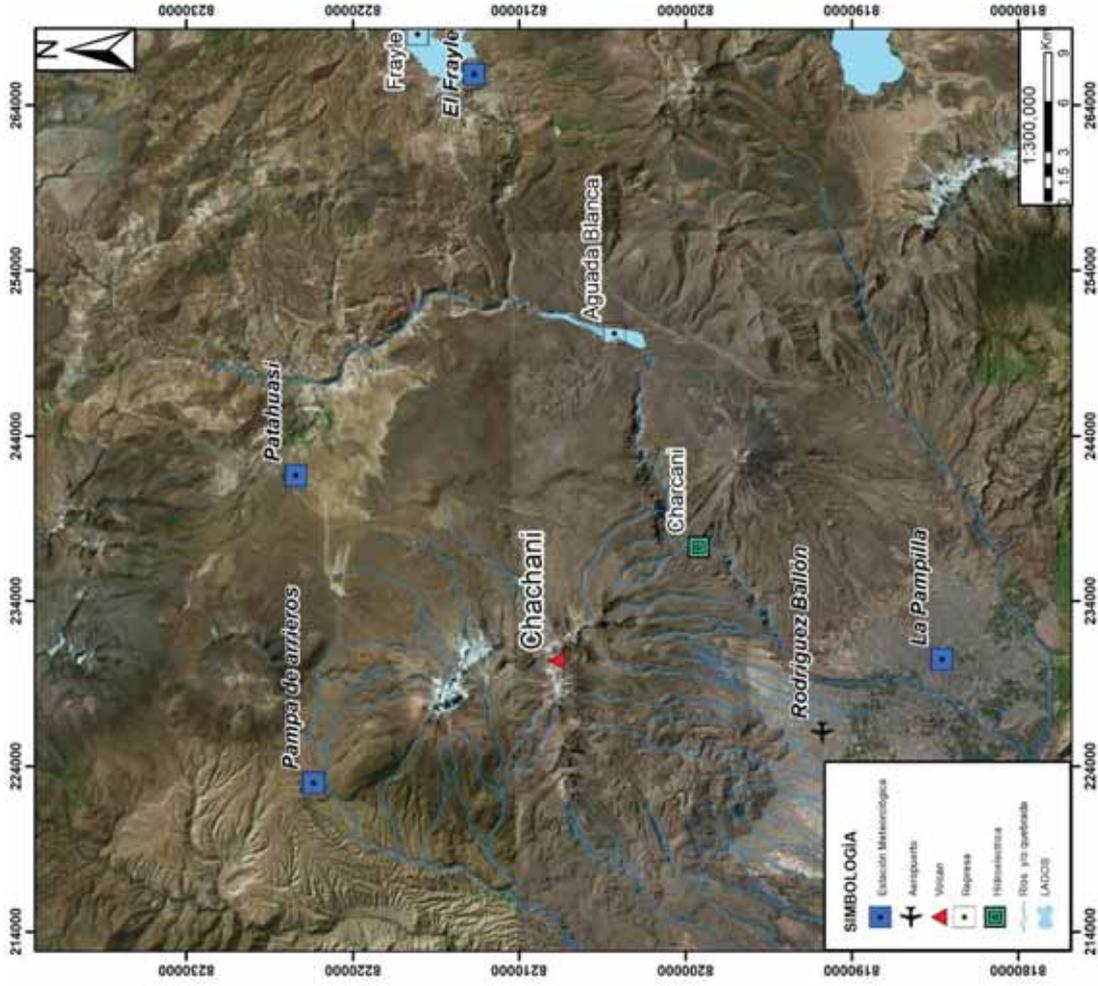


Figura 1. 11. Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas (SENAMHI, 2019)

ESTACIÓN	DISTRITO	AÑO	PRECIPITACIÓN (mm)			
			ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL
PATAHUASI AREQUIPA	YURA	2014	110	13.8	30.1	20.2
		2015	104.7	117.2	80.2	20.3
		2016	15	140.3	26.7	25.6
		2017	166	64.1	92.9	9.9
		2018	116.5	35.7	68.1	16.8
PAMPA DE ARRIEROS	YURA	2014	92.2	8.1	19.4	9.9
		2015	44	126.7	123.2	1
		2016	0	112.4	5.8	35
		2017	201.6	87	98.8	0.2
		2018	67.6	31.7	40.8	11.7
EL FRAYLE	SAN JUAN DE TARUCANI	2019	116.4	136.7	44.4	0
		2015	0	66.4	90.8	0
		2016	24	137.9	18	54.8
		2018	78	44.8	77.7	16.6
		2019	110.4	140.7	46.1	15.3
LA PAMPILLA	AREQUIPA	1997	31.9	57.5	46.3	0
		1998	35.4	1.9	0	1.1
		1999	4.5	68.1	0	0
		2000	84.7	19.6	48.9	0.3
		2001	12.4	95.5	71.6	1.8
		2002	8.8	49.5	29.7	0.8
		2003	10.8	1.8	4.7	0
		2004	23.5	22.2	0.4	0
		2005	6.6	9.2	6.8	0
		2006	17	34.6	33.9	0
		2007	10.7	27.9	0	2.2
		2008	106.4	23.7	2.4	0
		2009	4.9	35.6	13.4	1.4
		2010	1.9	12.1	1.2	0.4
		2011	39.7	74.4	1	5.3
2013	32.8	190.2	26.7	0		
2014	33.3	0	2	0.2		
2015	13.7	103.4	52.6	0		
2016	0	52.8	1	8.8		
2017	103.3	50.5	43.1	0		
2018	12.8	3	5.8	0		
2019	28.1	43.1	9.5	0		

Tabla 1.2 Datos de las precipitaciones. SENAMHI, 2019.

## 1.12 Población

Un porcentaje importante de la población de Arequipa se encuentra localizada al sur del Complejo Volcánico Chachani, y están asentados en los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura.

En la tabla 1.3. Se muestra los datos de la población urbana situada en los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura, el cual asciende a un total de 321,874 habitantes y la población rural a un total de 711 personas, quienes en muchos casos viven en el cauce de las quebradas y por lo tanto en épocas de lluvias se ven afectadas. Los datos fueron obtenidos a partir de los Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas (INEI, 2018).

DISTRITOS	Total	Población		Total	Urbana		Total	Rural	
		Hombres	Mujeres		Hombres	Mujeres		Hombres	Mujeres
Cayma	91,935	43,886	48,049	91,922	43,877	48,045	13	9	4
Cerro Colorado	197,954	96,135	101,819	197,731	96,036	101,695	223	99	124
Yura	33,346	16,497	16,849	32,871	16,221	16,650	475	276	199

**Tabla 1.3.** Población total censada en el censo nacional del 2017: XII de Población, VII de vivienda y III de comunidades Indígenas (INEI, 2018), en área urbana y rural.

En las tablas 1.4, 1.5 y 1.6 Se muestran la cantidad de personas por distrito que construyeron sus viviendas por el tipo de material. Cabe mencionar que en los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura, aún existen viviendas de material poco resistente. según los Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de vivienda y III de comunidades Indígenas (INEI, 2018).

En la tabla 1.4. se muestra el número de viviendas y el tipo de material que utilizaron para la construcción de sus paredes en los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura

Distrito	Total	Material de construcción predominante en las paredes exteriores de la vivienda								
		Cemento	Ladrillo	Adobe	Tapia	Quincha (Caña con barro)	Piedra con barro	Madera	Triplay	Otro material
<b>Cayma</b>										
Viviendas particulares	24581	21674	1476	1134	1	6	23	168	99	
Ocupantes presentes	90042	80339	5038	3727	6	15	50	554	304	
<b>Cerro Colorado</b>										
Viviendas particulares	58152	48464	5065	3515	4	12	126	599	366	1
Ocupantes presentes	195207	167153	14567	10319	12	34	297	1730	1730	1
<b>Yura</b>										
Viviendas particulares	12484	10313	965	865	3	2	78	145	113	
Ocupantes presentes	32874	27863	2326	1915	5	8	154	341	262	

**Tabla 1.4.** Material de construcción predominante en las paredes de las viviendas del Censo Nacional 2017: XII de Población, VII de vivienda y III de comunidades Indígenas (INEI, 2018).

En la tabla 1.5. Muestra el número de viviendas y material que utilizaron para la construcción de sus techos de sus viviendas en los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura.

Distrito	Total	Material de construcción predominante en los techos de la vivienda							
		Concreto armado	Madera	Tejas	Calamina	Estera con torta de barro	Tripla/carrizo	Paja/hoja de palmera	otro
<b>Cayma</b>									
Viviendas particulares	24581	19114	94	84	5162	88	34	5	
Ocupantes presentes	900042	74238	326	326	14668	328	119	19	
<b>Cerro Colorado</b>									
Viviendas particulares	58152	33039	278	232	24267	194	123	18	1
Ocupantes presentes	195207	128140	926	774	67307	645	361	53	1
<b>Yura</b>									
Viviendas particulares	12484	4344	65	31	7970	31	28	15	
Ocupantes presentes	32874	15038	138	71	17482	76	48	21	

**Tabla 1.5.** Material predominante en los techos de las viviendas. Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas (INEI, 2018).

En la tabla N°1.6. Muestra el número de viviendas y material que utilizaron para la construcción de sus pisos en los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura.

Distrito	Total	Material de construcción predominante en los pisos de la vivienda						
		Parquet	Láminas asfáltica	Losetas	Madera	Cemento	Tierra	Otro material
<b>Cayma</b>								
Viviendas particulares	24581	1881	1328	5089	121	14675	1487	
Ocupantes presentes	90042	6300	4661	19652	373	54984	4072	
<b>Cerro Colorado</b>								
Viviendas particulares	58152	1405	2412	8830	123	38275	7105	4
Ocupantes presentes	195207	5278	8581	35688	431	127076	18139	14
<b>Yura</b>								
Viviendas particulares	12484	29	67	475	27	9623	2264	
Ocupantes presentes	32874	75	200	1772	75	25894	4858	

**Tabla 1.6.** Tipo de material empleados en la construcción de los pisos de las viviendas, basado en información del Censo Nacional 2017: XII de Población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas (INEI, 2018).

## **CAPÍTULO II: GEOMORFOLOGÍA**

### **2.1 Geoformas del Complejo Volcánico Chachani**

En el Complejo Volcánico Chachani se han identificado geoformas de origen glaciar como: circos glaciares, morrenas del Pleistoceno y Holoceno. También se observan geoformas de origen volcánico como: cráteres, domos de lava, flujos de lavas, estratovolcanes, superficie volcanoclástica, ladera de acumulación, planicie ignimbrítica; y otras geoformas como: cañón del río Chili, llanura de inundación, cono aluvial y planicie aluvial (Fig. 2.1). A continuación, se describe cada una de las geoformas.

#### **2.1.1 Geoformas de origen glaciar**

Según los estudios realizados por Zech et al. (2009), el último avance glaciar máximo (por sus siglas en inglés, LGM) cubrió los andes centrales de Perú y Bolivia de hielo y nieve entre 10 y 27 ka, que corresponde al Pleistoceno superior - Holoceno.

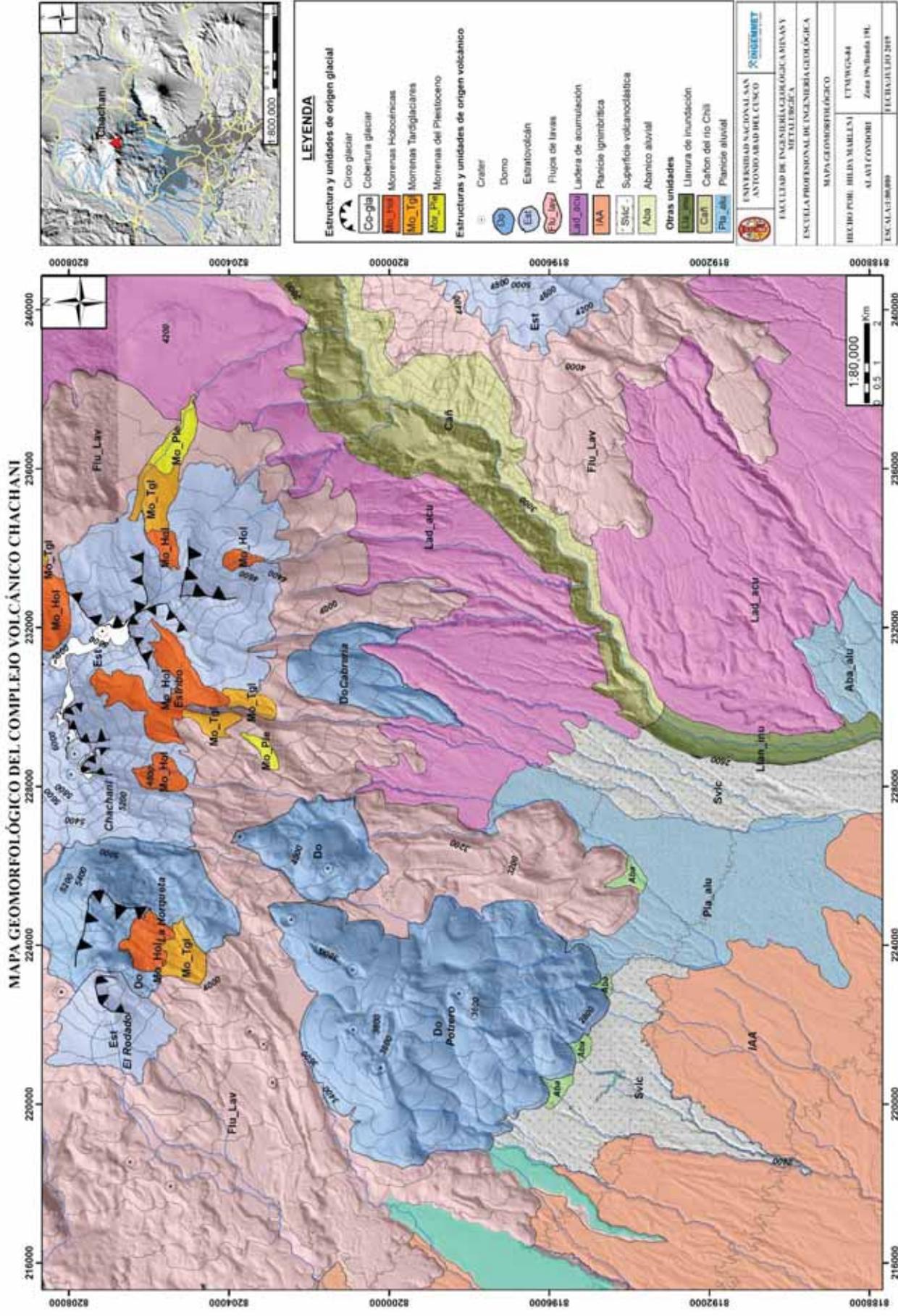
En el área del complejo volcánico Chachani se observan unidades y depósitos afectados por glaciares. Actualmente, el complejo volcánico Chachani no cuenta con un casquete glaciar, únicamente posee una delgada cobertura glaciar, el cual se realiza en los meses de verano (diciembre-abril).

A continuación, se muestran las geoformas producidas por la actividad glaciar.

##### **2.1.1.1 Circos glaciares**

Los circos glaciares en el Complejo Volcánico Chachani corresponden a estructuras semicirculares, cóncavas y ovaladas, las cuales son originadas por la erosión glaciar de las secuencias volcánicas. Estos circos glaciares generalmente se emplazaron en las zonas de cambio de pendiente.

En el área de la zona de estudio, se identificaron circos glaciares en los estratovolcanes Estribo (Fotografía 2.2.), Chachani y El Rodado y en domo La Horqueta. Algunos de estos edificios como “El Estribo” presentan alteraciones hidrotermales, de color amarillo a anaranjado.



**Figura 2.1.** Mapa geomorfológico del sector sur del Complejo Volcánico Chachani. Fuente: Elaboración propia



**Fotografía 2.2.** Circo glaciar al sur del estratovolcán El Estribo.

#### **2.1.1.2 Morrenas del Pleistoceno (Mo\_Ple)**

Se denomina morrenas del Pleistoceno al grupo de morrenas antiguas, las cuales presentan formas onduladas y suavizadas. Estas morrenas se diferencian con respecto a las demás morrenas por la posición estratigráfica y por presentar una altitud más baja que las demás.

En el área de la zona de estudio estas morrenas del pleistoceno afloran al pie del edificio El Estribo (Fig. 2.1).

#### **2.1.1.3 Morrenas Tardiglaciares (Mo\_Tgl)**

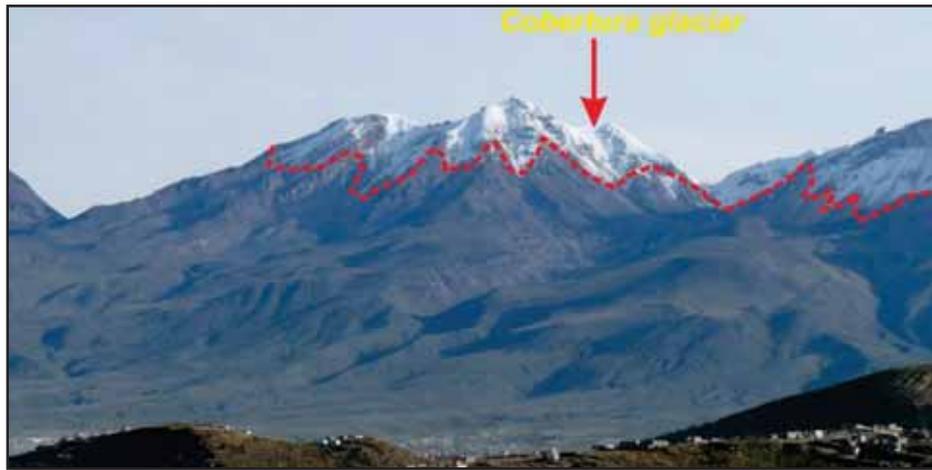
Se le denomina morrenas tardiglaciares al grupo de morrenas que se encuentran estratigráficamente justo por encima de las morrenas del Pleistoceno. Estas morrenas se caracterizan por presentarse poco onduladas y suavizadas; y sus bordes laterales se encuentran marcados. En algunos flancos se presenta como morrenas frontales y laterales. Estas morrenas se encuentran al pie de los edificios Chachani, Estribo y La Horqueta (Fig. 2.1).

#### **2.1.1.4 Morrenas del Holoceno (Mo\_Hol)**

Son pequeñas morrenas que se ubican por encima de los 4500 msnm, presentando geoformas más pronunciadas que las anteriores debido a su menor edad de emplazamiento. Estas morrenas se encuentran casi al pie de los edificios Chachani, Estribo y La Horqueta (Fig. 2.1).

### 2.1.1.5 Cobertura Glaciar

Corresponde a los sectores más elevados del Complejo Volcánico Chachani, incrementándose de espesor y volumen, solo en épocas de lluvia (diciembre-abril). Esta cobertura presenta pendientes muy escarpadas y empinadas, el glaciar lo encontramos en los estratovolcanes Estribo y Chachani, con un área aproximada de 5.845, 709 m<sup>2</sup> (Fotografía 2.3).



Fotografía 2.3. Cobertura glaciar del volcán Chachani.

## 2.1.2 Geformas de origen volcánico

### 2.1.2.1 Cráter

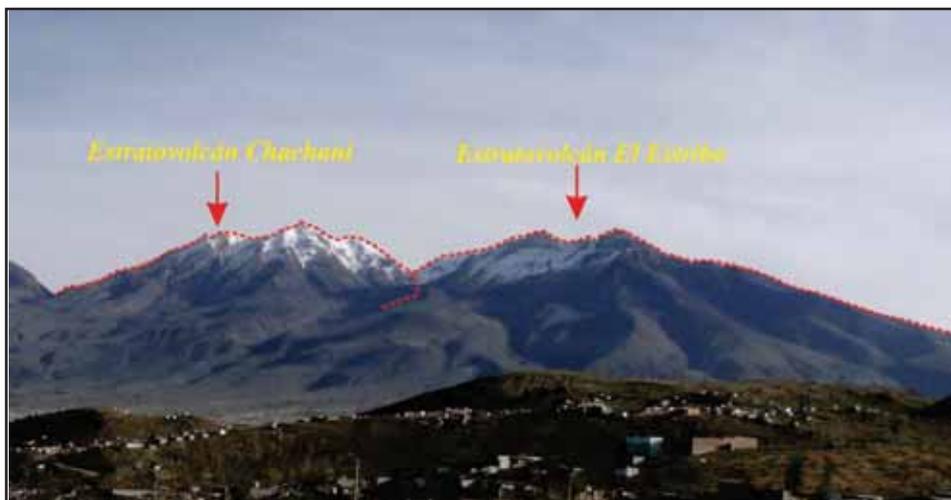
El complejo volcánico presenta 21 cráteres erosionados (Fotografía. 2.1), que actualmente no están activos ya que presentaron actividad volcánica anterior al Holoceno. Estos cráteres son de forma semicircular y se encuentran en los estratovolcanes Estribo y Chachani, en los domos Potrero (Fotografía. 2.4) y en los flujos de lava.



**Fotografía 2.4.** Cráter de los domos Potrero. Fuente: Google Earth

### 2.1.2.2 Estratovolcán (Est)

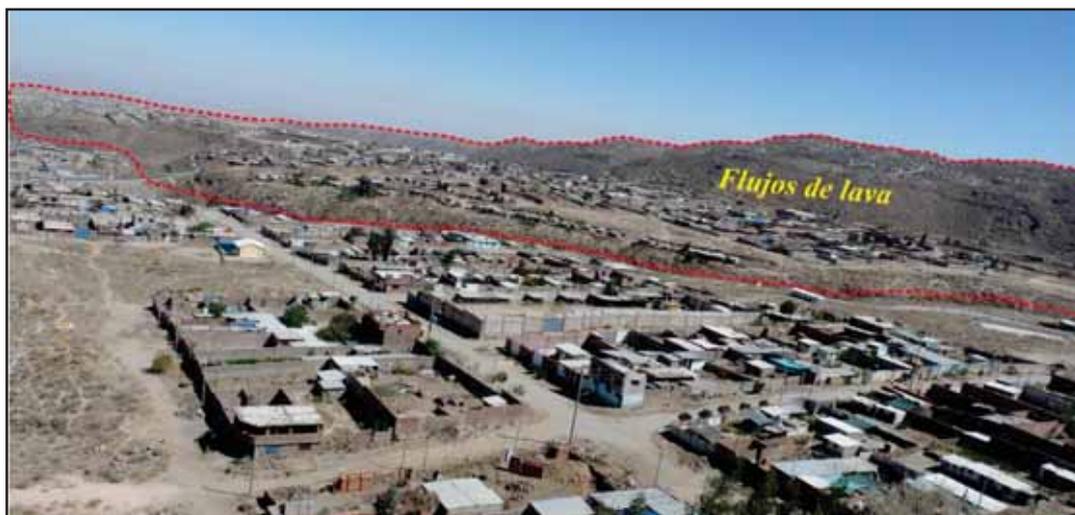
Un estratovolcán a un volcán compuesto, muchas veces cónico de gran altura, formado por capas de lava solidificada (producidas en épocas alternantes de actividad volcánica), flujos piroclásticos y depósitos volcanoclásticos. En el área de estudio, el complejo volcánico Chachani está constituido por varios estratovolcanes, conformados por un empinamiento de flujos de lavas y depósitos de flujos piroclásticos. Los estratovolcanes son: Estribo, Chachani (Fotografía 2.5) y El Rodado.



**Fotografía 2.5.** Estratovolcanes Estribo y Chachani del Complejo Volcánico Chachani.

### 2.1.2.3 Flujos de lava (Flu\_Lav)

En el complejo volcánico Chachani se distinguen varias secuencias de flujos de lava, como: flujos de lava de los domos Potreros y Cabrerías, flujos de lava de los volcánes Chachani, Estribo, etc. En el sector sur, suroeste (Fotografía 2.6) y sureste, afloran flujos de lava que presentan estructuras de enfriamiento y desplazamiento como son las cuerdas y leves.



**Fotografía 2.6.** Flujos de lava ubicada en el distrito de Yura, los cuales se encuentra en la base del domo Potrero.

#### 2.1.2.4 Domos

En el área de estudio se observa domos, de forma asimétrica y circular. Estos domos se distinguen por su topografía las cuales presentan pendientes moderadas a altas. En el área de trabajo afloran los domos Potrero, La Horqueta y Cabrería (Fotografía 2.7).



**Fotografía 2.7.** Domo La Horqueta y Cabrerías.

#### 2.1.2.5 Superficie volcanoclástica (Svlc)

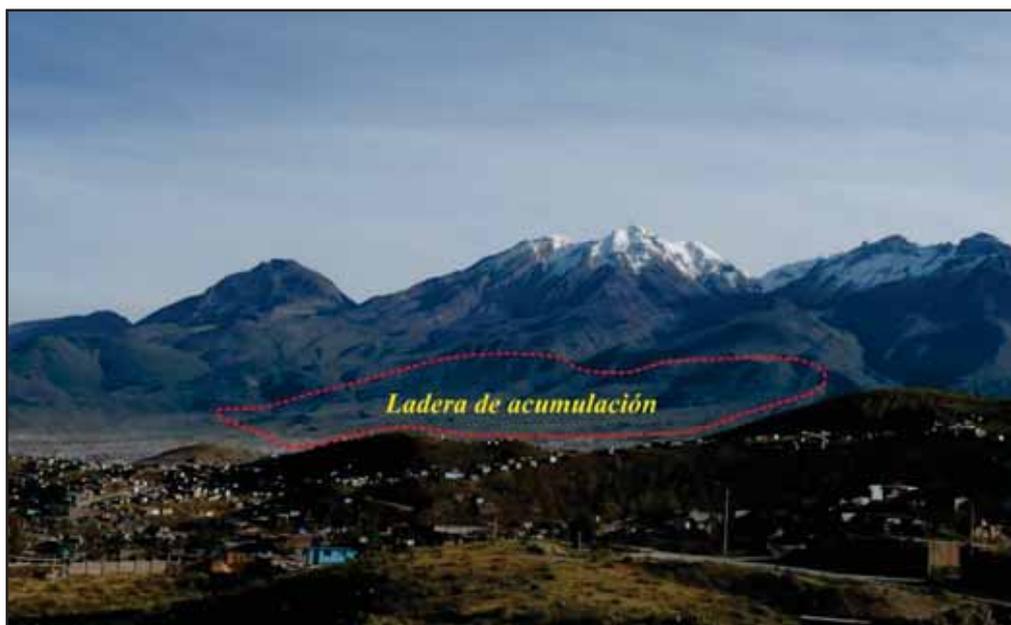
Ocupa un área relativamente plana (con pendientes menores a  $12^\circ$ ) y extensa que se ubica hacia el sur y sureste del complejo volcánico Chachani. Está conformada por secuencia de depósitos de flujo de bloques y cenizas provenientes de los domos Potrero (Fotografía 2.8) y Cabrerías. En algunos sectores se observan cubiertos por secuencias de caídas de téfras, provenientes del volcán Chachani y Misti. Esta zona está cortada por quebradas que tienen menos de 15 m de profundidad.



**Fotografía 2.8.** Superficie volcánoclastica, que afloran en el flanco sur del Complejo Volcánico Chachani (Yura).

#### **2.1.2.6 Ladera de Acumulación (Lad\_acu)**

La ladera de acumulación se extiende al pie del flanco sur de los estratovolcanes Chachani y Estribo (Fotografías 2.1 y 2.9), con pendiente moderadas de  $10^\circ$  y  $20^\circ$  de inclinación, surcada por quebradas que tienen entre 15 a 20 m de profundidad, y entre 10 a 40 m de ancho. Esta ladera está compuesta principalmente por flujos piroclásticos de bloques y cenizas de composición andesítica, que proviene del domo Cabrería y por flujos de lava del volcán Chachani. Estos flujos se encuentran intercalado con depósitos volcánoclasticos y en algunos sectores cubiertos por estos depósitos.



**Fotografía 2.9.** Ladera de acumulación, en el flanco sureste del Complejo Volcánico Chachani.

### 2.1.2.7 Planicie Ignimbrítica del Aeropuerto de Arequipa (I.A.A)

La planicie ignimbrítica se ubica al sur del complejo volcánico Chachani (Fotografía 2.10). Esta zona semi plana se extiende desde el valle del río Chili hasta el cañón del río Yura. La zona tiene pendientes menores a  $15^\circ$  y está cortada por quebradas que miden de 20 a 50 m de profundas. Está conformada por una secuencia de ignimbritas cubiertas por una delgada capa de depósitos volcanoclásticos y flujos de lava.

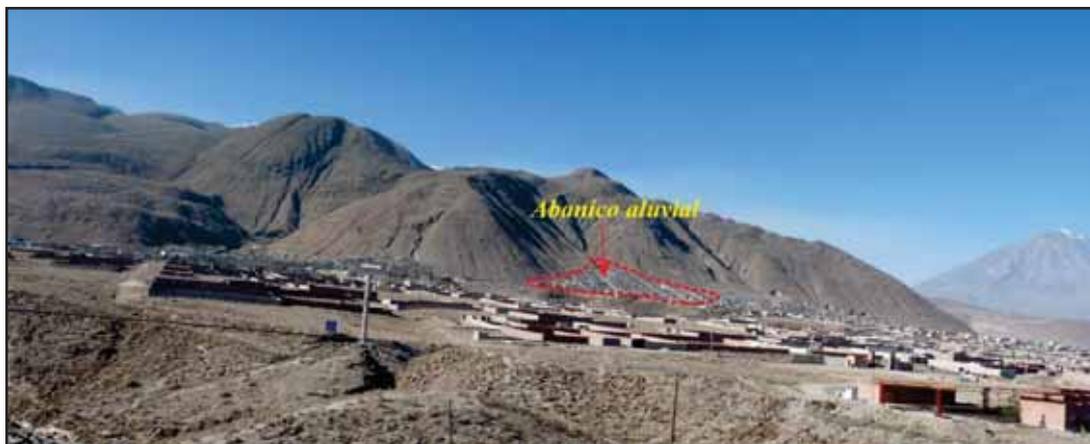


**Fotografía 2.10.** Planicie ignimbrítica visible en el sector sur del Complejo Volcánico Chachani.

### 2.1.3 Otras Unidades

#### 2.1.3.1 Abanico Aluvial (Aba)

Corresponde a superficies inclinadas ( $10^\circ$  -  $20^\circ$ ), localizados al pie de las estribaciones o domos de lava visibles en el sector de Yura y Cerro Colorado. Tienen una disposición generalmente de forma de abanico y focalizada en la zona apical, constituida por una acumulación de sedimentos acarreados en avenidas pasadas. La pendiente de los abanicos aluviales varía entre  $20^\circ$ - $25^\circ$  en la zona de cabecera y en la zona del pie presenta pendientes entre  $5^\circ$ - $8^\circ$ . Sobre estos depósitos se encuentran asentadas viviendas de los distritos de Yura y Cerro Colorado (Fotografía 2.11).



**Fotografía 2.11.** Abanico aluvial que aflora en la base de los domos Potrero

### 2.1.3.2 Cañón del río Chili (Cañ)

El cañón del río Chili nace de la represa el Frayle, ubicándose entre el volcán Misti y el Complejo Volcánico Chachani. Las paredes del cañón se caracterizan por presentar pendientes muy fuertes  $35^{\circ}$  a  $75^{\circ}$  e incluso verticales. Posee una longitud cercana a 20 km, con una profundidad aproximada de 150 a 2600 m, extendiéndose a lo largo de 18 km desde la represa el Frayle hasta la altura de la planta de tratamiento de agua potable “Miguel de la Cuba Ibarra”, en el distrito de Cayma, con una dirección NE-SW (Fotografía 2.12).



**Fotografía 2.12.** Vista del cañón del río Chili el cual atraviesa por medio de los volcanes Chachani y Misti.

### 2.1.3.3 Llanura de Inundación (Llan\_inu)

La llanura de inundación se inicia al final del cañón del río Chili, en el sector de Chapi Chico, y se extiende a lo largo del valle pasando por la ciudad de Arequipa hasta el distrito de Uchumayo. En el sector de Chilina (Fig. 2.13) corresponde a un valle angosto, orientado en dirección N-S que tiene ~500 m de ancho y ~200 m de profundidad. En la parte media, ubicada en la zona urbana de Arequipa, es un valle un poco más amplio y de menos de 25 m de profundidad, que se extiende en dirección NNO-SSE. En la parte baja (distritos de Tiabaya y Uchumayo), la llanura tiene una orientación E-O y vuelve a ser angosto (200 a 300 m de ancho) y más profundo.



**Fotografía 2.13.** Llanura de inundación en el sector del puente Chilina.

### **Planicie aluvial (Pla\_al)**

Corresponde a una geoforma de aspecto semi-plano a plano, con pendientes dominantes entre 0 a 4 %. Está conformado por la acumulación de sedimentos traídos por los ríos y quebradas en periodos de lluvia. En la zona de estudio la planicie aluvial se distingue en el flanco sureste del CVC. Sobre dicha planicie se encuentra ubicado el aeropuerto de Arequipa (Fotografía 2.14).



**Fotografía 2.14.** La planicie aluvial aflora en el sector sureste del Complejo Volcánico Chachani.

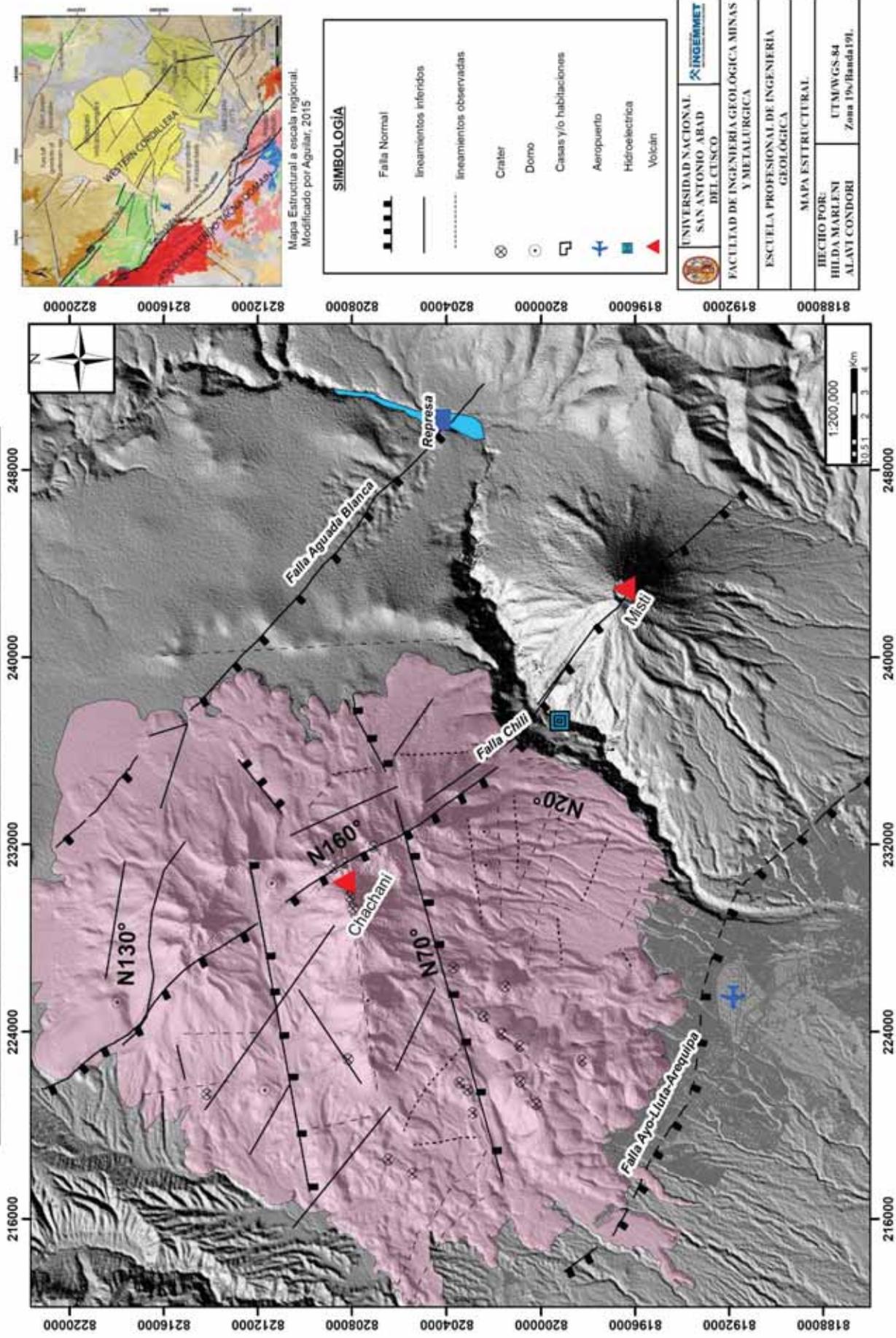
## CAPÍTULO III: GEOLOGÍA

### 3.1 Contexto Estructural Regional del área del Arequipa

Según los estudios realizados por Carlotto et al. (2009), a escala regional, el área de Arequipa reúne dos grandes unidades morfo-tectónicas llamadas zona Atico-Mollendo-Tacna y la cordillera Occidental, que están separados por el sistema de fallas Cincha-Lluta-Incapuquio. Estudios recientes efectuados por Benavente et al. (2018), en el área y alrededor del complejo volcánico Chachani, identificaron tres fallas: Aguada Blanca, Chili, Ayo-Lluta-Arequipa. Aguilar (2015) realizó el estudio del complejo volcánico Chachani y determinó cuatro sistemas de fallas N 130°, N 160°, N 20° y N 70°.

En el contexto estructural el complejo volcánico Chachani presenta 4 lineamientos: 1) el lineamiento que cruza la falla Aguada Blanca, 2) lineamientos que cortan el volcán Rodado, domo Horqueta y al volcán Chachani con direcciones paralelas a la falla N°70, 3) lineamientos que cortan los cráteres de los domos Potrero y 4) lineamientos que se observan en el flanco suroeste del complejo paralelos al lineamiento que cruza por el centro de emisión de los domos del Potrero (Fig. 3.1). A continuación, se describen las fallas que cruzan el área del complejo volcánico Chachani estudiadas por Benavente et al. (2018).

**MAPA ESTRUCTURAL DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CHACHANI**



**Figura 3.1.** Mapa estructural del Complejo Volcánico Chachani, tomado de Aguilar, 2015; Benavente et al. 2018

### 3.1.1 Falla Aguada Blanca

Esta falla se encuentra a 7 km al NE del CVC, se trata de una falla normal siniestral (Fotografía. 3.2). Presenta una dirección NO-SE, buzamiento SO y una longitud de 35 km. Las escarpas de fallas tienen hasta 4 m de altura. Además, en los alrededores de la represa Aguada Blanca afloran depósitos aluviales que han sido afectados por esta falla. Los depósitos lacustres tienen aproximadamente 20 m de espesor, lo que sugiere un tiempo de represamiento de este río, posiblemente asociado a la reactivación de la falla.



**Fotografía 3.2.** Movimiento de tipo normal asociado a la reactivación de la falla Aguada Blanca, en el sector de la represa Aguada Blanca (Benavente et al. 2018).

### 3.1.2 Falla Chili

Esta falla fue interpretada por Thouret et al. (2001), como una falla de dirección N120° que afecta al volcán Misti y fue relacionada con la cicatriz de colapso del flanco noreste de dicho volcán. En la zona del complejo volcánico Chachani, las estructuras interpretadas por Aguilar (2015), tienen direcciones N20°, N160° y N°130. Estudios recientes efectuados por Benavente et al. (2018), determinaron una falla de tipo normal denominándolo falla Chili (Fotografía 3.3), visible en el sector del cañón del río Chili. Esta falla presenta una dirección predominante NO-SE, con buzamiento oeste y presenta una extensión de 52 km.



**Fotografía 3.3.** Falla normal con desplazamiento de 2 m, en el flanco oeste del volcán Chachani. (Benavente et al. 2018).

### 3.1.3 Falla Ayo-Lluta-Arequipa

Esta falla se encuentra a 8 km al sur del CVC. Según los estudios realizados por Benavente et al. (2018) esta falla se extiende desde el nevado Coropuna hasta el Complejo Volcánico Pichu Pichu. Tienen una dirección NO-SE, un buzamiento SO y una extensión de 150 km. En el flanco suroeste de los volcanes Chachani, Misti y Pichu Pichu, se observaron evidencias de movimientos de tipo normal (Fotografía 3.4), denominándolo a esta falla como “Falla Ayo-Lluta-Arequipa”.



**Fotografía 3.4.** Falla normal que afecta las diatomitas del paleogeno en el sector cerro Alto Jesús-la Calera, ubicado al norte de Chiguata (Benavente et al. 2018).

## **3.2 Contexto Estratigráfico Regional**

A escala regional, en los alrededores del complejo volcánico Chachani, afloran rocas del Jurásico inferior, Jurásico medio a superior, así como rocas volcánicas del Neógeno al cuaternario, sobre estos depósitos se construyó el complejo volcánico Chachani.

### **3.2.1 Formación Chocolate (Jurásico Superior)**

Este nombre fue dado por Jenks (1948) y proviene de la cantera Chocolate, localizado en el distrito de Yura, en la margen derecha del río Yura. Esta formación aflora a 12 km al SO del Complejo Volcánico Chachani (Fig. 3.5), la cual está constituido por lavas andesíticas y dacíticas, de textura afanítica.

### **3.2.1 Grupo Yura (Jurásico superior- Cretácico inferior)**

Este grupo aflora en la margen derecha del río Yura, donde se distingue una intercalación de niveles de areniscas, lutitas, cuarcitas y niveles de calizas, descritos por Jenks (1948). Posteriormente fue dividido por Benavides (1962) en las formaciones Puente, Cachios, Labra, Gramadal y Hualhuani. En la zona de estudio afloran rocas pertenecientes a la formación Puente, Cachíos y Hualhuani (Fig. 3.5).

#### **3.2.1.1 Formación Puente (Jurásico medio)**

Esta formación aflora a 10 km al SW del complejo volcánico Chachani (Fig. 3.5). En el sector de Socosani, esta formación se caracteriza por la predominancia de areniscas masivas de grano fino.

#### **3.2.1.2 Formación Cachios (Jurásico medio)**

Esta formación aflora a 13 km al SW del complejo volcánico Chachani, en la margen derecha del río Yura (Fig. 3.5), en la quebrada del mismo nombre. Esta formación presenta capas medianas de areniscas cuarzosas rosadas a verdes, con intercalación de limoarcillitas (Acosta et al., 2010).



### **3.2.1.3 Formación Hualhuani (Cretácico inferior)**

Esta formación aflora a 12 km al oeste del complejo volcánico Chachani, en la margen derecha del río Yura (Fig. 3.5). El cual está compuesta por areniscas cuarzosas de grano fino a medio de coloración blanquecina.

### **3.2.2 Grupo Tacaza (Oligoceno Medio - Mioceno Inferior)**

Según las dataciones realizadas determinaron una edad comprendida entre 30 y 24 Ma (Mamani et al., 2009), por lo cual se considera que el grupo Tacaza está comprendido entre el Oligoceno Medio - Mioceno Inferior.

La unidad inferior, constituida por brechas, lavas y conglomerados aflora a 20 km al NO del complejo volcánico Chachani (Fig. 3.5), mientras que la unidad superior, compuesta principalmente por lahares, ignimbritas y rocas volcanoclásticas aflora a 22 km al NO del complejo volcánico Chachani.

### **3.2.3 Grupo Barroso**

Rocas volcánicas pertenecientes al grupo Barroso afloran en la Cordillera Occidental. Estas fueron emplazadas durante el Mioceno Superior – Pleistoceno y está dividido en dos unidades (Mamani et al. 2009): Barroso Inferior, el cual ha sido datado entre 10 a 3 Ma; y Barroso Superior comprendido entre 3 a 1 Ma.

En el área de estudio el Barroso Inferior (10-3 Ma) está constituido por la ignimbrita denominada “La Joya”, datada en aproximadamente 4.8 Ma (Paquereau-Lebti et al., 2006), y el Barroso Superior (3-1 Ma), está comprendido por la “Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa” datada en 1.65 Ma (Paquereau-Lebti et al., 2006). Estas ignimbritas serán descritas a continuación.

En la depresión tectónica de Arequipa se han identificado cuatro secuencias importantes de ignimbritas emplazadas entre el Mioceno y Pleistoceno (Fig. 3.5). Se trata de la ignimbrita “Río Chili”, la ignimbrita “La Joya”, la ignimbrita “Aeropuerto de Arequipa” y la ignimbrita “Yura” (Paquereau-Lebti et al., 2006), descritos a continuación.

#### **3.2.3.1 Ignimbrita Río Chili (IRC)**

Datada en 13.19 Ma (Paquereau-Lebti et al. 2006). Esta ignimbrita de color blanquecina aflora en algunos sectores del cañón del río Chili (Fotografía 3.6). Estos depósitos, están soldadas a parcialmente soldados. Poseen alto contenido de fenocristales de plagioclasas, anfíboles, biotita, sanidina, cuarzo y óxidos de Fe-Ti (Paquereau-Lebti et al., 2006).



**Fotografía 3.6** Ignimbrita del Río Chili, visible en el cañon del Río Chili.

#### **3.3.4.2 Ignimbrita La Joya (Qp-ILJ)**

La Ignimbrita la Joya aflora en el valle del río Chili, sobreyaciendo a la ignimbrita del Río Chili, descrita anteriormente. La ignimbrita la Joya fue datada en  $4.89 \pm 0.02$  Ma (Paquereau-Lebti et al., 2006). El espesor promedio de estas ignimbritas es aproximadamente 70 m y presenta facies consolidadas. Este facie soldado presenta disyunción columnar y son ricas en pómez de 15 cm de diámetro. Las pómez están constituidas por fenocristales de plagioclasa, sanidina, cuarzo, óxidos de Fe-Ti, biotita y anfíbol (mineral característico de esta ignimbrita). La matriz es de color gris a rosa, rica en cristales libres y muestra una asociación mineral similar a la pómez. La distribución de las pómez varía de deformadas y orientadas al azar en la unidad superior a pómez aplastadas (fiames) con foliación hacia la base (Paquereau-Lebti et al., 2006).

#### **3.3.4.3 Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (Qp-IAA)**

Esta ignimbrita aflora en el valle del río Chili y en las quebradas que cruzan el sur del complejo volcánico Chachani. Esta ignimbrita ha sido datada en 1.65 M.a (Paquereau-Lebti et al., 2006), Esta ignimbrita está compuesta por dos unidades, unidad blanca y rosada (Fotografía 3.7); la unidad inferior (unidad rosada), aflora hacia el suroeste del complejo. Esta unidad presenta unas pocas decenas de metros hasta 150 m de espesor, con facies consolidadas, en las cuales se observan pómez deformadas englobadas dentro de una matriz de ceniza gris. La consolidación del depósito se debe principalmente a la cristalización fase-vapor, como resultado de una percolación de gas caliente a través del depósito durante el proceso de enfriamiento después del emplazamiento. La matriz gris a blanquecina contiene pómez amarillentas con vesículas redondeadas, fragmentos de lava accidental, obsidiana y es rica en cristales libres de plagioclasa, biotita y sanidina. La

unidad superior (unidad rosada) la cual sobreyace a la unidad inferior abarca una extensión más amplia, con un espesor máximo de 50 m, es consolidada a poco consolidada. Esta unidad ignimbrítica se caracteriza por ser más rica en fragmentos líticos accidentales que la unidad blanca y está compuesta por pómez vesiculadas, líticos subangulosos rojizos y cristales de plagioclasa, biotita y rara vez contiene cuarzo y sanidina (Paquereau-Lebti et al., 2006).



**Fotografía 3.7** Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa, visible en la quebrada Añashuayco.

#### **3.3.4.4 Ignimbrita Yura**

En la base del flanco oeste del complejo volcánico Chachani (Fig. 3.5) aflora una serie de depósitos de flujo de pómez no soldados de color gris claro, que se intercalan con depósitos piroclásticos retrabajados. Según Paquereau-Lebti et al. (2006) esta secuencia de ignimbrita tiene un volumen de 1.5 km<sup>3</sup> y provienen del sector norte del volcán Nocarane y sur de los volcanes Baquetane. Al NO de la depresión de Arequipa, cerca de la localidad de Yura. Este depósito de flujo de pómez ha sido datado en 1.02±0.09 M.a (Paquereau-Lebti et al., 2006).

### **3.4 Geología del Complejo Volcánico Chachani**

El Complejo Volcánico Chachani está emplazada sobre las ignimbritas Río Chili, La Joya, Aeropuerto de Arequipa y Tufos Yura; las cuales fueron descritas por Paquereau-Lebti et al. (2006). Este complejo es uno de los más voluminosos de los andes centrales. Tiene un área de 601 km<sup>2</sup>, un volumen de 248-289 km<sup>3</sup> y está compuesto por 12 edificios volcánicos (conos volcánicos, cumulo de domos, domos coladas y flujos de lava de composición andesítica y dacítica) (Aguilar, 2015) . A continuación, se describen cada edificio (Fig. 3.8).

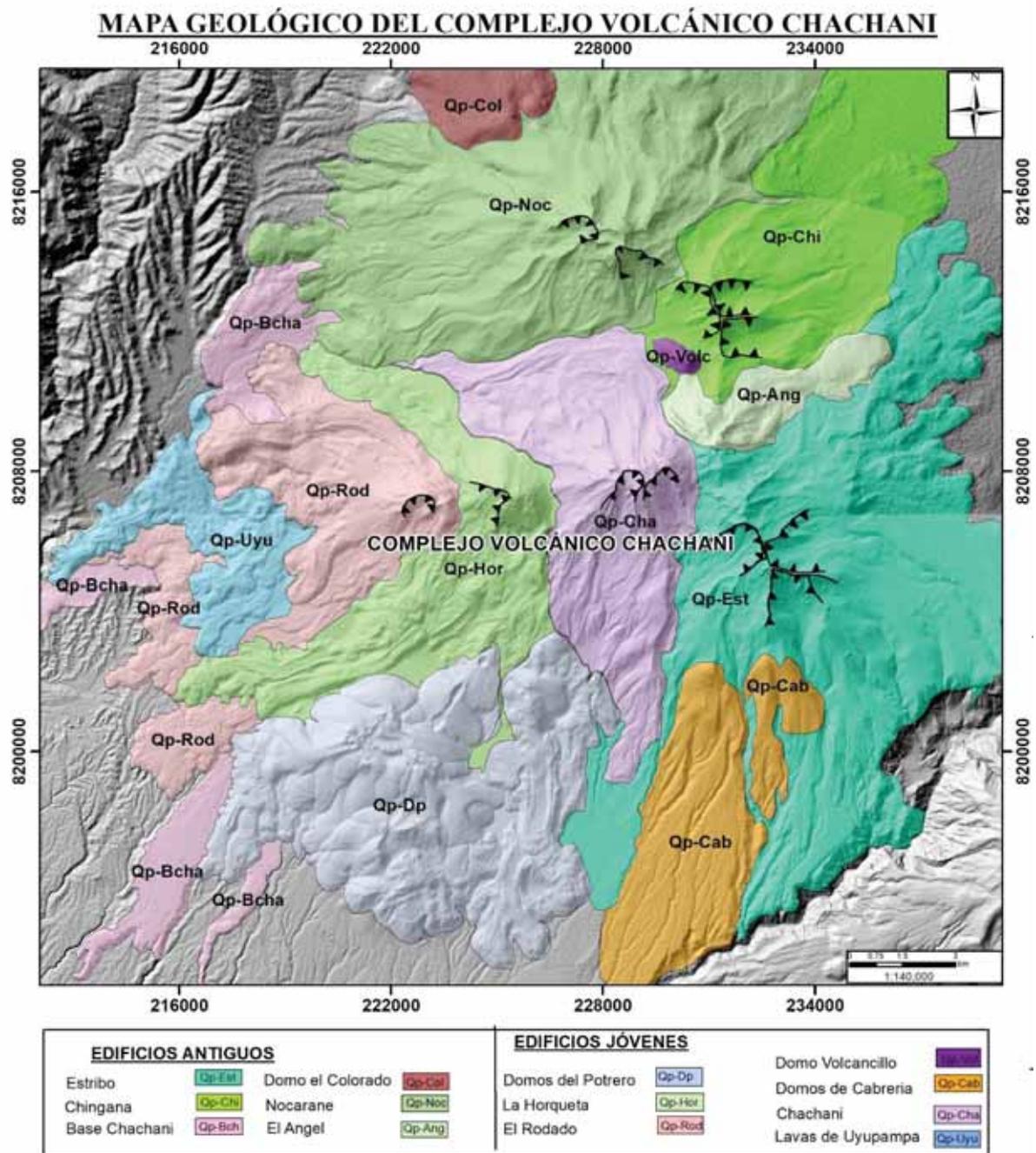


Figura 3.8. Mapa geológico del complejo volcánico Chachani tomado de Aguilar, 2015

### 3.4.1 Edificios antiguos (<1278 ka y 642 ka)

Dataciones efectuadas por (Aguilar, 2015), muestran la presencia de edificios antiguos del complejo volcánico Chachani los cuales se describen a continuación:

#### 3.4.1.1 Chachani Basal

El edificio Chachani Basal según Aguilar (2015) presenta dos unidades. La primera unidad se encuentra al noroeste del CVC y se emplaza directamente sobre los Tufos de Yura, y a su vez subyacen al estratovolcán Nocarane, que consisten en flujos de lava andesíticos. La segunda unidad se encuentra al suroeste del CVC y se emplaza directamente sobre las ignimbritas Aeropuerto de Arequipa (Fotografía 3.9), y está

compuesto por flujos de lava, de color gris oscuro, de andesítica afaníticas, ligeramente vesiculadas, con 10% de fenocristales de plagioclasa y 90 % de matriz.



**Fotografía 3.9.** Flujos de lava andesíticos del Chachani Basal, visible en el sector suroeste del domo Potrero (Yura).

#### **3.4.1.2 Estratovolcán Chingana**

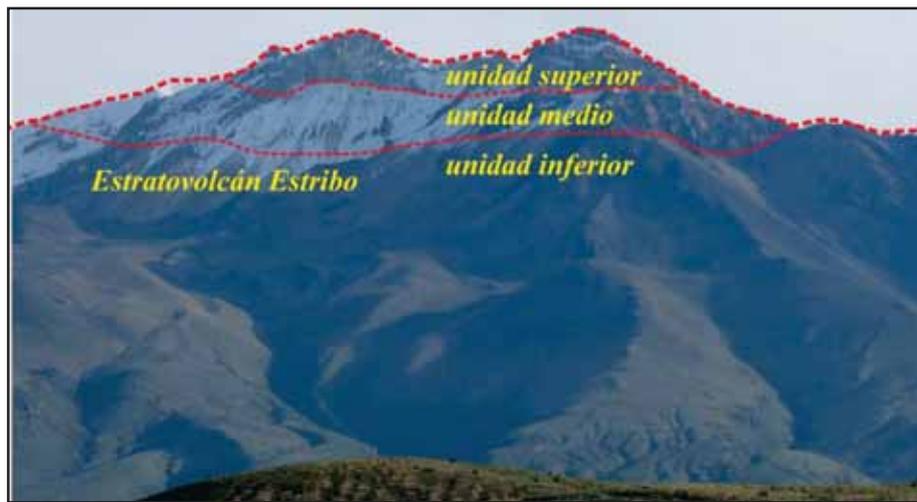
Este estratovolcán es el más antiguo y se encuentra ubicado al noreste del CVC (Fotografía 3.10). Las lavas de este estratovolcán alcanzaron distancias de hasta 7 km del cráter, las cuales en parte se encuentran hidrotermalizadas. La parte central está muy erosionada y cubierta por otros edificios. Esta unidad está formada por lavas andesíticas, microporfiríticas que tienen una edad de 916.5 ka (Aguilar, 2015).



**Fotografía 3.10.** Estratovolcán Chingana, el cual presenta lavas hidrotermalizadas.

### 3.4.1.3 Estratovolcán Estribo

Este edificio se encuentra ubicado en el flanco este del complejo volcánico Chachani, extendiéndose a lo largo del cañón del río Chili (Fotografía 3.11). En la base de este estratovolcán se encuentran sedimentos volcanoclásticos. Este estratovolcán presenta tres unidades: La unidad inferior compuesta por flujos de lava andesítica y dacítica que se emplazaron sobre las ignimbritas de Río Chili y La Joya. La unidad media, compuesta por flujos de lavas andesíticas y depósitos de caída de escoria. La unidad superior, compuesta por flujos de lava andesítica, datados en  $808.5 \pm 62.7$  ka (Aguilar, 2015).



Fotografía 3.11. Estratovolcán Estribo.

### 3.4.1.4 Estratovolcán El Ángel

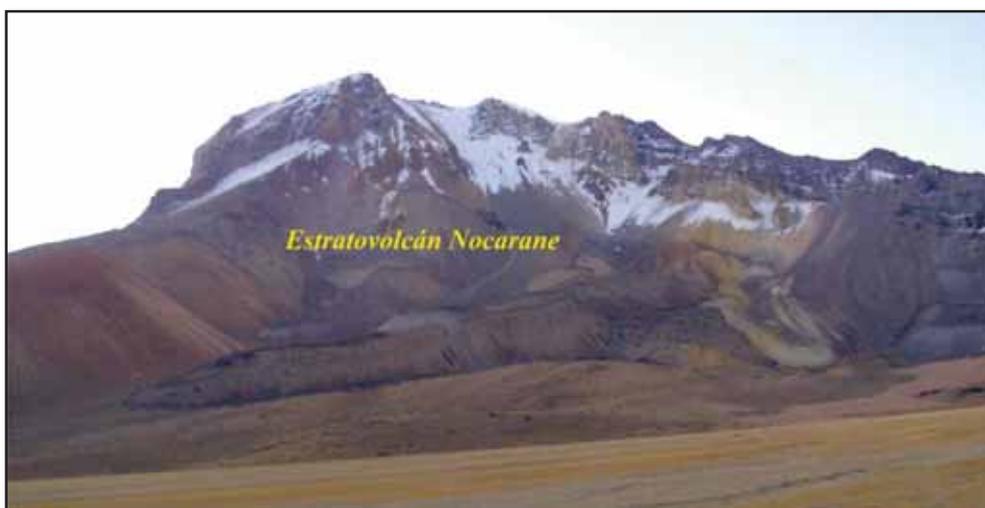
El estratovolcán El Ángel está ubicado al NE del CVC (Fotografía 3.12). Está compuesto de una sucesión de flujos de lava andesítica porfirítica que han sido erosionados y cubiertos por lavas de los estratovolcanes Chingana y Estribo (Aguilar, 2015, Suaña, 2012). Estas lavas se muestran inclinadas.



Fotografía 3.12. Estratovolcán El Ángel, emplazado entre el domo Volcancillo y el estratovolcán Chachani.

#### 3.4.1.5 Estratovolcán Nocarane

El estratovolcán Nocarane está ubicado al NW del complejo volcánico Chachani (Fotografía 3.13), datados en 808-601 ka (Aguilar, 2015). Está compuesto por una sucesión de flujos de lavas andesíticas cortadas por un domo de lava en el lado occidental del volcán. Este edificio presenta tres unidades superpuestas. La unidad inferior constituida por flujos de lava oscura, la unidad media compuesta por lavas andesitas porfíricas, y la unidad superior compuesta por flujos de lava. Este estratovolcán está cubierto por morrenas y lavas hidrotermalizadas.



Fotografía 3.13. Estratovolcán Nocarane, el cual se encuentra hidrotermalizado.

#### 3.4.1.6 Domo El Colorado

El domo El Colorado está ubicado al noroeste del CVC (Fig. 3.5). Este domo ha sido construido por dos eventos extrusivos, los cuales consisten en domos coladas de composición andesítica porfírica, datada en  $641.8 \pm 88.2$  ka (Aguilar, 2015).

#### 3.4.2 Edificios jóvenes (642 y <600 ka)

Dataciones efectuadas por (Aguilar, 2015), muestran la presencia de edificios jóvenes del Complejo Volcánico Chachani los cuales se describen a continuación:

##### 3.4.2.1 Estratovolcán del Rodado

Este estratovolcán está ubicado en el flanco oeste del complejo volcánico Chachani (Fotografía 3.14) y está formado por tres unidades: unidad inferior, está al suroeste de este estratovolcán; el cual se emplazó sobre la ignimbrita Aeropuerto de Arequipa, compuesto por flujos de lava andesítica porfírica. La unidad central, está al noroeste del estratovolcán, compuesta por flujos de lava andesítica porfírica y la unidad superior,

que se emplazó en el lado colapsado de la unidad central, consiste en flujos de lava andesítica.



**Fotografía 3.14.** Unidad inferior y superior, en el sector noroeste del estratovolcán El Rodado.

#### **3.4.2.2 Domo Colada La Horqueta**

Es un domo de lava de forma cónico, está ubicado al oeste del volcán Chachani (Fotografía 3.15). Sus lavas se extendieron hasta 13 km al sureste y ~7 km en el lado norte. La unidad inferior está ubicado al sureste de este domo, compuesta por flujos de lava andesítica y flujos de lava en bloques. La unidad media, está ubicado al suroeste de este domo, consiste en una pila de flujos de lava y la unidad superior, fluyó hasta 6 km al noroeste y cubre la parte superior de este domo, compuesta por flujos de lava de composición andesítica.



**Fotografía 3.15.** Unidad superior, al noroeste del Domo La Horqueta.

### 3.4.2.3 Domos Potrero

Los domos de Potrero están ubicados al Sur del complejo volcánico Chachani (Fotografía 3.16) y presentan tres unidades: La unidad inferior compuesta por andesitas porfíricas datadas en  $397 \pm 40$  ka. La unidad media compuesta por dacitas porfíricas, datadas en  $369 \pm 62$  ka, y la unidad superior compuesta por andesitas porfíricas datadas en  $292 \pm 5$  ka. Además, Suaña (2012), describe los domos Potrero como domos, domos coladas y cumulo-domos del Aeropuerto que están cubiertos por depósitos piroclásticos de caída de pómez livianas, de color gris claro, con fragmentos líticos angulosos a sub angulosos. Estos domos presentan composición andesítica, textura porfírica con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y mínima cantidad de piroxenos.



Fotografía 3.16. Domos Potrero, al sur del complejo volcánico Chachani.

### 3.4.2.4 Estratovolcán Chachani

Este edificio es el más reciente y más alto del complejo volcánico Chachani, con una altura de 6057 msnm. Presenta tres unidades (Fotografía 3.17): La unidad inferior, compuesto por flujos de lava andesítica datados en  $131 \pm 4$  ka (Aguilar, 2015). La unidad media, compuesto por flujos de lava dacíticas datados en  $130 \pm 38$  ka (Aguilar, 2015), y la unidad superior, compuesta por flujos de bloques de lava.



**Fotografía 3.17.** Estratovolcán Chachani (unidad inferior, medio y superior).

#### 3.4.2.5 Domo Colada Cabrería

Esta unidad está ubicado a 4 km al sur del estratovolcán Estribo (Fotografía 3.18). Consisten en domos de lava y gruesos depósitos de flujo piroclástico de bloques y cenizas, de composición andesítica, datados en  $56 \pm 32$  ka (Aguilar, 2015). Este domo es el afluente principal, de las quebradas Pastoraíz, Qesquemania y Gamarra, en la quebrada Gamarra afloran los flujos de bloques y cenizas, con espesores de 10 a 15 metros. Estos depósitos de caracterizan por tener una matriz friable, con bloques de 15-45 cm de diámetro. Estos bloques están compuestos por andesitas porfiríticas de color gris claro, con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita.



**Fotografía 3.18.** Domo Cabrería, ubicado al norte del distrito de Cayma.

### 3.4.2.6 Domo del volcancillo

El domo del volcancillo, está ubicada al norte del Complejo Volcánico Chachani (Fotografía 3.19) se presenta en forma de una lomada compuesto por flujos cortos de lavas dacíticas que se emplazaron en el antiguo cráter del estratovolcán Chingana.



**Fotografía 3.19.** Domo Volcancillo, emplazado en el sector NW del estratovolcán El Ángel.

### Depósito aluvial

Estos depósitos afloran en el sector sur y sureste del complejo volcánico Chachani; en las faldas de los domos Potrero y en la zona del Aeropuerto de Arequipa. Los depósitos aluviales se caracterizan por estar formados por una matriz limo-arenosa de 50% y fragmentos de roca de 50% de forma redondeada a sub redondeada con tamaños centimétricos 30% de 2-10 cm y decimétrico 20% de 12-30cm (Fotografía 3.20).



**Fotografía 3.20.** Depósito aluvial, en la quebrada Estanquillo.

## **CAPITULO IV: ESTRATIGRAFÍA DEL SUR DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CHACHANI**

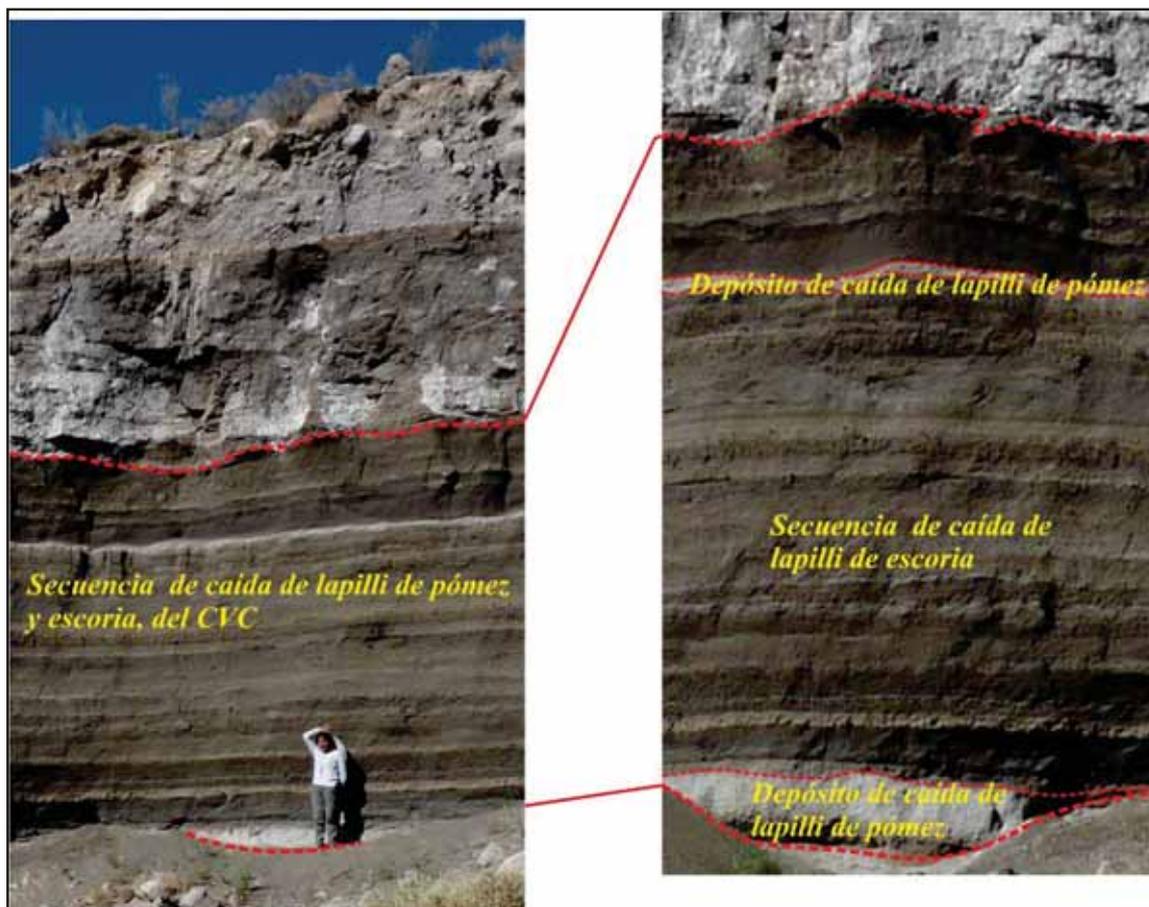
En el sur del Complejo Volcánico Chachani, afloran depósitos desde el pleistoceno hasta el holoceno. A continuación, se describen los depósitos que afloran al sur del Complejo Volcánico Chachani.

### **4.1. Secuencia piroclástica del volcán Chachani, sector suroeste del Complejo Volcánico Chachani (Qp-Sp)**

La secuencia piroclástica del sector suroeste del CVC está compuesta por: secuencia de depósitos de caída de lapilli de pómez y escorias, del complejo volcánico Chachani y secuencia de depósitos de lahares; estos depósitos se encuentran emplazadas sobre la ignimbrita Aeropuerto de Arequipa. Cabe señalar que los depósitos de caída de lapilli de pómez y escorias, presentan espesores de hasta 15 m, frente a los depósitos de lahares que solo presentan espesores de hasta 5 m.

En las quebradas Honda y Los Andenes (Yura) afloran secuencias de caída de lapilli de pómez y escoria del complejo volcánico Chachani. Estas secuencias se caracterizan, por presentar de 6 a 40 depósitos de caída de escoria y de 1 a 2 depósitos de caída de lapilli de pómez, con espesores constantes de 10 a 15 cm. Cabe señalar que estas secuencias de caída de pómez y escorias, presentan las mismas características en ambas quebradas antes mencionadas.

En la quebrada Honda (Fotografía 4.1), la secuencia posee un espesor promedio de 10 m; la cual se caracteriza por presentar 24 depósitos de caída de escoria y 2 depósitos de caída de pómez. En los depósitos de caída de escoria, las escorias miden hasta 2 cm de diámetro, son de color pardo oscuro y pardo claro, de forma angulosa a sub angulosa, con fenocristales de anfíbol y plagioclasa. También se han identificado líticos lávicos (3-8 %) de composición andesita afanítica. Los depósitos de caída de pómez presentan pómez que miden hasta 4 cm de diámetro, son de color blanquecina a amarillento, de forma angulosa a sub angulosa, con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. En la quebrada Los Andenes, esta secuencia presenta un espesor promedio de 4 m, se caracteriza, por presentar de 10 a 15 depósitos de caída de escoria y un depósito de caída de pómez (Fotografía 4.2). Esta secuencia está emplazada sobre la ignimbrita “Aeropuerto de Arequipa”.



**Fotografía 4.1.** Secuencia de caída de escorias y pómez, con espesores de 10 -15 cm, visibles en la quebrada Honda, a 16 km al suroeste del volcán Chachani.



**Figura 4.2.** Secuencia de caída de escorias y pómez, con espesores de 8-12 cm, visible en la quebrada Los Andenes, a 17 km al suroeste del volcán Chachani.

# MAPA GEOLÓGICO DEL SUR DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CHACHANI

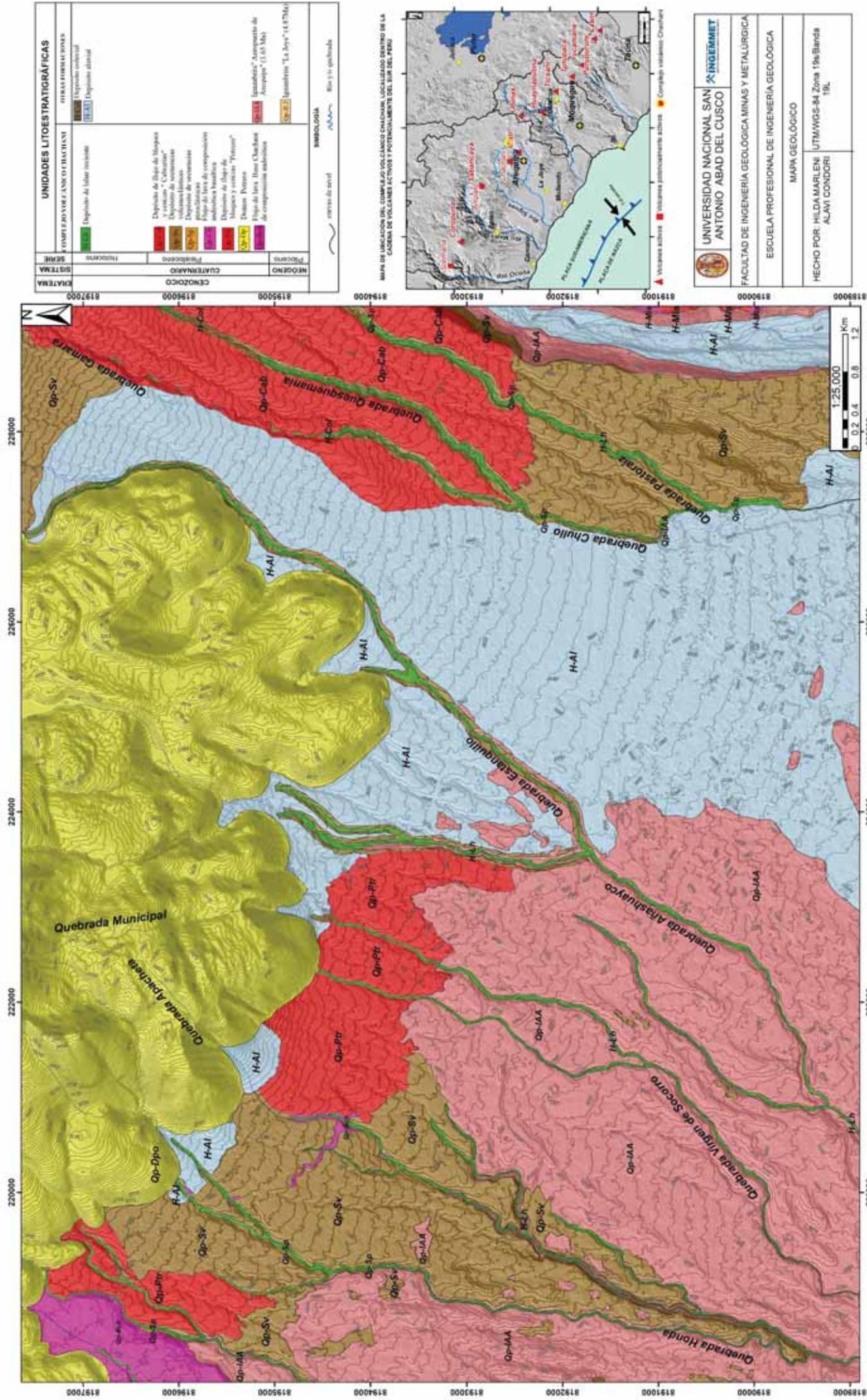


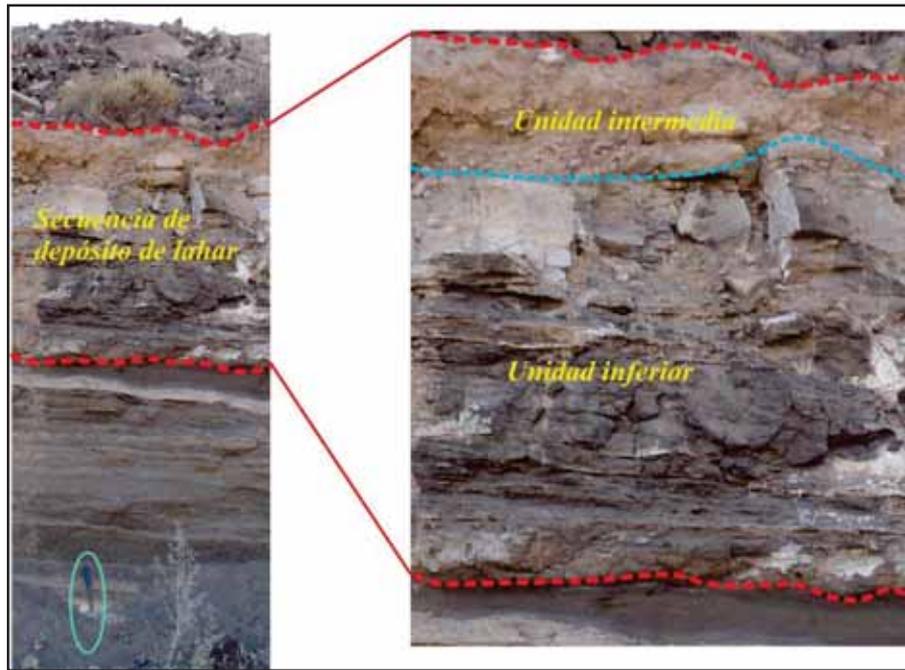
Figura 4.3. Mapa geológico del sur del complejo volcánico Chachani. Fuente: Elaboración propia

## 4.2 Secuencia volcanoclástica, del sector suroeste del complejo volcánico Chachani (Qp-Sv)

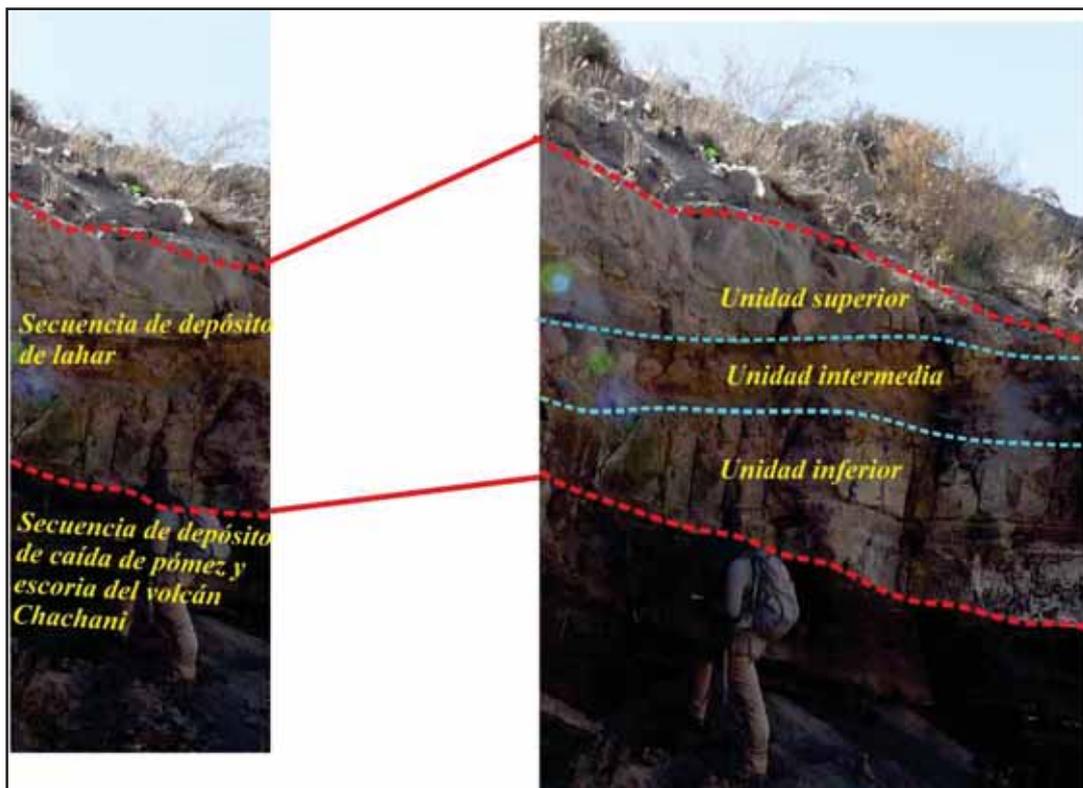
La secuencia volcanoclastica del sector suroeste del CVC está formado por: una secuencia de depósito de caída de pómez y escorias del complejo volcánico Chachani, secuencia de depósitos de lahares y depósitos de flujo piroclástico de bloques y cenizas del domo Potrero que afloran sobre la ignimbrita Aeropuerto de Arequipa. Cabe señalar que la secuencia de depósitos de lahares presentan espesores de hasta 5 m, frente a las secuencias de depósitos de caída de pómez y escorias, que solo presentan espesores de hasta 3 m. La secuencia de depósitos de lahares emplazados en este sector (distrito de Yura), presentan espesores de 50 cm a 5 m, en las quebradas Honda y Los Andenes.

En la quebrada Los Andenes, afloran dos depósitos de lahares (unidad inferior y unidad intermedia), mientras que en la quebrada Honda afloran tres depósitos de lahares (unidad inferior, intermedia y superior). Sin embargo, la unidad inferior e intermedia de ambas quebradas, presentan las mismas características que a continuación se describen en la quebrada Los Andenes.

En la quebrada Los Andenes (Fotografía 4.4), en la secuencia volcanoclástica se ha observado dos depósitos de lahar de 2 m: **la unidad inferior**, se caracteriza por ser masiva y muy compacta, con una matriz areno-arcillosa (80%) de color gris oscuro, con un espesor de 1.2 m. El depósito está constituido por fragmentos líticos polilitológicos, compuestos por fragmentos de lava andesíticas porfiríticas y afáníticas de color gris oscuro y rojizo, de forma angulosa a sub angulosa de tamaños centimétricos. También se distinguen fragmentos de pómez oxidadas de colores amarillentos, de tamaños menores a 3 cm y escorias de color rojizos, grises y negros menores a 5 cm de diámetro. **La unidad intermedia**, es masiva y compacta, con una matriz limosa de color pardo. Este depósito está constituido de fragmentos líticos monolitológicos, compuestos por fragmentos de lava andesíticas porfiríticas de color gris oscuro, de forma redondeada a sub redondeada con tamaños centimétricos a decimétricos (11-80 cm). Mientras que en la quebrada Honda **la unidad superior** (Fotografía 4.5), se caracteriza por ser masivo y muy compacto, con una matriz limo-arcillosa (60%) y con fragmentos líticos monolitológico, compuestos por andesitas porfiríticas (30%), de forma angulosa a sub angulosa de tamaños centimétricos a decimétrico.



**Fotografía 4.4.** Secuencia de depósito de lahar visibles en la quebrada Los Andenes, a 18 km al suroeste del volcán Chachani.



**Fotografía 4.5.** Secuencia de depósito de lahar, visibles en la quebrada Honda, a 17 km al suroeste del volcán Chachani.

### 4.3 Depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas “domo Potrero” (Qp-Ptr)

Los depósitos de flujo piroclástico de bloques y cenizas del “domo Potrero”, afloran sobre las secuencias de depósitos de lahares. Estos flujos, se observan en las quebradas Municipal, Virgen de Socorro y Los Andenes (Cerro Colorado y Yura).

En la quebrada Virgen de Socorro (Fotografía 4.6) el depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas del “domo Potrero” aflora a 3 km del domo Potrero, localizado al suroeste del volcán Chachani. Este depósito es masivo y friable, con un espesor promedio de 2 a 4 m, presenta una matriz arenosa y con bloques de tamaños centimétricos a decimétricos. Los bloques juveniles son de composición andesita porfírica. Entre los cuales se distinguen dos tipos de bloques: bloques gris claro y gris oscuro con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. Cabe señalar que en la quebrada Los Andenes, este depósito presentan las mismas características que la quebrada Virgen de Socorro.



**Fotografía 4.6.** Depósito de flujo de bloques y cenizas del domo Potrero, visible en la quebrada Virgen de Socorro a 16 km al suroeste del volcán Chachani.

En la quebrada Municipal (Fotografía 4.7), el depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas del “domo Potrero”, aflora a 1 km del domo Potrero, localizado al suroeste del volcán Chachani. Este depósito presenta dos capas; la capa inferior es masiva y friable, con matriz arena limosa de bloques de tamaños centimétricos a decimétricos (12-65 cm), y la capa superior es masiva y friable, con matriz limo arenosa de bloques de tamaños centimétricos a decimétricos (8-90 cm). Estos bloques juveniles son de composición andesítica porfírica, de color gris oscuros con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita.



**Fotografía 4.7.** Depósito de flujo de bloques y cenizas visible en la quebrada Municipal a 14 km al suroeste del volcán Chachani.

#### **4.4 Secuencia piroclástica del Complejo Volcánico Chachani, sector sureste del Complejo Volcánico Chachani (Qp-Sp)**

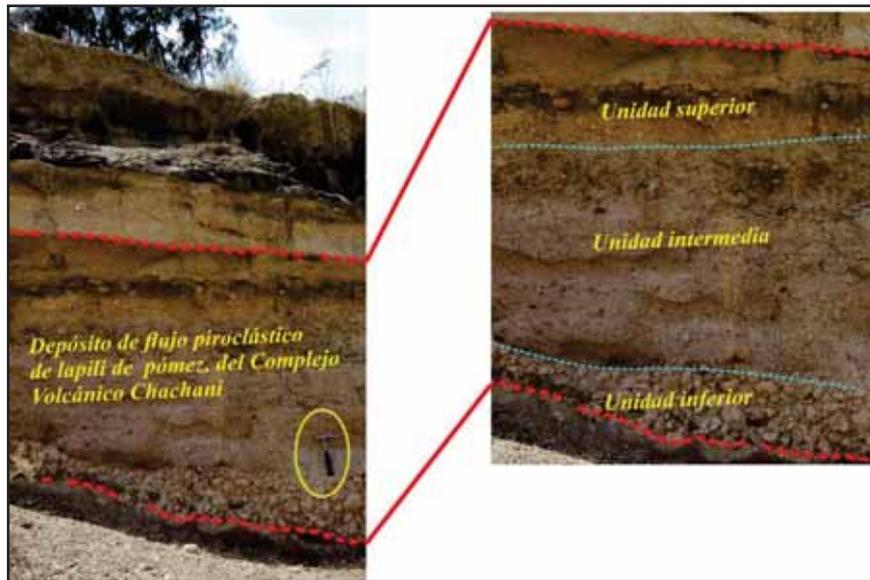
La secuencia piroclástica del CVC, en el sector sureste, está compuesto por depósitos de: flujo piroclástico de pómez, caída de lapilli de pómez y caída de escorias y depósitos de lahares. Cabe señalar que los depósitos de caída de lapilli de pómez y escorias presentan espesores mayores que los depósitos de lahares.

##### **a) Depósito de flujo piroclástico de pómez del Complejo Volcanico Chachani**

En el sector sur y sureste, de las quebradas Pastoraíz y Chullo, aflora un depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza provenientes del CVC. Este depósito en la quebrada Pastoraíz, presenta tres unidades (Fotografía 4.8); mientras que en la quebrada Chullo el depósito es masivo (Fotografía 4.9).

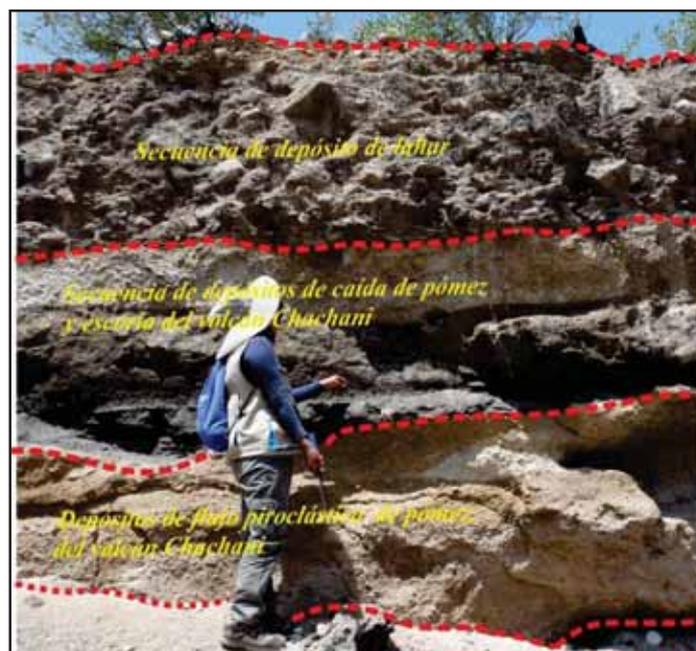
En la quebrada Pastoraíz, cerca de la planta de tratamiento de agua potable “Miguel de la Cuba Ibarra”, aflora el depósito de flujo piroclástico de pómez y cenizas, que de manera local presenta tres unidades (Fotografía 4.8): **la unidad inferior**, está compuesta por un nivel rico en pómez, la facie es bloque soportado, con 85% de pómez y 10 % de matriz, de color blanquecino y con menos de 5% de líticos. En este nivel las pómez son redondeadas a sub redondeadas de hasta 15 cm de tamaño, constituidas por fenocristales de piroxenos, plagioclasa y anfíbol. **La unidad intermedia** es de color beige, masiva, facie matriz soportada, con 60 % de matriz, 20 % pómez y con 20% de fragmentos líticos lávicos. La pómez son redondeada a sub redondeadas miden entre 1 a 4 cm de diámetro y la matriz está constituida principalmente por lapilli fino. **La unidad superior** es masiva, facie matriz soportada, con 70% de matriz y 30% de pómez. La pómez, son de color amarillento a anaranjado, de forma redondeada a sub redondeada de hasta 11 cm de tamaño, constituida por

fenocristales de plagioclasa y anfíbol. La matriz está constituida por lapilli fina de color anaranjado oscuro.



**Fotografía 4.8.** Depósito de flujo piroclástico de pómez, visible en la quebrada Pastoraíz, a 13 km al sur del volcán Chachani.

En la quebrada Chullo (Fotografía 4.9), el depósito de flujo piroclástico de pómez es masivo y poseen un espesor promedio de 1.0 m, y está compuesto por pómez de color amarillento hidrotermalizado, con tamaños que varían entre 1 a 5 cm de diámetro, con presencia de fragmentos líticos de 20%. Las pómez son de forma redondeada a sub redondeada que contiene cristales de biotita, plagioclasa y anfíbol.

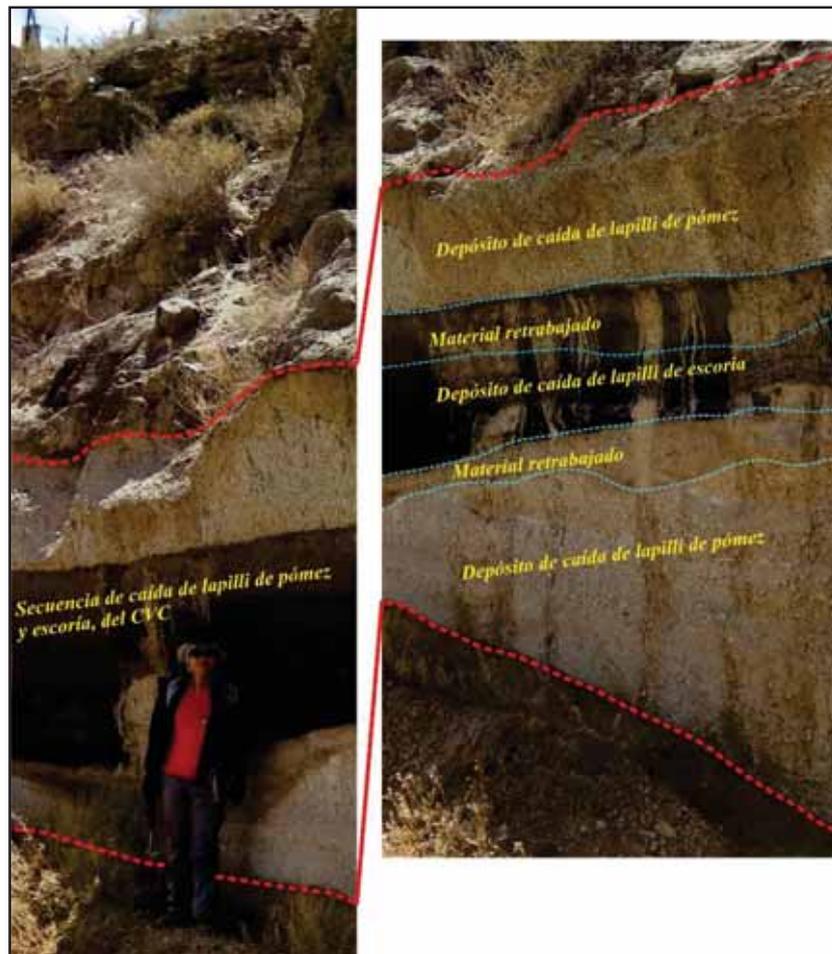


**Fotografía 4.9.** Depósito de flujo piroclástico de pómez, visible en la quebrada Chullo, a 18 km al sur del volcán Chachani

## b) Secuencia de caída de lapilli de pómez y escoria del Complejo Volcánico Chachani

En el sector sureste, en las quebradas Pastoraíz y Chullo, afloran secuencias de caída de lapilli de pómez y de escorias, provenientes del Complejo Volcánico Chachani. Esta secuencia se caracteriza por presentar de 1 a 2 depósitos de caída de escorias y 2 depósitos de caída de lapilli de pómez. Los espesores de los depósitos oscilan entre 60-90 cm.

En la quebrada Pastoraíz (Fotografía 4.10), los depósitos de caída de lapilli de pómez presentan fragmentos líticos (15-20%), poco fragmentados y algunos hidrotermalizados. La pómez mide hasta 6 cm de diámetro y son de color blanquecino a anaranjado de forma angulosa a sub angulosa. Estos presentan fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita, englobados en una pasta de textura vesicular. Los depósitos son bien sorteados y homogéneos. Los depósitos de caída de escoria, se caracteriza por presentar fragmentos líticos (8-10%). Las escorias miden hasta 4 cm de diámetro, son de color pardo oscuro, a pardo claro de forma angulosa a sub angulosa, con fenocristales de anfíbol y plagioclasa.



**Fotografía 4.10.** Secuencia de depósito de caída de lapilli de pómez y de escoria, en la quebrada Pastoraíz, a 13 km del volcán Chachani.

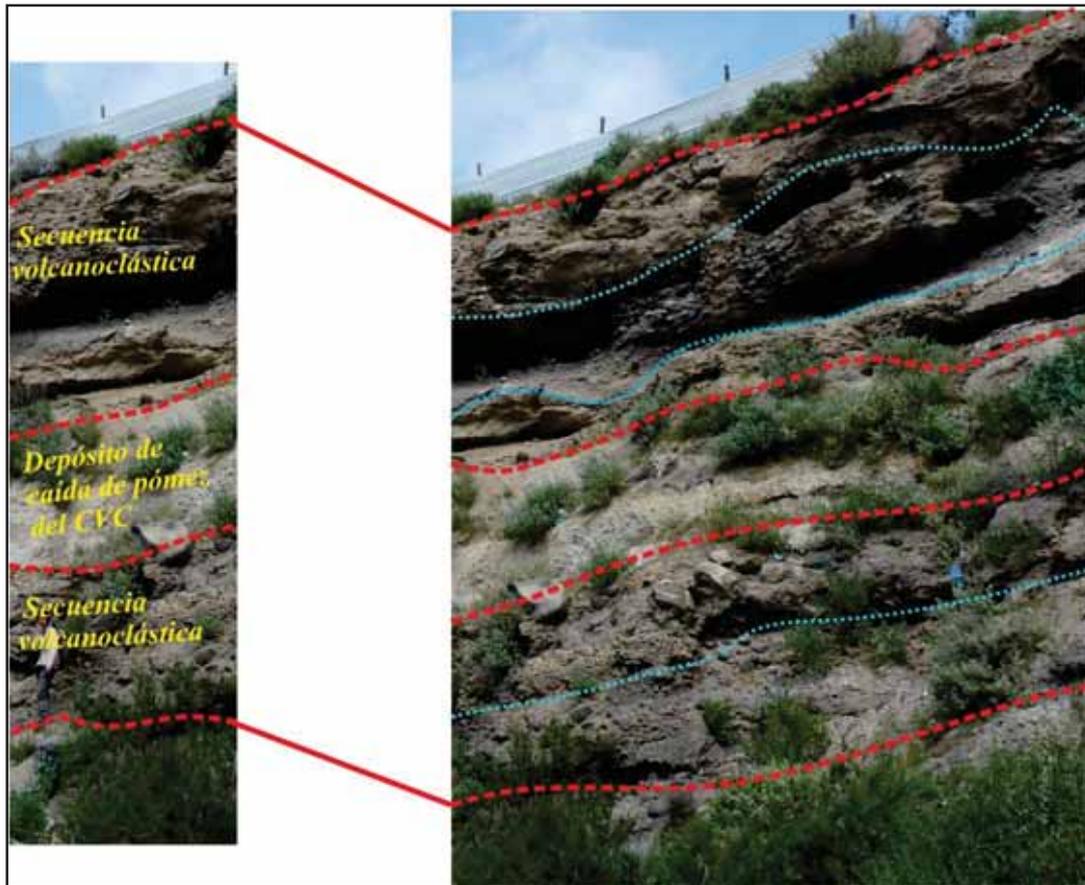
En la quebrada Chullo el afloramiento se muestra un poco alterado (Fotografía 4.9). Los depósitos de caída de lapilli de pómez presentan líticos lávicos (15-30%), y algunos fragmentados hidrotermalizados. Las pómez miden hasta 4 cm de diámetro y son de color blanquecino a anaranjado de forma angulosa a sub angulosa. Estos presentan fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita, englobados en una pasta de textura vesicular. Los depósitos son bien sorteados y homogéneos. Los depósitos de caída de escoria, se caracteriza por presentar fragmentos líticos (20-30%). Las escorias miden hasta 6 cm de diámetro, son de color pardo oscuro, a pardo claro de forma angulosa a sub angulosa, con fenocristales de anfíbol y plagioclasa.

#### **4.5 Secuencia volcanoclástica, del sector sureste del Complejo Volcánico Chachani (Qp-Sv)**

Las secuencias volcanoclásticas emplazadas en el sector sureste del Complejo Volcánico Chachani están compuestas por depósitos de lahares, depósitos de caída de lapilli de pómez y escorias. Cabe señalar que los depósitos de lahares presentan mayores espesores que los depósitos de caída de lapilli de pómez y escorias. Estas secuencias volcanoclásticas afloran en las quebradas Pastoraíz, Quesquemania, Gamarra y Chullo (distrito de Cayma).

En estas quebradas, las secuencias volcanoclásticas se caracterizan por estar constituidas por depósitos de lahares y depósito de caída de lapilli de pómez del Complejo Volcánico Chachani. Los espesores de los depósitos de lahares varían entre 30 cm a 2.5 m; los cuales se caracterizan por ser masivos y compactos, que contienen fragmentos líticos de forma sub redondeada a sub angulosa, con tamaños centimétricos a decimétricos, englobadas en una matriz limo-arcillosa de color pardo y gris.

En la quebrada Pastoraíz (Fotografía 4.11) se observan dos secuencias de depósitos de lahares. La secuencia inferior presenta dos depósitos de lahar y la secuencia superior presenta tres depósitos de lahares. Cada depósito de lahar, se caracteriza por ser masivo y compacto, con una matriz limo-arcillosa de color gris oscuro a beige, con fragmentos líticos de forma sub angulosa a sub redondeada que tienen tamaños centimétricos a decimétricos. Los fragmentos líticos son de composición andesítica porfírica, la mayoría se encuentra alterada.



**Fotografía 4.11.** Secuencia volcanoclástica, visible en la quebrada Pastoraíz, a 10 km al sur del volcán Chachani.

#### **4.6. Depósitos de flujo piroclástico de bloques y cenizas “domo Cabrerías” (Qp-Ptr)**

El depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas “domo Cabrerías” aflora, sobre los depósitos volcanoclásticos del sector sureste del CVC. Este flujo aflora en la quebrada Gamarra (Cayma), con espesor promedio de 6 a 16 m.

En la quebrada Gamarra (Fotografía 4.12) se observa un depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas “domo Cabrerías” datado en  $56.5 \pm 31.6$  ka (Aguilar, 2015), a 7 km al sur del domo Cabrería. Este depósito posee un espesor promedio de 15 m; el cual presenta dos capas: la capa inferior y superior son masivos y friables, compuesto por bloques de composición andesítica porfírica, con alto contenido de fenocristales de plagioclasas, anfíbol y cuarzo, englobados en una matriz arena-limosa. Los bloques, de la unidad inferior representan el 40%, de la matriz, con tamaños de 6-90 cm de diámetros, mientras que los bloques de la unidad superior representan el 25% de la matriz, con tamaños de 8-40 cm de diámetro.



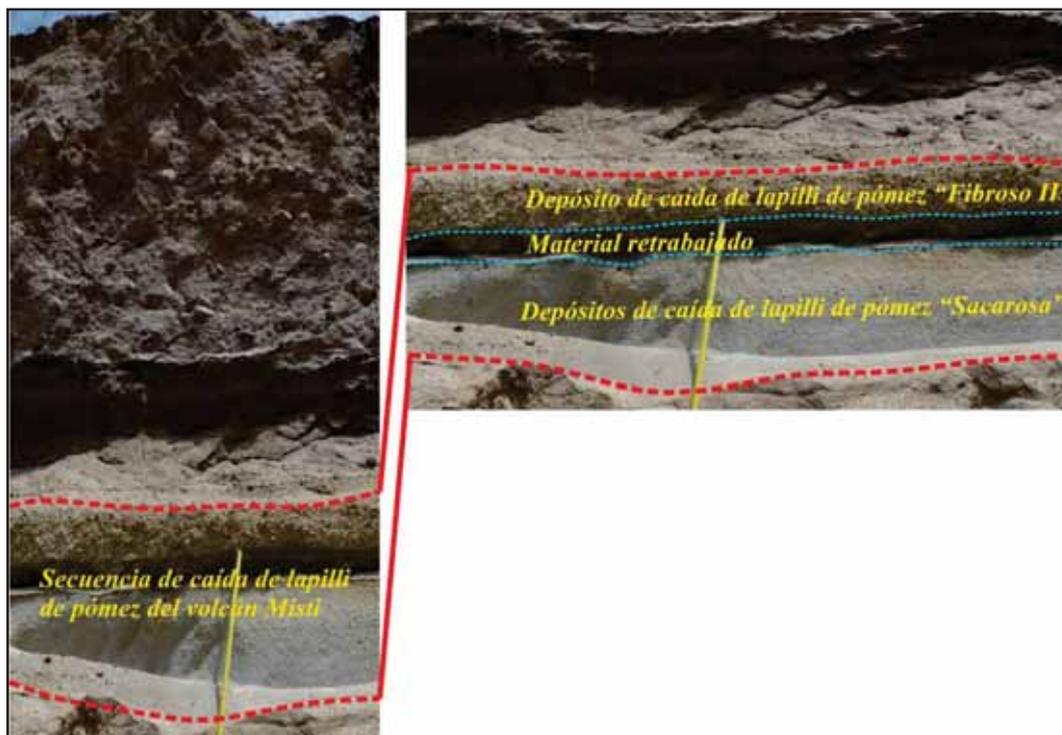
**Fotografía 4.12.** Depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas del domo Cabrerías visible en la quebrada Gamarra, a 12 km al sur del volcán Chachani.

#### 4.7 Secuencia de caída de lapilli de pómez del volcán Misti

En el área de estudio, las secuencias de caídas de pómez del volcán Misti afloran en las quebradas Estanquillo, Añashuayco (Cerro Colorado). Estas secuencias en ambas quebradas no presentan alteraciones, se muestran frescas.

En la quebrada Estanquillo (Fotografía 4.13), se observa una secuencia de depósitos de caída de lapilli de pómez del volcán Misti. Esta secuencia está compuesta por depósitos de caída de pómez “Sacarosa” y depósito de caída de pómez “Fibroso II” (Cacya et al., 2007). El depósito de caída de pómez “Sacarosa”, fue datado en  $33.7 \pm 250$  ka por Cuno (2019). Este depósito es masivo, de color blanquecino, de granulometría fina y uniforme, y no presenta gradación. La pómez mide hasta 4 cm, es angulosa a sub angulosa, lo que caracteriza a este depósito es la presencia de abundantes cristales libres de plagioclasa, biotita, anfíbol. Este depósito presenta escasos fragmentos líticos entre lávicos frescos e hidrotermalizados 1-3% (Cuno, 2019).

El depósito de caída de pómez “Fibroso II”, es masivo y bien sorteado, con espesor de 20 cm, rico en líticos (60%), no se observa gradación. Las pómez son de color amarillentas fibrosas, que contienen cristales de biotita, plagioclasa y anfíbol. Las pómez miden hasta 2 cm, es angulosa a sub redondeada. Cabe señalar que la caída de pómez “Fibroso II”, sobreyace al depósito de caída de pómez “Sacarosa”.

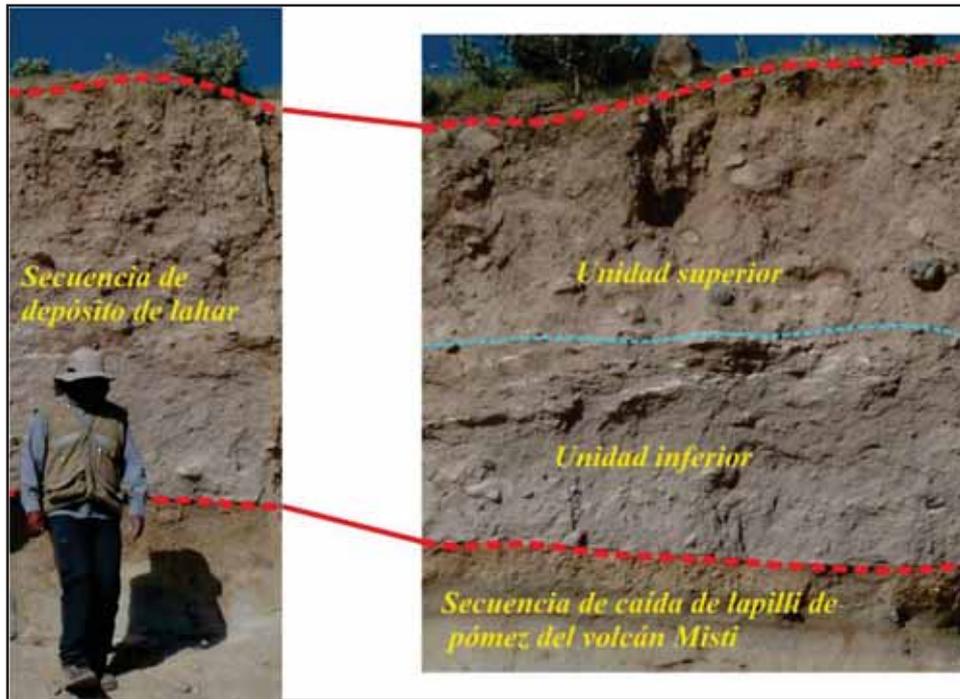


**Fotografía 4.13.** Secuencia de caída de lapilli de pómez visible en la quebrada Estanquillo, a 18 km al SW del volcán Misti.

#### **4.8 Secuencia volcanoclástica del sector sur del Complejo Volcánico Chachani (Qp-Sp)**

Las secuencias volcanoclásticas, emplazadas en el sector sur del Complejo Volcánico Chachani, está compuesta por depósitos de lahares y depósitos de caída de lapilli de pómez del volcán Misti. Estas secuencias volcanoclásticas afloran en las quebradas Estanquillo, Añashuayco (distrito de Cerro Colorado).

En la quebrada Estanquillo (Fotografía 4.14) se observa una secuencia de depósito de lahar emplazada sobre las caídas de pómez del volcán Misti. Esta secuencia presenta dos depósitos de lahar. La unidad inferior es un depósito de flujo hiperconcentrado, masivo y semi-compacto, que presenta una matriz limosa de color gris y fragmentos líticos. Estos últimos representan el 15% del depósito, y tienen tamaños menores a 10 cm. La unidad superior es masiva y semi-compacta, con una matriz limosa, de color pardo, y contiene fragmentos líticos de forma sub angulosa a sub redondeado, con tamaños menores a 15 cm. Los fragmentos líticos son de composición andesítica porfírica.



**Fotografía 4.14.** Secuencia volcanoclastica visible en la quebrada Estanquillo, a 19 km al suroeste del volcán Misti

#### 4.9. Depósitos de lahares recientes

Los depósitos de lahares recientes visibles al sur del complejo volcánico Chachani, afloran en las quebradas Pastoraíz, Quesquemania, Gamarra, Chullo (Cayma), Estanquillo, Añashuayco, Municipal, Virgen de Socorro (Cerro Colorado), Apacheta, Honda y Los Andenes (Yura). Estos depósitos afloran en el cauce principal de las quebradas, las cuales se encuentran formando terrazas.

En los depósitos de lahares recientes se han identificado dos zonas características: zona de transporte y depositación, las cuales se detallan a continuación.

Los depósitos de lahares recientes, en la zona de *transporte* se caracterizan por ser masivos y friables, con espesores que varían de 15 a 45 cm, compuesta por una matriz arena-limosa, y con fragmentos lávicos de forma sub angulosa a sub redondeada. Mientras tanto los depósitos de lahares que afloran en la zona de *depositación*, se caracterizan por tener un espesor promedio de 45 cm a 2 m. Estos depósitos generalmente son masivos y poco compactos, con matriz limoso, y con fragmentos lávicos compuestos por residuos sólidos causados por la actividad humana. Cabe señalar que los depósitos de lahares recientes se formaron en época de verano (enero, febrero, marzo y abril), donde se registran precipitaciones intensas. Sobre estos depósitos la población con menos recursos ha construido sus viviendas, exponiéndose a un alto peligro principalmente por ocurrencia de lahares, en los meses de verano, como lo que se describe a continuación:

- En la quebrada Pastoraíz (distrito de Cayma), en la zona de depositación, se observa una loza deportiva sobre el depósito de lahar reciente. Ubicado en el Sector 9 Dean Valdivia (Fotografía 4.15).



**Fotografía 4.15.** Vista de la loza deportiva sobre el depósito de lahar reciente, visible en la quebrada Pastoraíz. Ubicado en el Sector 9 Dean Valdivia, distrito de Cayma.

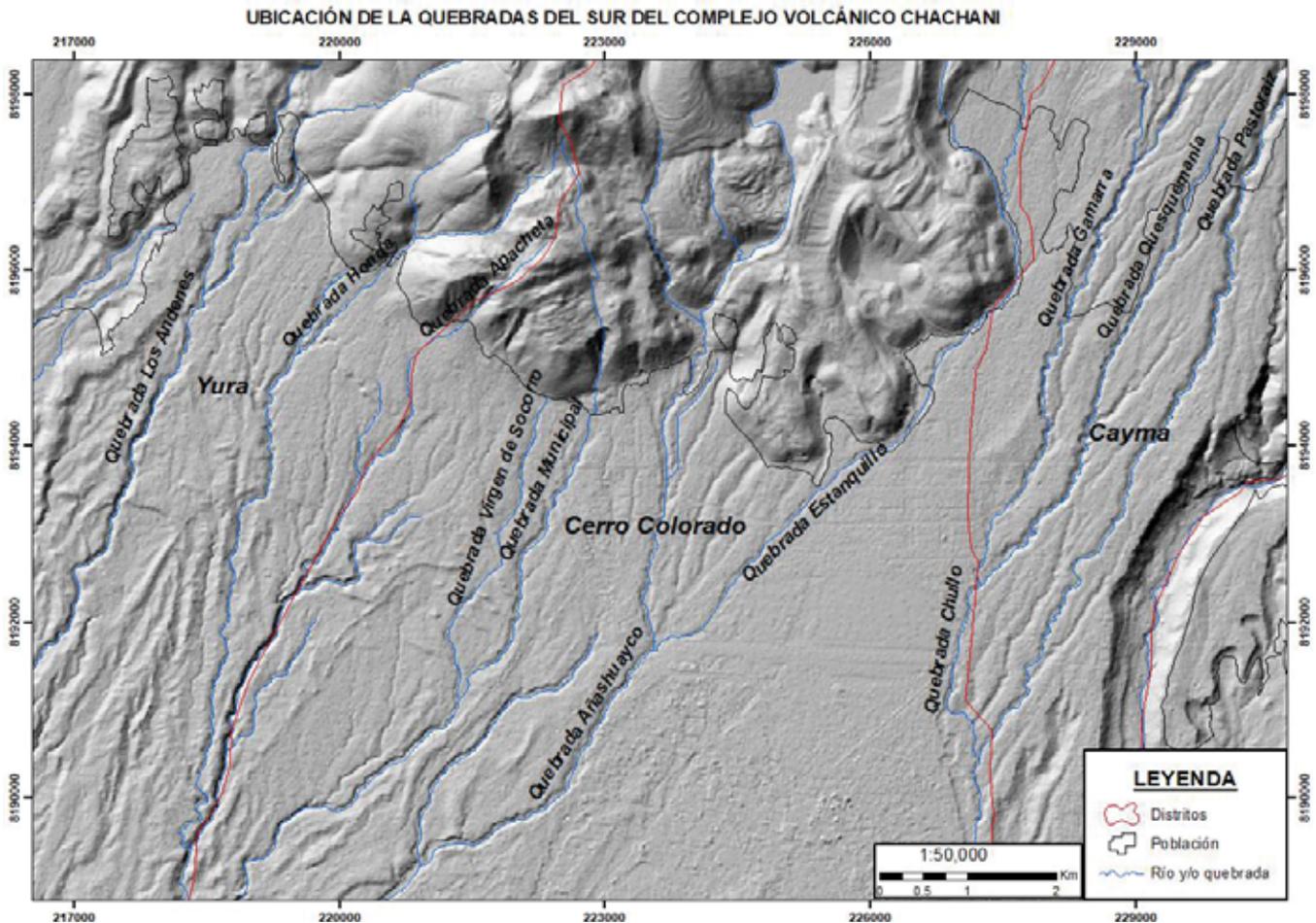
#### **4.10. Descripción de las quebradas del sur del complejo volcánico Chachani**

##### **Generalidades**

Hacia el sur del Complejo Volcánico Chachani se han identificado 11 quebradas principales, entre los que destacan: Pastoraíz, Qesquemania, Gamarra, Chullo, Estanquillo, Añashuayco, Municipal, Virgen de Socorro, Apacheta, Honda y Los Andenes; los cuales cruzan los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura. En estas quebradas afloran: la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa, secuencias volcanoclásticas, secuencias piroclásticas asociados a los volcanes Misti y Chachani, depósitos de flujo de bloques y cenizas, provenientes de los domos Potrero y Cabrería y depósitos de lahares recientes; las cuales se diferencian en espesor, extensión, textura, composición litológica y génesis.

En el trabajo de campo se han cartografiado 11 quebradas: sobre un mapa topográfico, a escala 1: 10,000 (Fig. 4.16). En la cual se realizaron perfiles estratigráficos y columnas estratigráficas en cada quebrada.

Con fines didácticos se ha realizado la descripción de cada quebrada, en la cual se presentan numerosos depósitos de lahares.



**Figura 4.16.** Ubicación de las quebradas del sur del Complejo Volcánico Chachani.

#### 4.10.1. Quebrada Pastoraíz

La quebrada Pastoraíz (Fig.4.19) está localizada en el distrito de Cayma y tiene una extensión de aproximadamente 6 km; siendo su afluente principal el domo Cabrería. Esta quebrada desemboca en la quebrada Chulfo. A lo largo de ella se observan depósitos de lahares recientes, secuencias volcanoclásticas y piroclásticas.

Los depósitos de lahares generalmente presentan espesores de 50 cm a 2.5 m. Estos depósitos se caracterizan por tener una matriz limo-arcillosa, con fragmentos de roca de forma sub angulosa a sub redondeada, con tamaños centimétricos a decimétricos. Estos fragmentos de roca, están compuestos por andesitas y dacitas porfíricas de color gris oscuro y gris claro.

Los depósitos de lahares recientes en la zona de transporte tienen un espesor promedio de 12-24 cm, son masivos y friables, con líticos angulosos que están englobados en una matriz limo-arenoso que conforman el 70% del depósito. En la zona de depositación,

estos depósitos poseen un espesor promedio de 1-2 m, son masivos y friables con fragmentos líticos que están englobados en una matriz limosa que conforma el 60 % del depósito. En esta zona de depositación, la población se encuentra asentada sobre estos depósitos. (Fotografía 4.17).



**Fotografía 4.17.** Depósito de lahar reciente en la zona de sedimentación, sobre el cual, se observa la población asentada. En la quebrada Pastoraiz.

A continuación, se describen los depósitos que afloran en dicha quebrada.

En la margen derecha de la quebrada Pastoraiz (coordenadas UTM: 19K 229454 E; 8194567 S) (Fig. 4.18) cerca de la planta de tratamiento de agua potable “Miguel de la Cuba Ibarra” se observan cinco depósitos de lahares, denominado como “A”, “B”, “D”, “E” y “F”, intercalado con un depósito de caída de pómez del Complejo Volcánico Chachani “C”. A continuación, se describen cada uno de los depósitos antes mencionadas:

Columna estratigráfica de la Quebrada Pastoraiz  
 Coordenadas UTM: 19k 229454 m E, 8194567 m S

ESPESOR (m)	AFLORAMIENTO	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
0.12 0.25			Depósito coluvial. Depósito de lahar reciente masivo y friable, presenta una matriz limo-arenoso (60%), con fragmentos de roca (40%).
1.00			Depósito de lahar masivo y compacto, compuesto por una matriz limo-arcillosa (70%) de color pardo y con fragmentos líticos (30%) de color gris oscuro y gris claro de tamaños centimétricos (15%) y decimétricos (25%).
0.60			Depósito de lahar masivo y semi-compacto, compuesto por una matriz limosa (60%) de color gris oscuro y con fragmentos líticos (40%) de color gris claro y oscuro, con tamaños centimétricos (15%) y decimétricos (25%).
0.65			Depósito de lahar masivo y compacto, compuesto por una matriz limo-arcilloso (80%) de color beige y con fragmento líticos (20%), de color gris oscuro, con tamaños centimétricos (15%) a decimétricos (5%).
2.2			Depósito de caída de pómez de color blanquecino a amarillento claro. Las pómez miden hasta 5 cm de diámetro y contienen fenocristales de plagioclasas, anfíbol y biotita.
0.7			Depósito de lahar masivo y muy compacto, compuesto por una matriz limo-arcilloso (80%) de color gris oscuro y con fragmentos de roca (20%) de color gris oscuro y claro, con tamaños centimétricos (5%) y decimétricos (15%).
1.8			Depósito de lahar masivo y compacto, compuesto por una matriz limo-arcilloso (50%) de color pardo y con fragmentos líticos (50%), de color marrón, de tamaños centimétricos (40%) a decimétricos (10%).

Figura 4.18. Columna estratigráfica, de la quebrada Pastoraiz, en la zona de transporte. Fuente: Elaboración propia.

**Depósito de lahar “A”.** Este depósito, posee un espesor promedio de 1.4 m, es masivo y compacto. Presenta una matriz limo-arcillosa (50%), de color pardo y contiene fragmentos de lava andesítica y dacítica (50%), de color gris oscuro, de forma sub angulosos a sub redondeados de tamaños menores de 42 cm de diámetro.

**Depósito de lahar “B”.** Este depósito, posee un espesor promedio de 70 cm, es masivo y muy compacto. Presenta una matriz limo-arcilloso (80%) de color gris oscuro y contiene fragmentos lávicos de composición andesítica y dacítica (20%), de color gris claro a gris oscuro de forma sub angulosas a sub redondeados con tamaños centimétricos (5%) 2-8 cm de diámetro y decimétricos (15%) 12-35 cm de diámetro.

**Depósito de caída piroclástica de pómez del Complejo Volcánico Chachani “C”.** Este depósito posee un espesor promedio de 2.2 m, compuesto por pómez de color blanquecino a amarillento claro. Las pómez miden hasta 5 cm de diámetro y presentan

fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita, englobados en una pasta de textura vesicular.

**Depósito de lahar “D”.** Este depósito, posee un espesor promedio de 60-65 cm, es masivo y compacto. Presenta una matriz limo-arcillosa (80%) de color gris claro; el cual engloba fragmentos lávicos, compuestos por andesitas y dacitas porfiríticas (20%) de forma sub angulosa a sub redondeada, de menos de 20 cm de diámetro.

**Depósito de lahar “E”.** Este depósito, posee un espesor promedio de 60 cm, es masivo y semi-compacto. Presenta una matriz limosa (60%) de color gris oscuro; el cual engloba fragmentos lávicos (40%), de forma sub angulosa a sub redondeada de tamaños centimétricos (15%) y decimétricos (25%) es decir de 15-85 cm. Los fragmentos lávicos predominantes son andesitas y dacitas porfiríticas.

**Depósito de lahar “F”.** Este depósito es masivo y compacto posee un espesor de 1.5-1.6 m. Presenta una matriz limo-arcillosa (70%) de color pardo, la cual contiene fragmentos lávicos (30%) de forma sub angulosa a sub redondeada con tamaños centimétricos (5%) y decimétricos (15%), es decir de 15 cm - 2 m. Los fragmentos lávicos están compuestos por andesitas y dacitas porfiríticas.

### **Descripción de secciones transversales en la quebrada Pastoraíz**

En campo se han levantado tres secciones transversales a lo largo de la quebrada Pastoraíz, los cuales son descritos a continuación (Fig.19).

**Sección transversal A A’:** Esta sección muestra depósitos volcanoclásticos que en total tienen un espesor promedio de 20 m. En la margen derecha de la quebrada, afloran; un depósito de lahar reciente y seis depósitos de lahar y un depósito de caída de lapilli de pómez del CVC); los cuales han sido descritos en la figura. 4.18, mientras que en la margen izquierda se observa un depósito de lahar reciente y un depósito coluvial.

**Sección transversal B B’:** Esta sección posee un espesor que varía de 15 a 20 m. En la margen derecha de la quebrada afloran; depósitos de lahares recientes, depósitos coluviales y secuencias de depósitos de lahares, mientras que en la margen izquierda afloran, depósitos de lahares recientes, depósitos coluviales y secuencias piroclásticas del CVC (un depósito de caída de escoria, dos depósitos de caída de pómez y un depósito de flujo piroclástico de pómez del volcán Chachani).

**Sección transversal de la C C’:** Esta sección posee un espesor promedio de 15 a 16 m. En la margen derecha de la quebrada afloran depósitos de lahares recientes, depósitos coluviales, mientras que en la margen izquierda afloran, un depósito de lahar reciente, un depósito coluvial y secuencia piroclástica del CVC (dos secuencias de depósitos de lahares, un depósito de caída de ceniza, un depósito de flujo piroclástica de pómez y dos depósitos de caída de pómez).

# QUEBRADA PASTORAÍZ

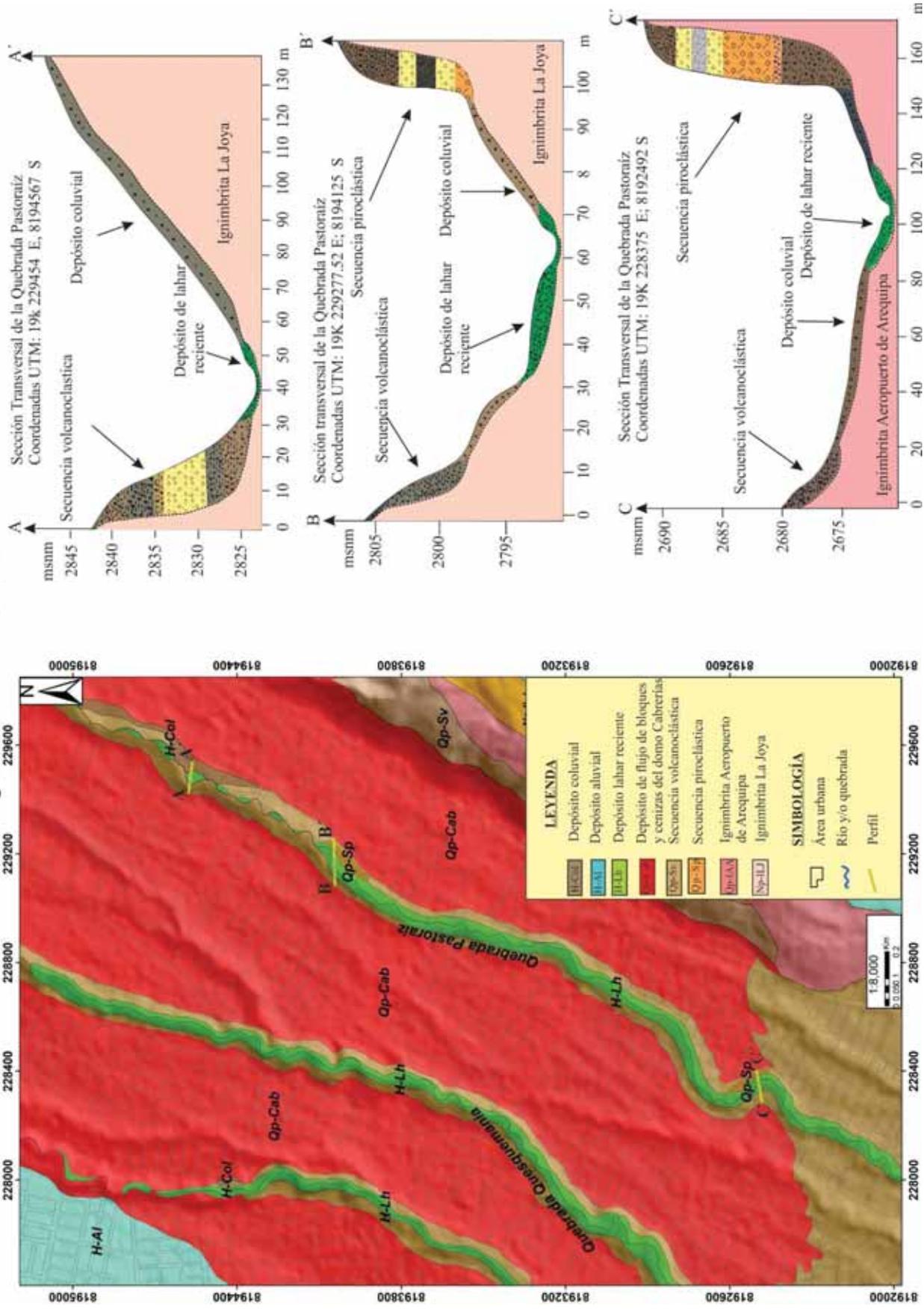


Figura 4.19. Perfiles estratigráficos: A-A', B-B' y C-C', de la quebrada Pastoraiz: Fuente: Elaboración propia.

#### 4.10.2 Quebrada Quesquemanía

La quebrada Quesquemanía (Figura 4. 22), está localizada en el distrito de Cayma y tiene una extensión de aproximadamente 5 km; siendo su afluente principal el domo Cabrería. Esta quebrada desemboca en la quebrada Chullo. A lo largo de la quebrada se observan depósitos de lahares recientes y secuencias volcanoclásticas.

Los depósitos de lahares generalmente presentan espesores de 20 cm a 1 m. Estos depósitos se caracterizan por ser masivos y compactos, con una matriz limo-arcillosa, con fragmentos lávicos de forma sub angulosa a sub redondeada, de tamaños centimétricos a decimétricos.

Los depósitos de lahares recientes en la zona de transporte, tienen un espesor promedio de 15-60 cm (Fotografía 4.20), son masivos y friables, con una matriz arena-limoso (60%), la cual engloba fragmentos lávicos (40%), de forma sub angulosa a sub redondeado, de tamaños centimétricos (30%) y decimétricos (10%), Mientras que en la zona de depositación, los depósitos de lahares recientes presentan espesores de 1 a 2 m, y se caracterizan por ser masivos y semi compactos, con una matriz limoso (60%) de color gris oscuro, la cual engloba fragmentos lávicos (60%), de forma sub anguloso a sub redondeado, con tamaños centimétricos (30%) a decimétricos (20%). Cabe señalar que en la zona de depositación, la población se ha asentado, sobre estos depósitos, dejando el cauce de la quebrada muy angosto.



**Fotografía 4.20.** Depósito de lahar reciente de 35 cm, visible en la quebrada Quesquemanía, en la zona de transporte.

A continuación, se describen los depósitos que afloran en dicha quebrada.

En la margen derecha de la quebrada Quesquemanía (coordenadas UTM: E: 229187; S: 8195800) (Fig. 4.21) se distinguen tres depósitos de lahares: “A”, “C” y “D” y un depósito de caída de lapilli de pómez del Complejo Volcánico Chachani, denominado “B”. A continuación, se describen cada uno de estos depósitos:

**Columna estratigráfica de la Quebrada Quesquemanía**  
Coordenadas UTM: 229053 m E; 8195657 m S

ESESOR (m)	AFLORAMIENTO	LITOLÓGIA	DESCRIPCIÓN
0.15 0.15 0.30			Depósito coluvial
			Depósito aluvial
			Depósito de lahar reciente masivo y friable, compuesto por una matriz limo-arenoso (60%) y con fragmento líticos (40%).
1.8			Depósito de lahar, masivo y muy compacto, presenta una matriz limo-arcilloso (70%) de color marrón y con fragmentos lávicos (30%), de color gris oscuro, de forma sub anguloso a sub redondeada, con tamaños centimétricos (15%) a decimétricos (15%).
3.8			Depósito de lahar masivo y muy compacto, presenta por una matriz limo-arcilloso (80%) de color beige, con fragmentos líticos (20%), de color gris oscuro y gris claro, de forma angulosa a sub angulosa, con tamaños centimétricos (5%), decimétrico (10%) y métrico (5%). Estos fragmentos están compuestos por andesitas y dacitas porfiritica y afaníticas.
1.6			Depósito de caída de pómez de color blanquecinas a amarillento claro. Las pómez miden hasta 8 cm de diámetro y contiene fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita.
1.1			Depósito de lahar masivo y compacto, presenta una matriz limo-arenosa (50%) de color beige y con fragmentos líticos (50%), color gris oscuro, de tamaños centimétricos (30%) a decimétrico (20%).

**Figura 4.21.** Columna estratigráfica de la quebrada Quesquemanía en la zona de transporte.

Fuente: Elaboración propia

**Depósito de lahar “A”.** Este depósito, posee un espesor promedio de 1.1 m, es masivo y poco compacto. Presenta una matriz limo-arenoso (50%) de color beige, el cual contiene fragmentos lávicos, de composición andesítica y dacítica porfiriticas y afaníticas (50%), que tienen forma sub angulosa a angulosa, con tamaño menores a 48 cm.

**Depósito de caída piroclástica de lapilli de pómez del CVC “B”.** Este depósito posee un espesor promedio de 2.2 m, y está compuesta por pómez de color blanquecinas. Se caracteriza por ser homogéneo y bien sorteado. Las pómez presentan fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita englobados en una pasta de textura vesicular.

**Depósito de lahar “C”.** Este depósito posee un espesor promedio de 3.8 m, es masivo y muy compacto. Presenta una matriz limo-arcillosa (80%) de color beige que contiene fragmentos lávicos, de composición andesíticas y dacíticas, porfíricas y afáníticas (20%) de forma angulosa a sub angulosa, de color gris oscuro, de tamaños centimétricos (10%) a decimétricos (5%) es decir de 13-40 cm y métrico (5%) 1.1 m.

**Depósito de lahar “D”.** Este depósito posee un espesor promedio de 1.8 m, es masivo y muy compacto. Presenta una matriz limos arcillosa (70%) de color marrón, la cual contiene fragmentos lávicos de composición andesítica y dacítica, porfírica (30%) de forma sub redondeada a sub angulosa de color gris oscuro, con tamaños centimétricos (15%) y decimétricos (15%), es decir de tamaños de 12-50cm.

### **Descripción de secciones transversales en la quebrada Quesquemania**

En campo se han levantado tres secciones transversales a lo largo de la quebrada Quesquemania, los cuales son descritos a continuación.

**Sección transversal D D’.** Esta sección posee un espesor que varía de 15-18 m. En la margen derecha de la quebrada afloran; un depósito de lahar reciente y una secuencia volcanoclástica (depósitos de lahares y un depósito de caída de pómez del Complejo Volcánico Chachani); los cuales son descritos en la Figura 4.21, mientras que en la margen izquierda se observan, un depósito de lahar reciente y un depósito coluvial.

**Sección transversal E E’.** Esta sección posee un espesor que varía de 15 a 20 m. En ambos extremos de la quebrada afloran; depósitos de lahares recientes y secuencias volcanoclásticas constituidas por depósitos de lahares y un depósito de caída de pómez del Complejo Volcánico Chachani.

**Sección transversal de la F F’.** Esta sección posee un espesor que varía de 4 a 6 m. En la margen derecha de la quebrada afloran un depósito coluvial y un depósito de lahar reciente, mientras que en la margen izquierda afloran un depósito de lahar reciente y una secuencia volcanoclástica (depósitos de lahares y un depósito de flujo piroclástico de pómez del Complejo Volcánico Chachani).

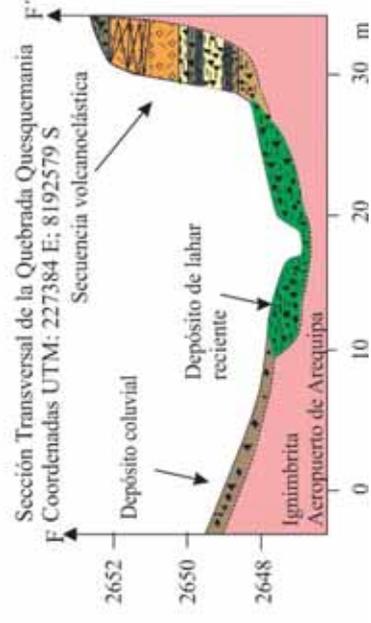
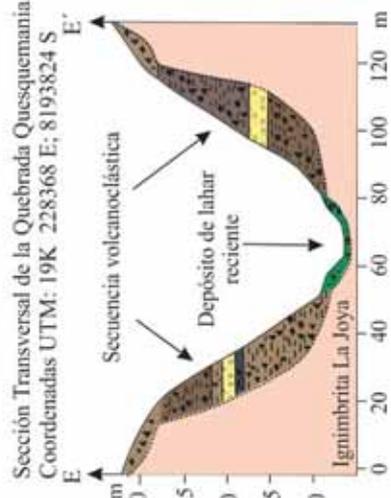
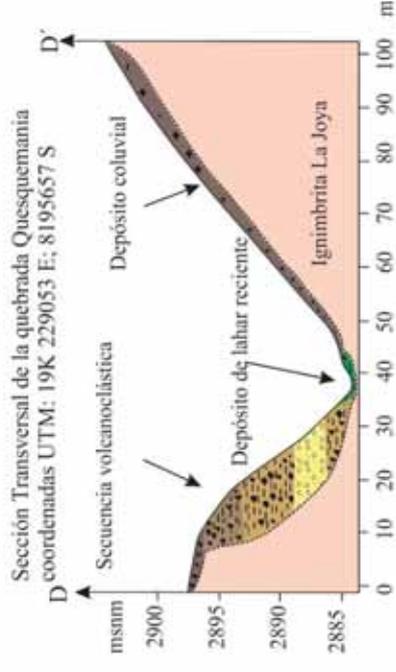
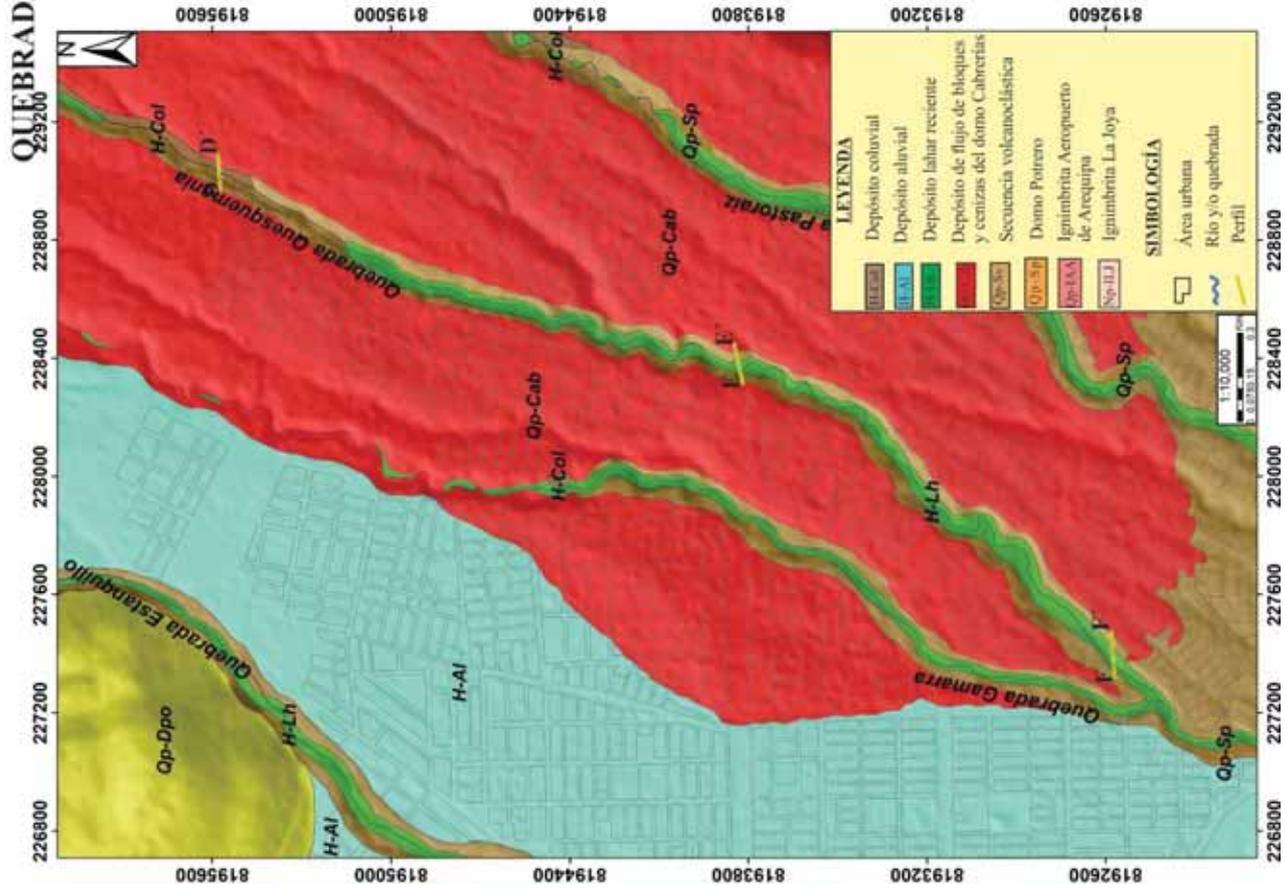


Figura 4.22 . Perfiles estratigráficos: D-D', E-E' y F-F', de la quebrada Quesquemania. Fuente: Elaboración propia

### 4.10.3 Quebrada Gamarra

La quebrada Gamarra (Fig. 4. 25), está localizada en el distrito de Cayma y tiene una extensión aproximada de 5 km; siendo su afluente principal el domo Cabrería y el volcán Chachani. Esta quebrada desemboca en la quebrada Chullo. En ambos márgenes de la quebrada se observa un depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas “domo Cabrería”, datado en  $56.5 \pm 31.6$  ka (Aguilar, 2015), así como una secuencia volcanoclástica, depósitos coluviales y depósitos de lahares recientes.

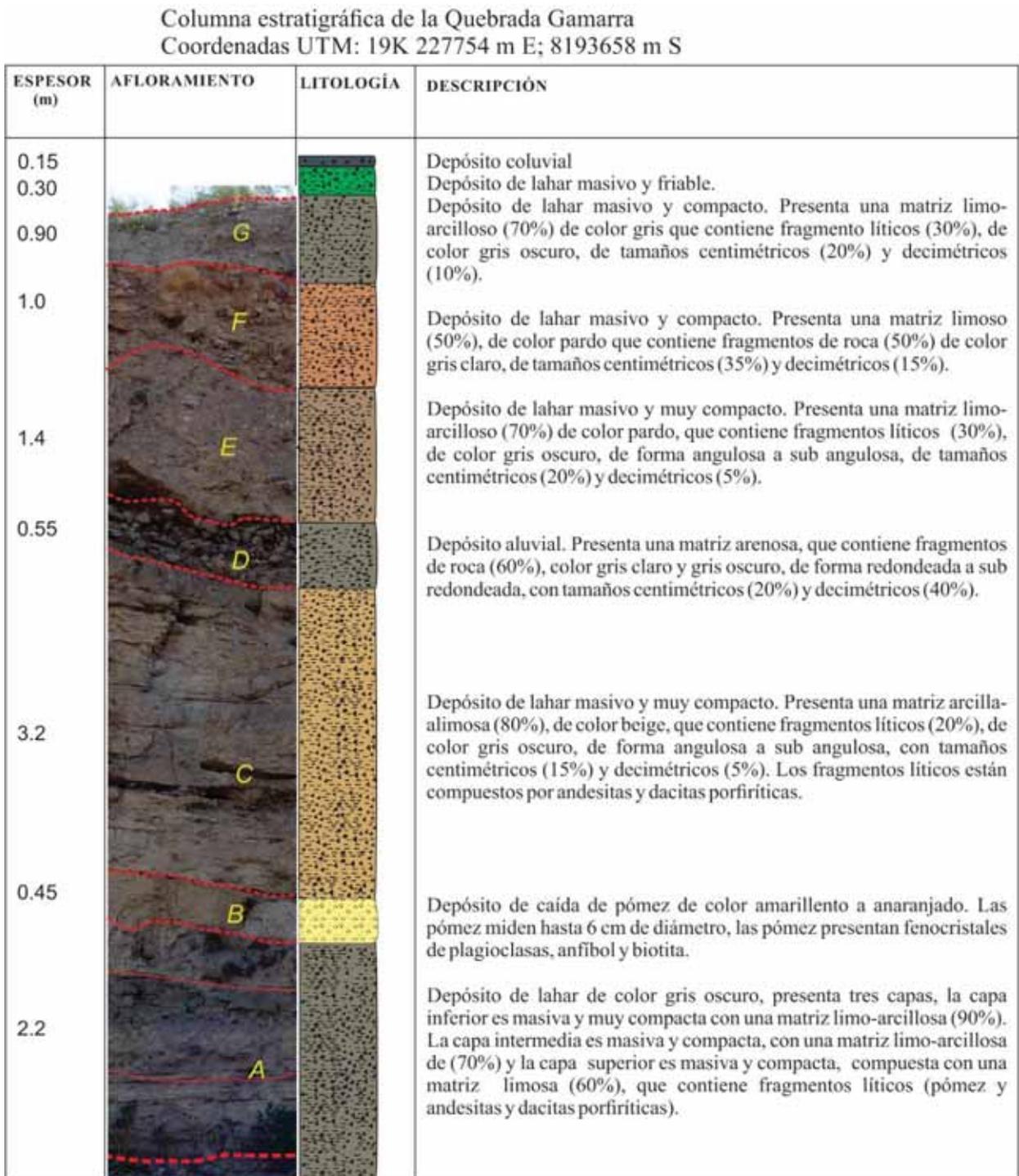
Los depósitos de lahares, a lo largo de la quebrada, presentan espesores de 50 cm a 1.8 m y se caracterizan generalmente por ser masivos y muy compactos. Estos depósitos tienen una matriz limo-arcillosa, la cual contiene fragmentos de lava de forma sub angulosa a sub redondeada, de tamaños centimétricos a decimétricos. Estos fragmentos de lava son de composición andesítica y dacítica porfíricas.

Los depósitos de lahares recientes en la zona de transporte (Fotografía 4.23) presentan un espesor promedio de 15-80 cm; las cuales se caracterizan por ser masivos y friables, con una matriz limo-arenoso (90%), la cual contiene fragmentos lávicos de composición andesíticas y dacíticas porfíricas (10%), de forma sub angulosa a sub redondeada, de tamaños centimétricos (8%) y decimétricos (2%). Por otro lado, en la zona de depositación, estos depósitos presentan un espesor que varía de 80 cm a 2 m, y se caracterizan por ser masivo y semi-compacto, constituidos por una matriz limoso, que engloban fragmentos líticos, de forma sub angulosa a sub redondeada, de tamaños centimétricos y decimétricos.



**Fotografía 4.23.** Depósito de lahar reciente, de 30 cm de espesor en la zona de depositación. En la quebrada Gamarra

En la margen derecha de la quebrada Gamarra (coordenadas UTM: E: 227754; S: 8193658) (Fig. 4.24) se distinguen cinco depósitos de lahar denominados como: “A”, “C”, “E”, “F” y “G”, un depósito de caída piroclástica de pómez del Complejo Volcánico Chachani “B” y un depósito aluvial “D”. A continuación, se describe cada uno de los depósitos antes mencionados.



**Figura 4.24.** Columna estratigráfica, de la quebrada Gamarra, en la zona de depositación.

Fuente: Elaboración propia

**Depósito de lahar “A”.** Este depósito, posee un espesor promedio de 2.2 m; la cual presenta tres capas, la capa inferior es masiva y muy compacta con una matriz limo-arcillosa (90%) de color gris oscuro; el cual engloba fragmentos lávicos (10%), color gris oscuro, de forma angulosa a sub angulosa, con tamaños centimétricos. La capa intermedia es masiva y muy compacta, con una matriz limo-arcilloso (70%), de color gris oscuro; el cual engloba fragmentos lávicos (30%) de color oscuro, de tamaños centimétricos (25%) 2-8 cm y decimétricos (5%) 11-15 cm. La capa superior es masiva y compacta, compuesta por una matriz limosa (60%) de color gris oscuro, que contiene fragmentos lávicos (caídas de lapilli de pómez, andesitas de color oscuro) de tamaños centimétricos (45%) 1- 5 cm y decimétricos (15%) 11-20 cm. Estos fragmentos lávicos están compuestos por andesitas y dacitas porfíricas.

**Depósito de caída de lapilli de pómez del Complejo Volcánico Chachani “B”.** Este depósito posee un espesor promedio de 45 cm y está compuesto de pómez de color amarillenta. La pómez mide hasta 6 cm de diámetro. Existen escasos fragmentos lávicos, las pómez presentan fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita englobados en una pasta de textura vesicular. El depósito se muestra bien sorteado.

**Depósito de lahar “C”.** Este depósito posee un espesor que varía de 2-2.5 m, es masivo y muy compacto, presenta una matriz arcilla-limosa (80%) de color beige, con fragmentos lávicos (20%), de color gris oscuro y gris claro, que tienen forma angulosa a sub angulosa, de tamaños centimétricos (15%) 1-4 cm y decimétricos (5%) 11-25 cm. Los fragmentos lávicos tienen composición andesítica y dacita, textura porfírica y de color gris.

**Depósito aluvial “D”.** Este depósito posee un espesor de 55 cm, se caracteriza por presentar una matriz arenosa, con fragmentos líticos monolitológicos (60%), de forma redondeada a sub redondeada, con tamaños centimétricos (20%) 5-9 cm a decimétricos (40%) 15-10 cm.

**Depósito de lahar “E”.** Este depósito posee un espesor que varía entre 1-1.5 m, es masivo y muy compacto. Presenta una matriz limo-arcilloso (60-70%) de color pardo, la cual engloba fragmentos lávicos (30-40%), de color gris oscuro, que tienen forma angulosa a sub angulosa, de tamaños centimétricos (25%) 2-10 cm a decimétricos (5%) 11-20 cm. Los fragmentos lávicos tienen composición andesítica y dacita, y textura porfírica.

**Depósito de lahar “F”.** Este depósito posee un espesor que varía entre 60-70 cm, es masivo y compacto. Presenta una matriz limosa (50%) de color pardo, la cual engloba fragmentos líticos lávicos (50%), color gris oscuro, de tamaños centimétricos (20%) a decimétricos (30%) de forma sub angulosa a sub redondeada. Los fragmentos lávicos tienen composición andesítica y dacita, textura porfírica y de color gris.

**Depósito de lahar “G”.** Este depósito posee un espesor que varía entre 80 cm-1 m, es masivo y compacto. Presenta una matriz limo-arcilloso (70%) de color gris, la cual contienen fragmentos lávicos (30%) de forma sub angulosa a sub redondeada, de tamaños centimétricos 20% a decimétricos 10% 12-40cm.

### **Descripción de las secciones transversales de la quebrada Gamarra**

En campo se han levantado tres secciones transversales a lo largo de la quebrada Gamarra, los cuales son descritos a continuación.

**Sección transversal G G’.** Esta sección posee un espesor que varía entre 16 y 18 m. En la margen derecha de la quebrada, aflora un depósito de flujo de bloques y cenizas “domo Cabrerías”, mientras que en la margen izquierda se observan depósitos de lahares antiguos y recientes.

**Sección transversal H H’.** Esta sección posee un espesor que varía entre 12 a 14 m. En la margen derecha de la quebrada afloran: un depósito de lahar reciente y una secuencia volcanoclástica (seis depósitos de lahar y un depósito de caída de pómez del CVC); el cual ha sido descrito en figura 4.24, mientras que en la margen izquierda afloran un depósito de lahar reciente y secuencia de depósitos de lahares.

**Sección transversal de la I I’.** Esta sección posee un espesor que varía entre 7 a 10 m. En la margen derecha de la quebrada afloran: un depósito de lahar reciente y secuencia volcanoclástica (tres depósitos de lahar y un depósito de caída de lapilli de pómez del Complejo Volcánico Chachani), mientras que en la margen izquierda afloran: un depósito de lahar reciente y depósito coluvial.

# QUEBRADA GAMARRA

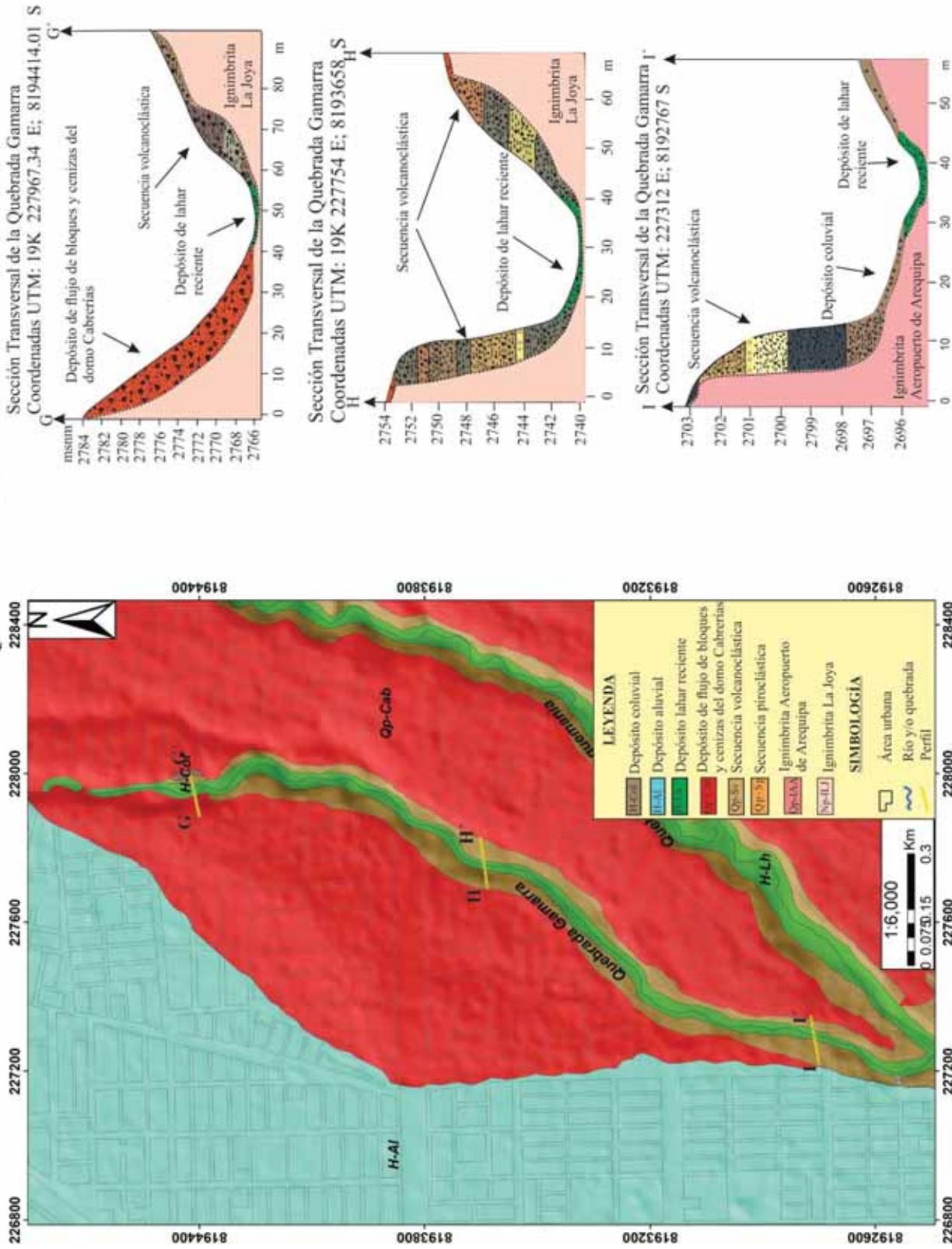


Figura 4.25. Perfil estratigráfico de la quebrada Gamarra. Fuente: Elaboración propia

#### 4.10.4 Quebrada Chullo

La quebrada Chullo (Fig. 4. 28), está localizada en el distrito de Cayma y tiene una extensión aproximada de 4 km; siendo sus afluentes principales las quebradas: Gamarra, Quesquemania y Pastoraíz. A lo largo de ella afloran: depósitos de lahares recientes, secuencias volcanoclásticas y piroclásticas.

Los depósitos de lahares generalmente presentan espesores de 20 cm a 1 m. Estos depósitos se caracterizan por ser masivos y compactos, con una matriz limo-arcillosa, la cual engloba fragmentos de roca de forma sub angulosa a sub redondeada, de tamaños centimétricos a decimétricos. Los fragmentos lávicos tienen composición andesítica y dacita, y textura porfirítica.

Los depósitos de lahares recientes en la zona de transporte (Fotografía 4.26) presentan un espesor que varía entre 11 a 50 cm, es masivo y friable, con matriz soportado con (50%), con fragmentos lávicos (40%), y residuos sólidos (plásticos, botellas, etc.) (10%). En la zona de depositación, estos depósitos presentan un espesor promedio de 50 cm a 2.5 m; las cuales se caracterizan por ser masivos y semi compactos, con matriz limoso y con fragmentos lávicos de forma anguloso a sub angulosa, con tamaños centimétricos a decimétricos. Cabe señalar que sobre esta zona la quebrada se encuentra bien canalizada con un ancho de 5 m.



**Fotografía 4.26.** Depósito de lahar reciente, de 30 cm de espesor, en la zona de depositación. Quebrada Chullo

A continuación, se describen los depósitos que afloran en dicha quebrada.

En la margen derecha de la quebrada Chullo (coordenadas UTM: E: 226998; S: 8191695) (Fig. 4.27). Se observan dos depósitos de lahar “D” y “E”, emplazado sobre los depósitos de: caída de pómez “C”, caída de escoria “B” y flujo piroclástico de pómez del Complejo Volcánico Chachani “A”. A continuación, se describen cada uno de estos depósitos:

**Columna estratigráfica de la Quebrada Chullo**  
Coordenadas UTM: 19K 227093 m E; 8192273 m S

ESPESOR (m)	AFLORAMIENTO	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
0.10 0.12 0.25 0.20			Depósito coluvial Depósito aluvial Depósito de lahar masivo y friable, compuesto por una matriz limoso-arenoso. Depósito de lahar masivo y compacto, que presenta una matriz limosa.
1.2			Depósito de lahar masivo y compacto, compuesto por una matriz limo-arcillosa (65%), de color gris claro, con fragmentos lávicos (35%), de forma sub angulosa a sub redondeada, con tamaños centimétricos (20%) a decimétricos (15%).
0.62			Depósito de caída de pómez, de color amarillento a anaranjado, rico en líticos oxidados. Las pómez miden hasta 5 cm de diámetro, y contienen cristales de biotita y plagioclasa.
0.70			Depósito de caída de escoria de color negro a gris oscuro, con presencia de líticos de 30%. Las escorias miden hasta 4 cm y contienen cristales de plagioclasa y clinopiroxeno.
1.2			Depósito de flujo piroclástico de pómez de color anaranjado. Las pómez miden de 1-5 cm de diámetro, de forma redondeada a sub redondeada, que contienen cristales de biotita, plagioclasa y anfíbol.

**Figura 4.27.** Columna estratigráfica, de la quebrada Chullo, en la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia

**Depósito de flujo piroclástico de pómez del Complejo Volcánico Chachani “A”.** Este depósito posee un espesor promedio de 1.2 m. Las pómez presentan color anaranjado, con tamaños que varían de 1-5 cm, de forma redondeada a sub redondeada y contiene cristales de biotita, plagioclasa y anfíbol. El depósito presenta un aligera imbricación.

**Depósito de caída piroclástica de escoria del Complejo Volcánico Chachani “B”:** Este depósito posee un espesor de 70 cm. Las escorias son de color negro a gris oscuro, con presencia de fragmentos líticos de 30%, que miden hasta 4 cm y contienen cristales de plagioclasa y clinopiroxeno.

**Depósito de caída piroclástica de pómez del Complejo Volcánico Chachani “C”:** Este depósito posee un espesor de 62 cm. Presenta pómez de color amarillento a anaranjado,

rico en líticos oxidados. Estas presentan tamaños menores a 5 cm de diámetro, con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. El depósito se muestra bien sorteado.

**Depósito de lahar “D”:** Este depósito posee un espesor promedio de 1.2 m, es masivo y compacto. Presenta una matriz limo-arcillosa (65%) de color gris claro y con fragmentos lávicos (35%) de color gris oscuro y claro, de forma sub angulosa a sub redondeada con tamaños centimétricos (20%) 5-8 cm a decimétricos (15%) 11-40cm. Los fragmentos lávicos presentan una composición andesita y dacita porfiríticas.

**Depósito de lahar “E”:** Este depósito posee un espesor de 25 cm. Es masivo y compacto, presenta una matriz limosa (75%) de color pardo, con fragmentos lávicos (25%), de color gris claro, de forma sub angulosa a sub redondeada, con tamaños centimétricos (20%) a decimétricos (5%) 11-15 cm. Estos fragmentos lávicos son de composición andesita y dacita porfiríticas.

### **Descripción de las secciones transversales de la quebrada Chullo**

En campo se han levantado tres secciones transversales a lo largo de la quebrada Chullo, los cuales son descritos a continuación.

**Sección transversal J J’:** Esta sección posee un espesor que varía de 7 a 9 m. En la margen derecha de la quebrada aflora: un depósito de lahar reciente, un depósito coluvial y secuencia piroclástica (un depósito de flujo piroclástica de pómez del CVC, dos depósitos de caídas de escoria del CVC, un depósito de caída de pómez del CVC y dos secuencias de depósito de lahar); la cual ha sido descrito en la figura 4.27, mientras que en la margen izquierda afloran: un depósito coluvial, un depósito de lahar reciente y secuencia volcanoclástica (tres secuencias de depósitos de lahar y un depósito de caída de pómez del CVC).

**Sección transversal K K’:** Esta sección posee un espesor que varíade 10 a 13 m. En la margen derecha de la quebrada afloran: un depósito coluvial, un depósito de lahar reciente y secuencia de depósitos de lahares, mientras que en la margen izquierda afloran: un depósito coluvial, un depósito de lahar reciente y una secuencia volcanoclástica (nueve secuencias de depósitos de lahar, dos depósitos de caída de pómez del CVC y un depósito de caída de escoria del CVC).

**Sección transversal de la L L’:** Esta sección posee un espesor que varía de 13 a 15 m. En la margen derecha de la quebrada aflora una secuencia piroclástica del Complejo Volcánico Chachani (un depósito de caída de pómez, un depósito caída de ceniza, un depósito de flujo piroclástico de pómez y un depósito de lahar), mientras que en la margen izquierda de dicha quebrada aflora, un depósito coluvial y un depósito de lahar reciente

# QUEBRADA CHULLO

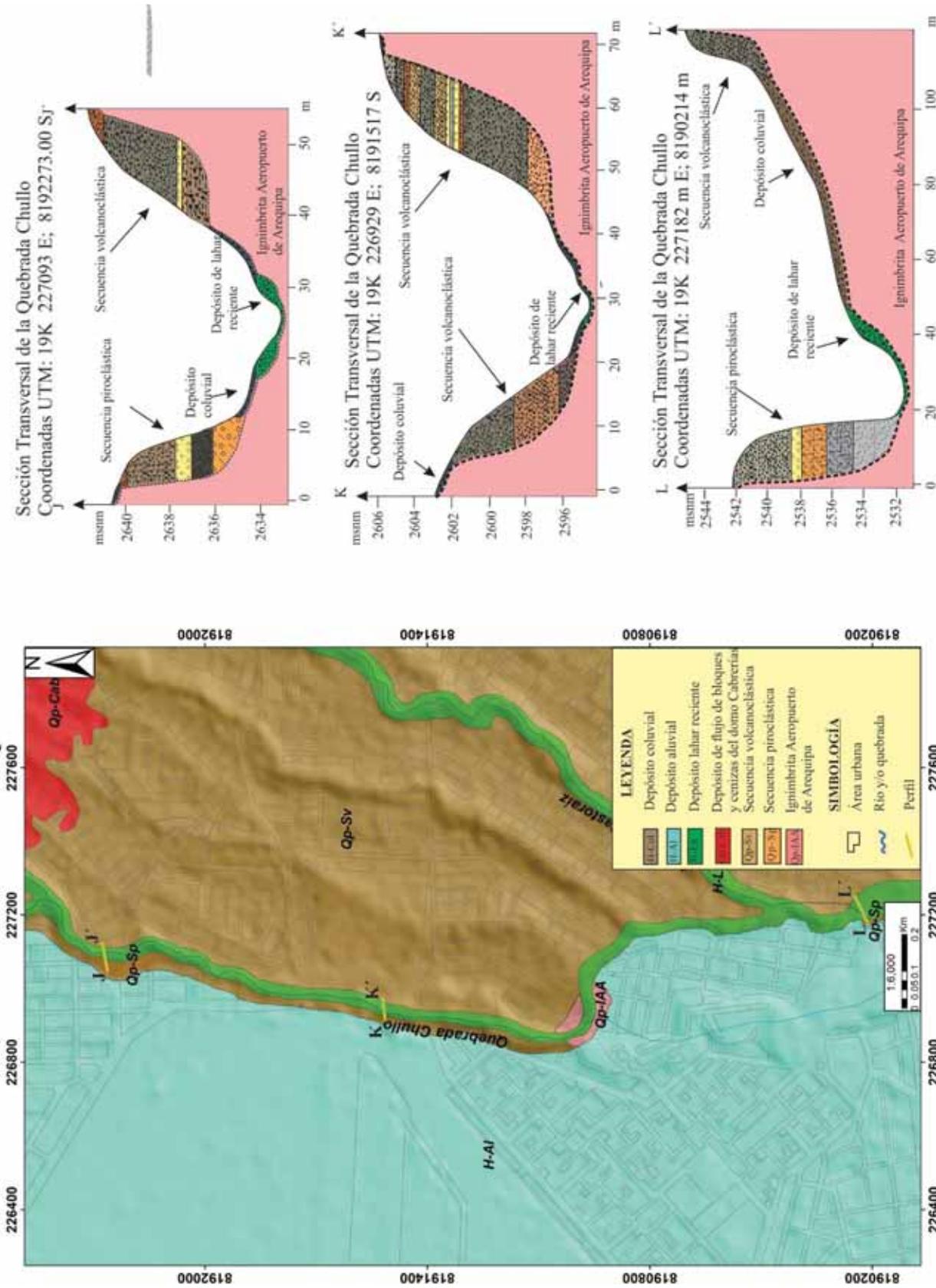


Figura 4.28. Perfiles estratigráficos: J-J', K-K' y L-L', de la quebrada Chullo. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.10.5. Quebrada Estanquillo

La quebrada Estanquillo (Fig. 4. 31), está localizada en el distrito de Cerro Colorado y tiene una extensión aproximadamente 7 km; siendo su afluente principal el volcán Chachani. Esta quebrada desemboca en la quebrada Añashuayco. A lo largo de ella afloran: secuencias volcanoclásticas, depósitos aluviales, depósitos de caída de pómez del volcán Misti y depósitos de lahares reciente. El depósito de caída de pómez “Sacarosa” del volcán Misti, fue datados en  $33.7 \pm 277$  Ka Cuno, (2018).

Los depósitos de lahares, en la zona de transporte, presentan de dos a seis secuencias de depósitos de lahares, con espesores de 50 cm a 2. 5 m; las cuales se encuentran intercalado con depósitos aluviales. Los depósitos de lahares se caracterizan por ser masivos y compactos, con matriz limo-arcillosa. Presentan fragmentos de roca de forma angulosa a sub redondeada de tamaños centimétricos a metricos.

Los depósitos de lahares en la zona de depositación, presentan de dos a ocho secuencias de depósitos de lahares, con espesores de 10 a 80 cm; las cuales se encuentran intercalado con depósitos de caídas del volcán Misti. Estos depósitos de lahares se caracterizan por ser masivos y compactos con fragmentos de roca de forma sub angulosa a sub redondeada, de tamaños centimétricos a decimétricos.

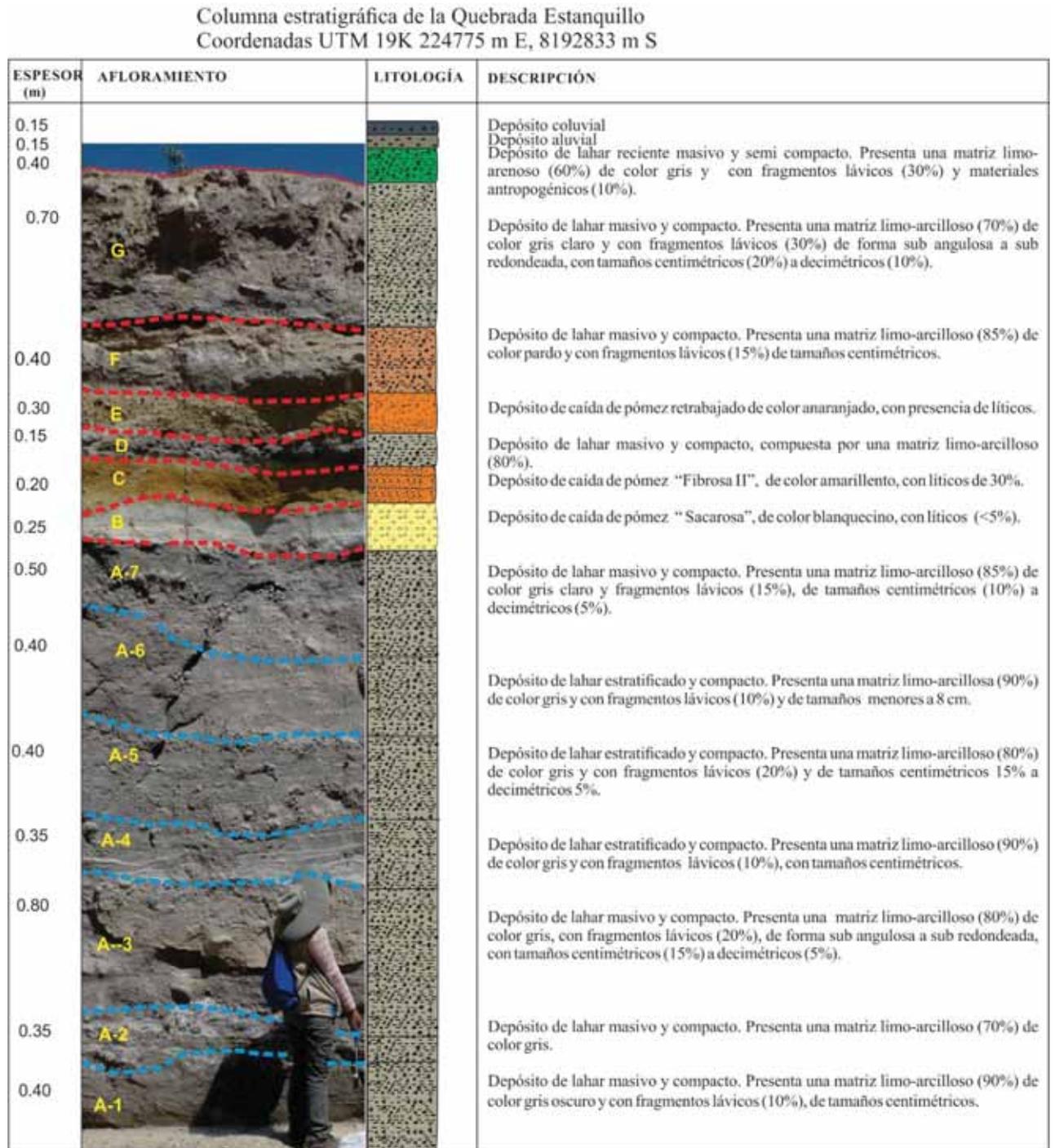
Los depósitos de lahares recientes en la zona de transporte, presentan un espesor que varía de 15-80 cm. Estos depósitos son masivos y semi compactos, con fragmentos lávicos angulosos a sub angulosos; las cuales están englobados en una matriz limo-arenoso que conforma el 60% del depósito. En la zona de depositación, estos depósitos presentan espesores promedios de 50 cm a 1.5 m. Estos depósitos son masivos y semi compactos con fragmentos líticos compuestos por materiales antropogénicos como: plásticos, botellas, etc.; los cuales están englobados en una matriz limosa que conforma el 65% del depósito (Fotografía 4.29). Cabe señalar en la zona de sedimentación, la población ha llegado asentarse sobre estos depósitos e incluso rellenaron las quebradas, para poder construir sus viviendas.



**Fotografía 4.29** Depósito de lahar reciente de 90cm de espesor, en la quebrada Estanquillo

A continuación, se describen los depósitos que afloran en dicha quebrada.

En la margen derecha de la quebrada Estanquillo (Coordenadas UTM: E: 224851.26; S: 8192960.59) (Fig. 4.30). Se observan cuatro depósitos de lahares: “A”, “D”, “F” y “G” y tres depósitos de caídas de téfras del volcán Misti: “B”, “C” y “E”. El depósito de lahar “A” se encuentra estratificado con siete niveles de lahares. A continuación, se describen cada uno de los depósitos.



**Figura 4.30.** Columna estratigráfica de la quebrada Estanquillo, en la zona de deposición.

Fuente: Elaboración propia

**Depósito de lahar “A”:** Este depósito de lahar presenta un color gris y se aprecia una estratificación ondulada, donde se distinguen siete niveles principales. A continuación, se describen cada uno de estos niveles:

**Depósito de lahar A-1:** Este depósito, posee un espesor promedio de 40 cm, es masivo y compacto. Presenta una matriz limo-arcilloso (90%) de color gris oscuro, con fragmentos lávicos (10%), de forma sub anguloso a sub redondeado, con tamaños menores 10 cm. Estos fragmentos lávicos son de composición andesítica y dacítica porfíricas.

**Depósito de lahar A-2:** Este depósito, posee un espesor promedio de 35 cm, es masivo y compacto. Presenta una matriz limo-arcilloso (70%) de color gris, con fragmentos lávicos (30%), que tienen forma sub angulosa menores a 15 cm. Los fragmentos lávicos están compuestos por andesitas y dacitas porfíricas.

**Depósito de lahar A-3:** Este depósito, posee un espesor promedio de 80 cm, es masivo y compacto. Presenta una matriz limo-arcilloso (80%) de color gris, con fragmentos lávicos (20%), que tienen forma sub angulosa, de tamaños centimétricos (15%) 2-5 cm y decimétricos (5%) 11-14 cm de diámetro. Los fragmentos lávicos son de composición andesítica y dacítica porfíricas.

**Depósito de lahar A-4:** Este depósito, posee un espesor de 35 cm, es masivo y compacto. Presenta una matriz limo-arcilloso (90%) de color gris, con fragmentos lávicos (10%), que tienen forma sub angulosa a angulosa, de tamaños menores a 7 cm. Los fragmentos lávicos son de composición andesítica y dacítica.

**Depósito de lahar A-5:** Este depósito, es estratificado y compacto, posee un espesor promedio de 40 cm. Presenta una matriz limo-arcilloso (80%), de color gris claro y fragmentos lávicos (20%), de forma sub angulosa a sub redondeada. Estos fragmentos, presentan tamaños centimétricos (15%) 3-6 cm a decimétricos (5%) 11-15 cm.

**Depósito de lahar A-6:** Este depósito de lahar es estratificado y compacto, posee un espesor promedio de 40 cm. Presenta matriz soportado limo-arcilloso (90%) de color gris y con fragmentos lávicos (10%) de forma sub angulosa a sub redondeada con tamaños centimétricos menores a 8 cm. Los fragmentos lávicos son de composición andesítica y dacítica.

**Depósito de lahar A-7:** Este depósito, posee un espesor promedio de 50 cm. Presenta matriz soportado limo-arcilloso (85%), de color gris y con fragmentos lávicos (15%) de forma sub angulosa a angulosa, de tamaños centimétricos (10%) 2-8 cm a decimétricos (5%) 11-15cm. Los fragmentos lávicos están compuestos por andesitas y dacitas porfíricas.

**Depósito de caída de pómez (Sacarosa) del volcán Misti “B”:** Este depósito, posee una granulometría bien gradada. Las pómez son de color blanquecino, con fenocristales de biotita, plagioclasa y anfíbol. Este depósito presenta escasamente líticos.

**Depósito de caída pómez (Fibrosa II) del volcán Misti “C”:** Este depósito, presenta un espesor promedio de 20 cm. Las pómez se encuentran retrabajadas, de color amarillento, con fenocristales de biotita, plagioclasa y anfíbol. Este depósito presenta líticos de 30%.

**Depósito de lahar “D”:** Este depósito, posee un espesor promedio de 15 cm, es masivo y compacto. Presenta fragmentos lávicos de forma sub angulosa a sub redondeada de tamaños centimétricos. Los fragmentos lávicos están englobados en una matriz limo-arcillosa que conforma el 80 % del depósito. Estos fragmentos lávicos están compuestos por andesitas y dacitas porfiríticas.

**Depósito de caída de pómez retrabajado “E”:** Este depósito, posee un espesor promedio de 30 cm. La pómez se encuentra retrabajada, son de color anaranjado, con fenocristales de biotita, plagioclasa y anfíbol. Los fragmentos líticos representan el 50% del depósito.

**Depósito de lahar “F”:** Este depósito, posee un espesor promedio de 40 cm, es masivo y compacto. Presenta una matriz limo-arcilloso (85%) de color pardo, con fragmentos lávicos monolíticos (15%), que tienen forma sub angulosa a sub redondeada de tamaños menores a 3cm. Estos fragmentos lávicos son de composición andesítica y dacítica.

**Depósito de lahar “G”:** Este depósito, posee un espesor que varía de 70 cm, es masivo y compacto. Presenta una matriz limo-arcilloso (70%) de color gris claro, con fragmentos lávicos (30%), de forma sub angulosa a sub redondeada de tamaños centimétricos (20%) y decimétricos (10%) 11-30cm. Estos fragmentos lávicos son de composición andesítica y dacítica.

### **Descripción de las secciones transversal en la quebrada Estanquillo**

En campo se han levantado tres secciones transversales a lo largo de la quebrada Estanquillo, los cuales son descritos a continuación.

**Sección transversal M M’:** Esta sección posee un espesor que varía de 8 a 9 m. En la margen derecha de la quebrada afloran, domo Potrero, un depósito de lahar reciente y un depósito coluvial, mientras que en la margen izquierda afloran una secuencia de depósitos de lahares.

**Sección transversal N N’:** Esta sección posee un espesor que varía de 8 a 9 metros. En ambos extremos de la quebrada afloran secuencias volcanoclásticas (secuencias de depósito de lahar y un depósito de caída de pómez del volcán Misti).

**Sección transversal de la O O’:** Esta sección posee un espesor que varía de 7 a 9 m. En la margen derecha de la quebrada aflora una secuencia volcanoclástica (nueve secuencias de depósitos de lahar y dos depósitos de caídas de pómez “Sacarosa y Fibrosa superior del volcán Misti); las cuales ha sido, descritas en la figura 4.30, mientras que en la margen izquierda de la quebrada afloran, un depósito de lahar reciente y una secuencias de depósitos de lahares.

# QUEBRADA ESTANQUILLO

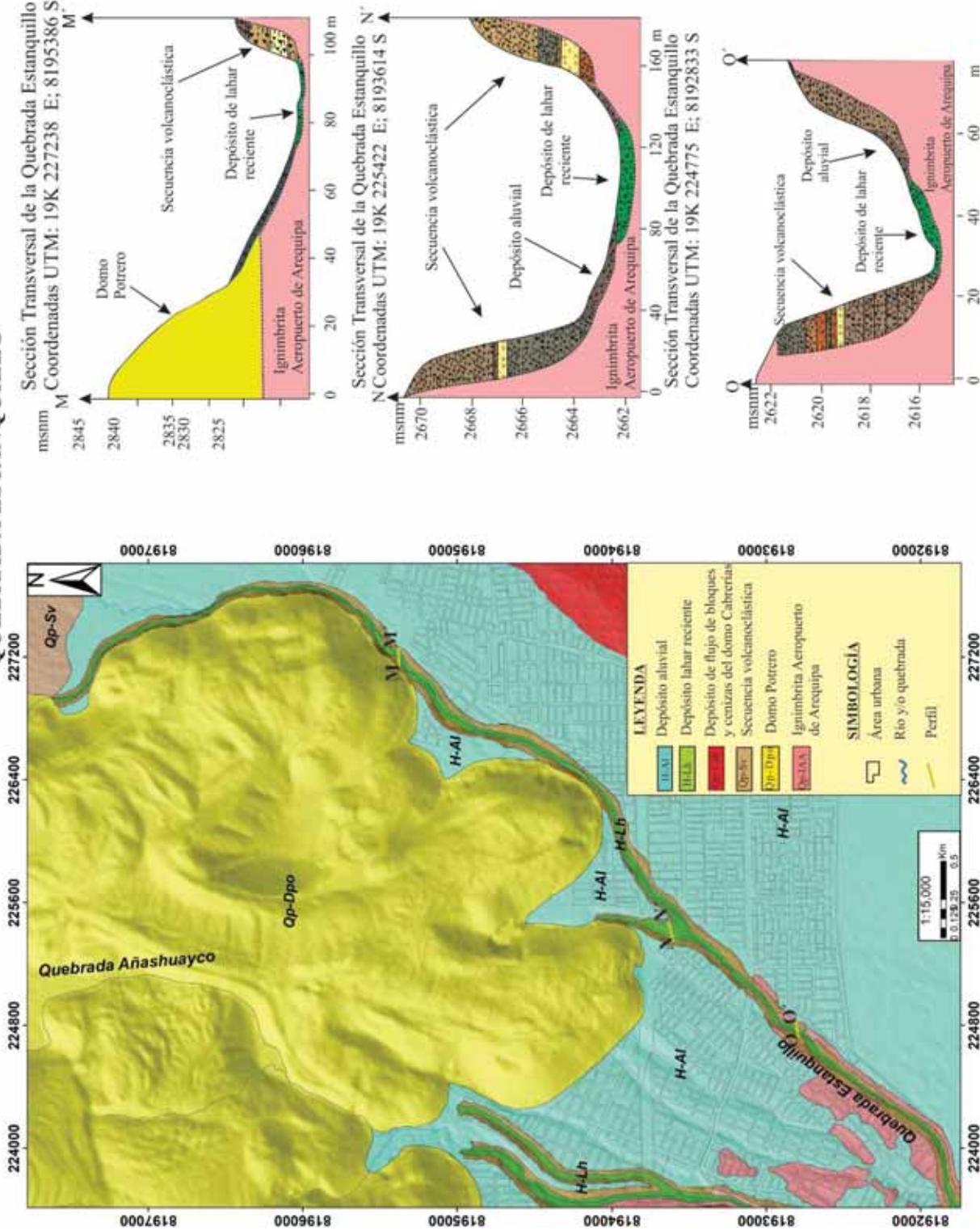


Figura 4.31. Perfiles estratigráficos: M-M', N-N' y O-O', de la quebrada Estanquillo. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.10.6 Quebrada Añashuayco

La quebrada Añashuayco (Fig. 4.34), está localizada en el distrito de Cerro Colorado y tiene una extensión aproximadamente 7 km; siendo su afluente principal el domo Potrero. A lo largo de ella afloran ignimbrita “Aeropuerto de Arequipa”, secuencias volcanoclásticas, depósitos coluviales y depósitos de lahares recientes.

Los depósitos de lahares presentan espesores de 50 cm a 1.20 m; las cuales se caracterizan por ser masivos y compactos, con matriz limoso (60%) de color gris claro y con fragmentos lávicos de forma sub angulosa a sub redondeada compuestos por andesitas y dacitas porfíricas de tamaños centimétricos y decimétricos.

Los depósitos de lahares recientes, presentan un espesor promedio de 10 cm-2 m, son masivos y poco compactos, con fragmentos lávicos que están englobados en una matriz limo-arenoso. Los fragmentos están compuestos por andesitas, dacitas y por materiales antropogénicos (plásticos, botellas, etc.; Fotografía 4.32). Cabe señalar que sobre este depósito la población se encuentra asentado.



**Fotografía 4.32:** Depósito de lahar reciente de 2 m de espesor, en la zona de depositación, visible en el sector Cantera. Cerro Colorado

A continuación, se describen los depósitos que afloran en dicha quebrada.

En la margen derecha de la quebrada Añashuayco (coordenadas UTM: E: 223736; S: 8193920) (Fig. 4.33). Se observan dos depósitos de lahar “A” y “C” y un depósito de caída de pómez del volcán Misti “B”. A continuación, se describe cada uno de los depósitos antes mencionados.

Columna estratigráfica de la Quebrada Añashuayco  
 Coordenadas UTM: 19K 223736 m E; 8193920 m S

ESPESOR (m)	AFLORAMIENTO	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
0.16 0.15 0.40			Depósito coluvial Depósito aluvial Depósito de lahar masivo y friable. Presenta una matriz arena-limoso (70%), de color pardo, que presenta fragmentos lávicos (20%) y materiales antropogénicos (10%).
2.2			Depósito de lahar masivo y compacto. Presenta una matriz limo-arenoso (70%) de color gris claro, que presenta fragmentos lávicos (30%) de color gris oscuro a gris claro, de forma sub redondeada a sub angulosa, con tamaños centimétricos (10%) 2-8 cm a decimétricos 20% 12-35 cm. Los fragmentos lávicos están compuestos por andesitas dacitas porfíricas y afaníticas.
0.30 0.55			Depósito de caída de pómez, del volcán Misti. La pómez son de color blanquecino. Depósito de lahar masivo y compacto, compuesta por una matriz limo-arcillosa

Figura 4.33. Columna estratigráfica de la quebrada Añashuayco, en el sector Los Granjeros Unidos. Fuente: Elaboración propia.

**Depósito de lahar “A”:** Este depósito, posee un espesor promedio de 55 cm, es masivo y compacto. Presenta una matriz limo-arcilloso (80%) de color gris claro, con fragmentos lávicos, de composición andesítica y dacítica (20%), que tienen forma sub angulosa a sub redondeada, con tamaños centimétricos (10%) a decimétricos (10%) 11-30cm.

**Depósito de caída de pómez del volcán Misti “B”:** Este depósito posee un espesor promedio 30 cm. Las pómez son de color blanquecino, que miden hasta 4 cm de diámetro, con fenocristales de anfíbol, biotita y plagioclasas. Este depósito presenta escasamente líticos, con una granulometría bien gradada.

**Deposito de lahar “C”:** Este depósito, posee un espesor promedio de 2.2 m, es masivo y compacto. Presenta una matriz limo-arenoso (70%) de color gris claro, con fragmentos lávicos (30%), de forma sub angulosa a sub redondeada de tamaños centimétricos (10%) 2-8 cm a decimétricos (20%) 12-35cm. Los fragmentos lávicos están compuestos por andesitas y dacitas de color gris oscuro a gris claro.

## **Descripción de secciones transversales en la quebrada Añashuayco**

En campo se han levantado tres secciones transversales a lo largo de la quebrada Añashuayco, los cuales son descritos a continuación.

**Sección transversal P P’:** Esta sección posee un espesor que varía de 14 a 15 m. En ambos extremos de la quebrada afloran: depósitos de lahares recientes y una secuencia volcanoclástica (secuencia de depósitos de lahares y un depósito de caída de pómez “Sacarosa”, del volcán Misti); la cual ha sido descrita en la figura 4. 33.

**En la sección transversal Q Q’:** Esta sección posee un espesor que varía de 15 a 18 m. En la margen derecha de la quebrada afloran, ignimbrita Aeropuerto de Arequipa de la unidad rosada y un depósito de lahar reciente, mientras que en la margen izquierda afloran, ignimbrita Aeropuerto de Arequipa de la unidad rosada, secuencias de depósitos de lahar y un depósito de lahar reciente.

**En la sección transversal de la R R’:** Esta sección posee un espesor que varía de 15 a 20 m. En la margen derecha de la quebrada afloran: ignimbrita Aeropuerto de Arequipa de la unidad blanca, una secuencia de depósitos de lahares, un depósito coluvial y un depósito de lahar reciente, mientras que en la margen izquierda aflora ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (unidad blanca y rosada), un depósito de lahar reciente y un depósito coluvial.

# QUEBRADA AÑASHUAYCO

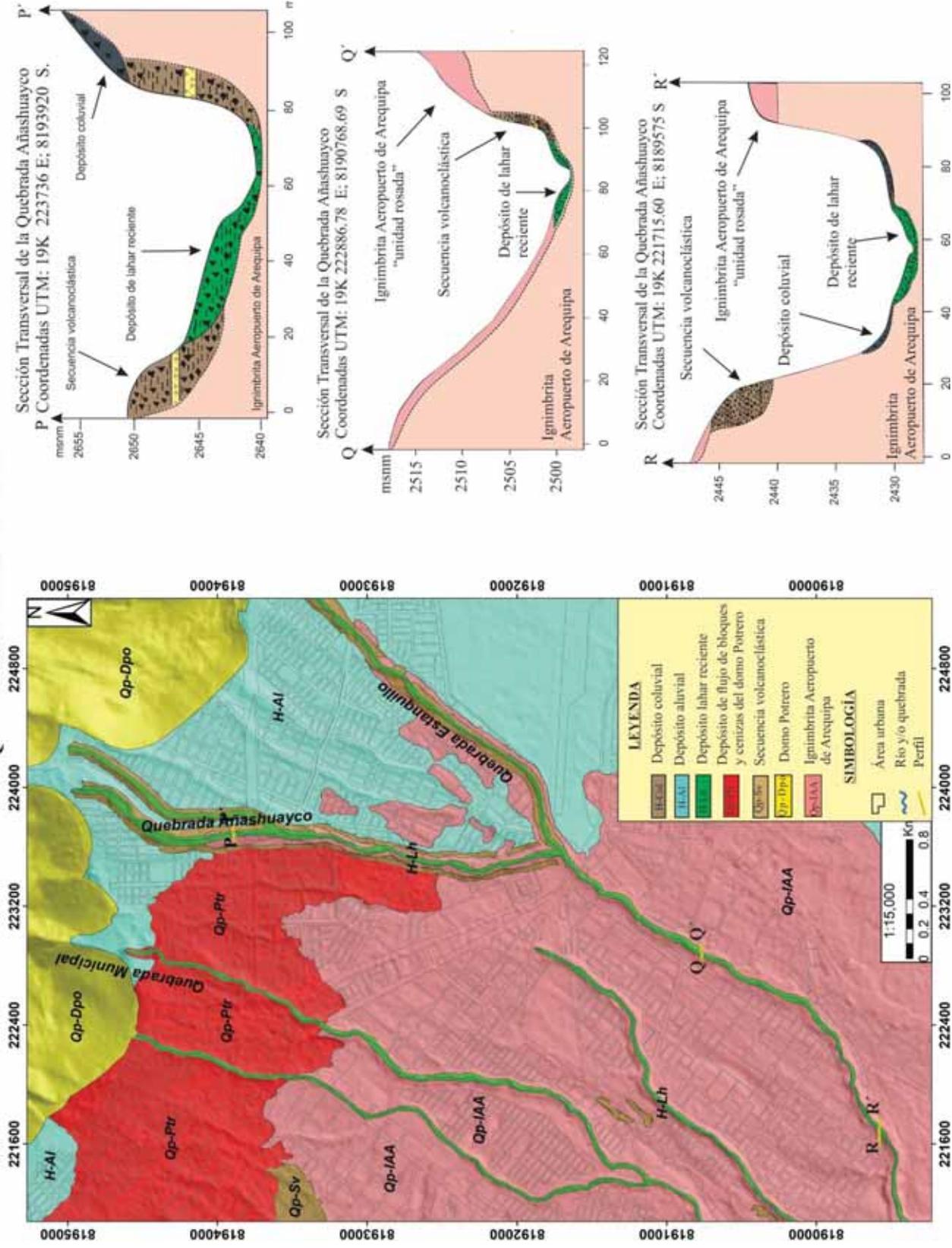


Figura 4.34. Perfiles estratigráficos: P-P', Q-Q' y R-R', de la quebrada Añashuayco. Fuente: Elaboración propia.

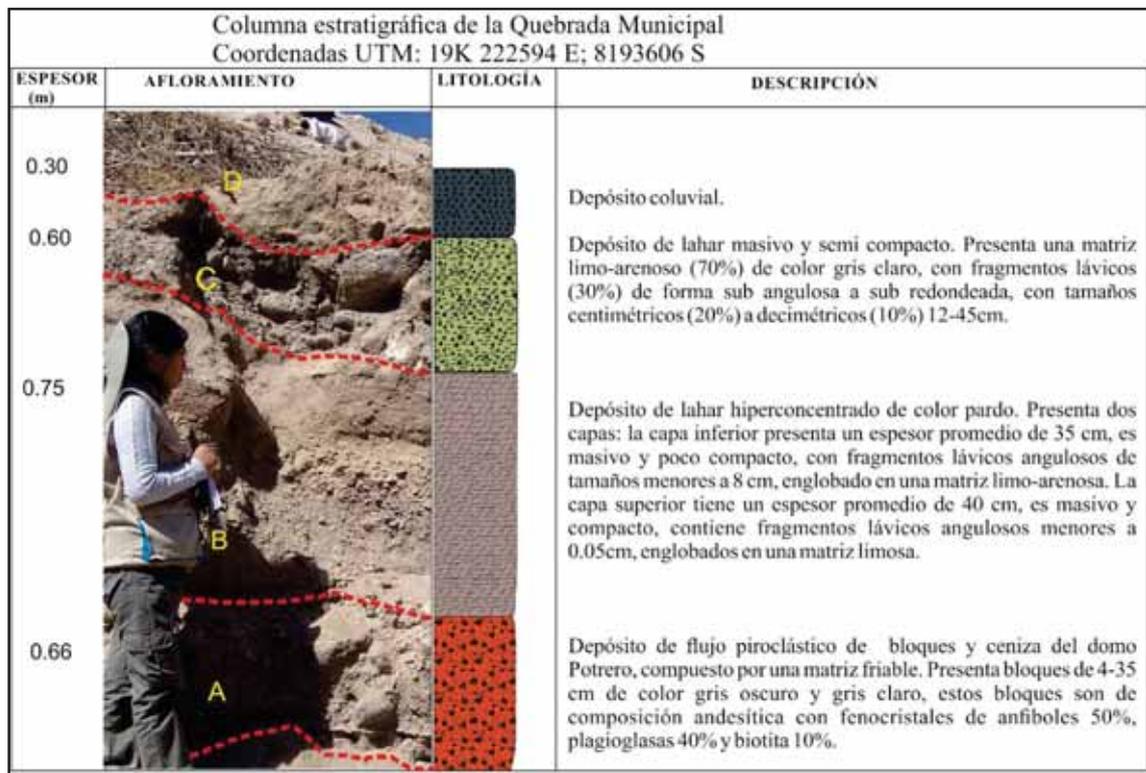
#### 4.10.7 Quebrada Municipal

La quebrada Municipal (Fig. 4. 36), está localizada en el distrito de Cerro Colorado y tiene una extensión aproximadamente de 5 km; siendo su afluente principal el domo Potrero. A lo largo de ella afloran: ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (unidad blanca y rosada), secuencias de depósitos de lahares, depósitos aluviales, depósito de flujo de bloques y cenizas del domo Potrero y depósitos de lahares recientes.

Los depósitos de lahares, presentan espesores de 50cm-2m. Estos depósitos se caracterizan por ser masivos y muy compactos, con matriz limo-arcilloso (70%), con fragmentos lávicos de forma sub angulosa y sub redondeado, de tamaños centimétricos a decimétricos. Estos fragmentos lávicos son de composición andesíticas y dacíticas porfíricas.

Los depósitos de lahares recientes, desde las faldas del domo Potrero, hasta la carretera Yura, presentan un espesor promedio de 1 a 2 m. Desde la carretera Yura, este depósito tiene un espesor promedio de 20 a 50 cm. A lo largo de la quebrada estos depósitos son masivos y friables, con fragmentos lávicos de forma sub angulosa a sub redondeada, de tamaños centimétricos a decimétricos. A continuación, se describen los depósitos que afloran en dicha quebrada.

En la margen izquierda de la quebrada Municipal (Coordenadas UTM: 222594 E; 8193606 S) (Fotografía 4.35). Se observan: un depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas "A", un depósito de lahar hiperconcentrado "B" y un depósito de lahar "C". A continuación, se describen cada uno de los depósitos antes mencionados.



**Figura 4.35:** Columna estratigráfica, de la quebrada Municipal. En el sector de la Ciudad Municipal. Fuente: Elaboración propia.

**Depósito de flujo de bloques y cenizas del domo Potrero A:** Este depósito presenta un espesor promedio de 66 cm, con bloques que miden de 4-35 cm de diámetro, de composición andesítica, con fenocristales de anfíbol (50%), plagioclasa (40%) y biotita (10%). Los bloques son de color gris claro, con tamaños menores a 35 cm.

**Depósito de lahar hiperconcentrado B:** Este depósito, posee un espesor promedio de 75 cm. Presenta dos capas la capa inferior tiene un espesor promedio de 35 cm, es masivo y poco compacto, contiene fragmentos lavicos angulosos de tamaños centimétricos menores a 8 cm englobados en una matriz limo-arenosa de 70%, la capa superior tiene un espesor promedio de 40 cm, es masivo y compacto, contiene fragmentos lavicos angulosos menores a 0.05cm, englobados en una matriz limosa (95%). La capa superior presenta burbujas.

**Depósito de lahar C:** Este depósito, posee un espesor promedio de 60cm, es masivo y semi-compacto. Presenta una matriz limo-arenosa (70%) de color gris claro, con fragmentos lávicos, compuestas por andesitas porfíricas (30%) de forma sub angulosa a sub redondeada, con tamaños centimétricos (20%) 3-8 cm y decimétricos (10%) 12-45cm.

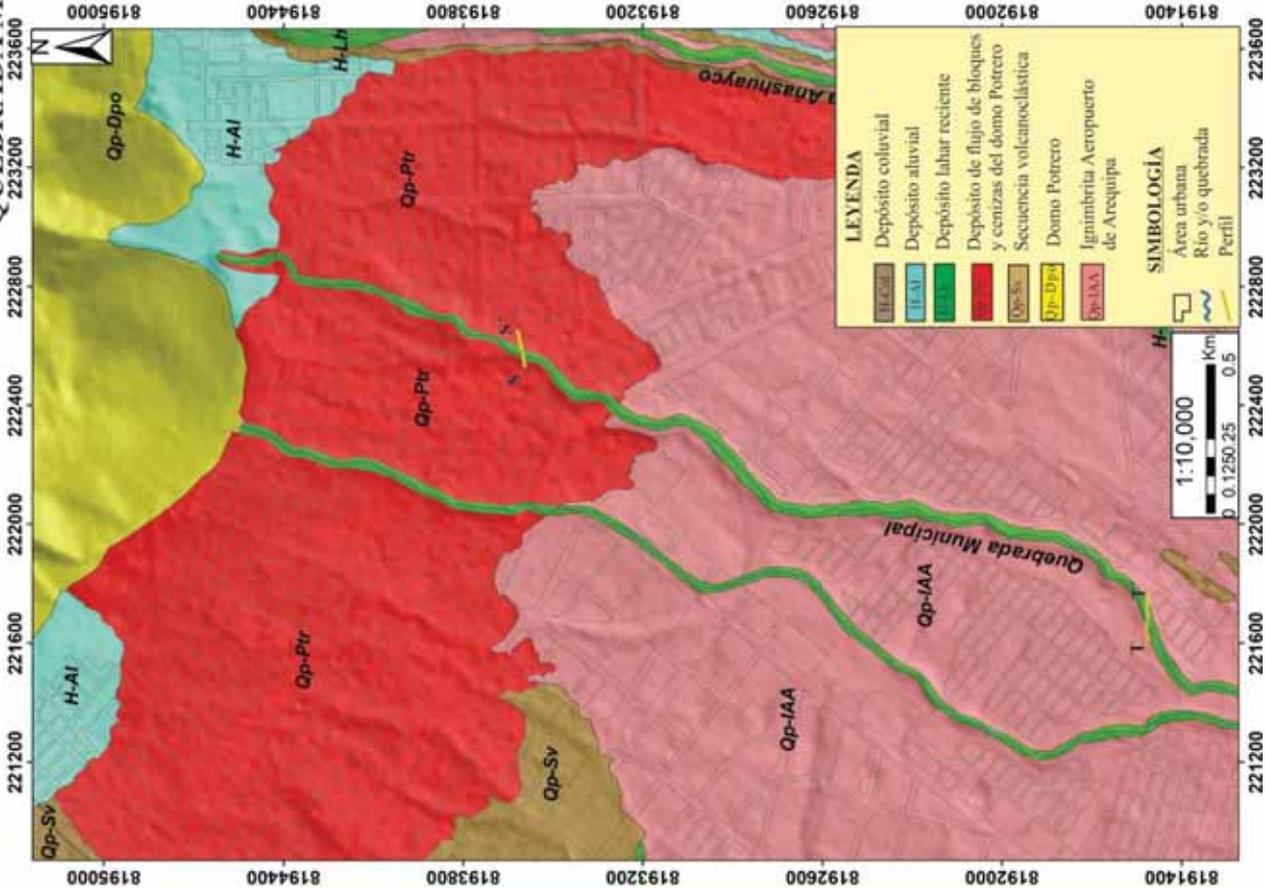
### **Descripción de secciones transversales en la quebrada Municipal**

En campo se han levantado dos secciones transversales a lo largo de la quebrada Municipal, los cuales son descritos a continuación.

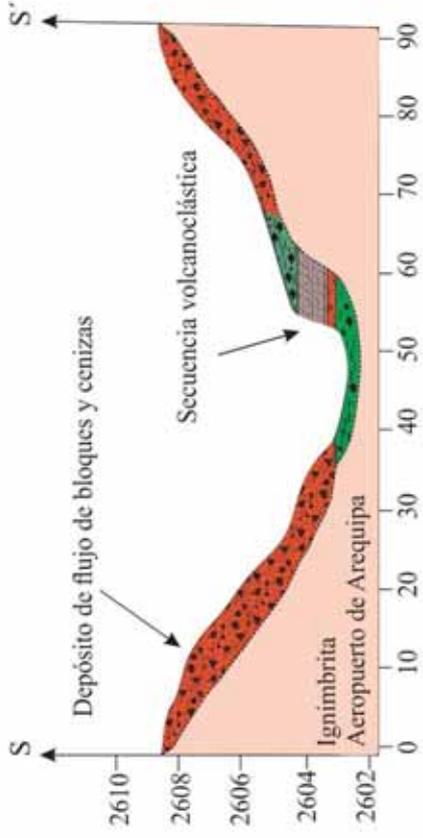
**Sección transversal S S':** Esta sección posee un espesor que varía de 4-5 m. En la margen derecha de la quebrada aflora un depósito de flujo piroclástico de bloques del domo Potrero, mientras que en la margen izquierda afloran: secuencias de depósito de lahar y un depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas, del domo Potrero; las cuales son descritas en la figura 4.35.

**En la sección transversal T T':** Esta sección, posee un espesor que varía de 10-11 m. En la margen derecha de la quebrada afloran, ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (unidad blanca y rosada), secuencias de depósitos de lahares y un depósito de lahar reciente, mientras que en la margen izquierda aflora ignimbrita Aeropuerto de Arequipa "unidad rosada".

# QUEBRADA MUNICIPAL



Sección Transversal de la Quebrada Municipal  
 Coordenadas UTM: 19K 222594 E; 8193606 S



Sección Transversal de la Quebrada Municipal  
 Coordenadas UTM: 19K 221644 E; 8191516 S

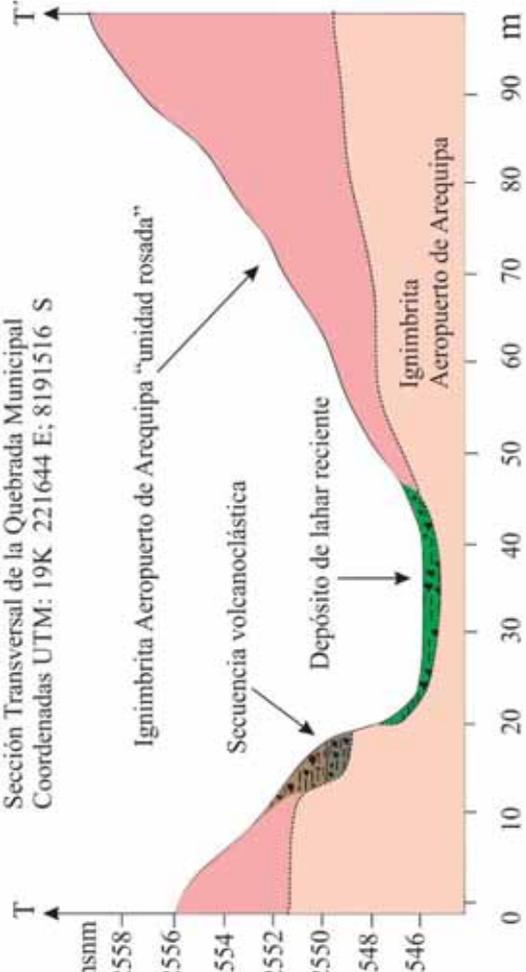


Figura 4.36. Perfiles estratigráficos: S-S' y Y-Y', de la quebrada Municipal. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.10.8 Quebrada Virgen de Socorro

La quebrada Virgen de Socorro (Fig. 4.39), está localizada en el distrito de Cerro Colorado y tiene una extensión aproximadamente 4.20 km, siendo su afluente principal el domo Potrero. A lo largo de ella afloran: ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (unidad rosada y blanca), secuencias volcanoclásticas, depósitos de flujo piroclástico de bloques y cenizas del domo Potrero, depósitos coluviales y depósitos de lahares recientes.

Los depósitos de lahares, a lo largo de la quebrada, no afloran desde el domo Potrero hasta la carretera Yura. Sin embargo desde la carretera Yura hasta el río Chili, estos depósitos presentan espesores de 1 a 4 m; los cuales solo afloran sobre los depósitos de flujo piroclástico de bloques y cenizas del domo Potrero y sobre la ignimbrita Aeropuerto de Arequipa. Estos depósitos de lahares se caracterizan por tener una matriz limosa, de color pardo y gris claro, con fragmentos lávicos de forma sub redondeada a redondeada de tamaños centimétricos a decimétrico. Estos fragmentos líticos son de composición andesíticas porfiríticas.

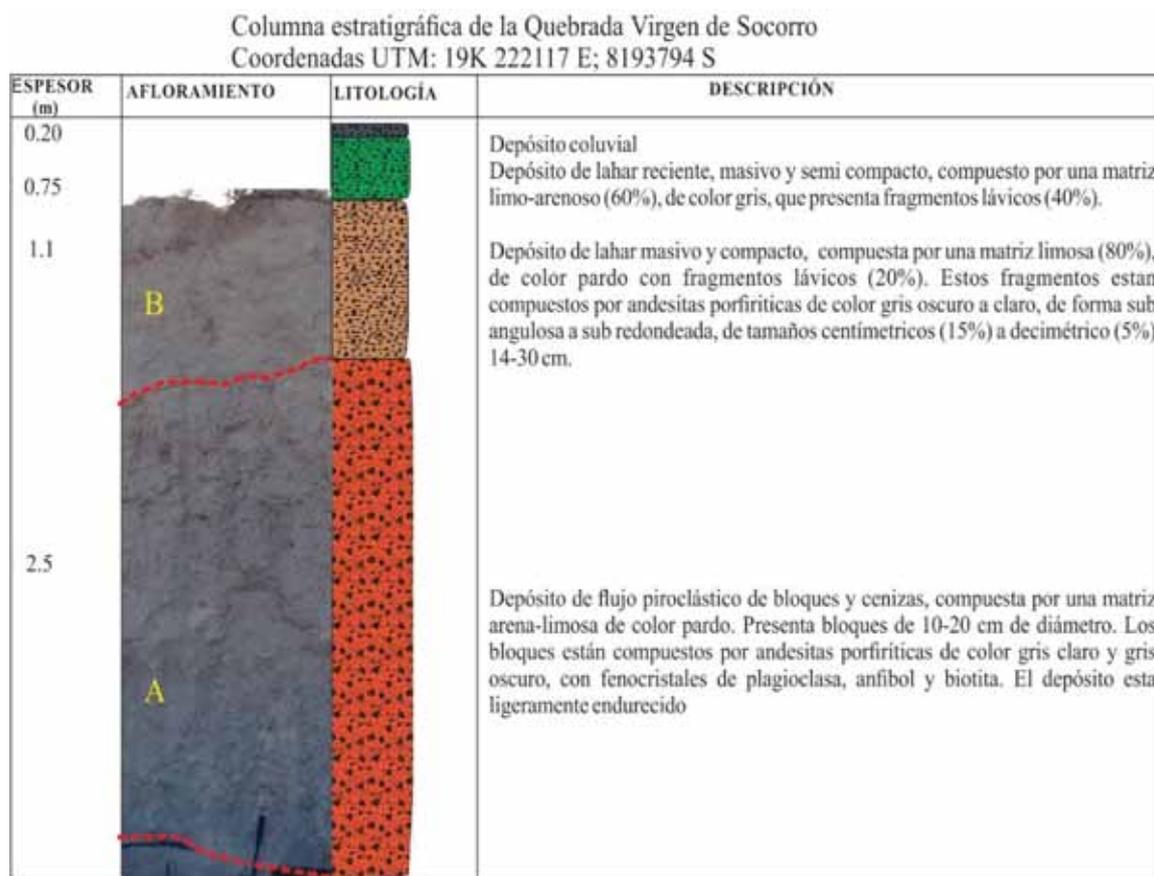
Los depósitos de lahares recientes, desde el domo Potrero hasta la carretera Yura, no aflora en todo los sectores debidos, a que está quebrada ha sido rellenada con material de escombros. Desde la carretera Yura hasta el río Chili, estos depósitos presentan un espesor promedio de 20 cm a 2 m y se caracterizan por ser masivos y semi compactos, con matriz limo-arenosa (70%), de color gris claro y gris oscuro con fragmentos de roca de forma sub angulosa a sub redondeada con tamaños centimétricos a decimétricos (Fotografía 4.37).



**Fotografía 4.37.** Depósito de lahar reciente de 75 cm, en la zona de depositación. Visible en la quebrada Virgen de Socorro

A continuación, se describen los depósitos que afloran en dicha quebrada.

En la margen izquierda de la quebrada Virgen de Socorro (coordenadas UTM: E: 222117; S: 8193794) (Figura 5.38). Se observan un depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas “A” y un depósito de lahar “B”. A continuación, se describen cada uno de los depósitos antes mencionados.



**Figura 4.38.:** Columna estratigráfica, de la quebrada Virgen de Socorro, en la zona de deposición. Fuente: Elaboración propia.

**Depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas del domo Porero “A”:** Este depósito posee un espesor promedio de 2.5 m, con bloques que miden de 10-20 cm de diámetro. Estos bloques son porfíricas de color gris claro y gris oscuro, con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. El depósito se encuentra ligeramente endurecida.

**Depósito de lahar “B”:** Este depósito, posee un espesor promedio de 1.1 m, es masivo y compacto. Presenta una matriz limosa (80%) de color pardo con fragmentos lávicos (20%). Estos fragmentos están compuestos por andesitas porfíricas de color gris oscuro y gris claro, de forma sub angulosa a sub redondeada, de tamaños centimétricos 15% a decimétricos 5% (14-30 cm).

## **Descripción de secciones transversales en la quebrada Virgen de Socorro**

En campo se han levantado tres secciones transversales a lo largo de la quebrada Virgen de Socorro, los cuales son descritos a continuación.

**Sección transversal Y Y'**: Esta sección posee un espesor que varía de 7-8 m. En la margen derecha de la quebrada afloran: depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas del domo Potrero y un depósito de lahar reciente, mientras que en la margen izquierda afloran, un depósito coluvial, una secuencia volcanoclástica (dos depósitos de lahar y un depósito de flujo de bloques y cenizas del domo Potrero) y un depósito de lahar reciente; las cuales han sido descritas en la figura 4.38.

**En la sección transversal W W'**: Esta sección posee un espesor que varía de 10-11 m. En ambos extremos de la quebrada afloran; las ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (unidad rosada y blanca) y secuencias de depósitos de lahares.

**En la sección transversal de la X X'**: Esta sección posee un espesor, que varía de 15-20 m. En ambos extremos de la quebrada afloran; ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (unidad blanca) y secuencias de depósitos de lahar.

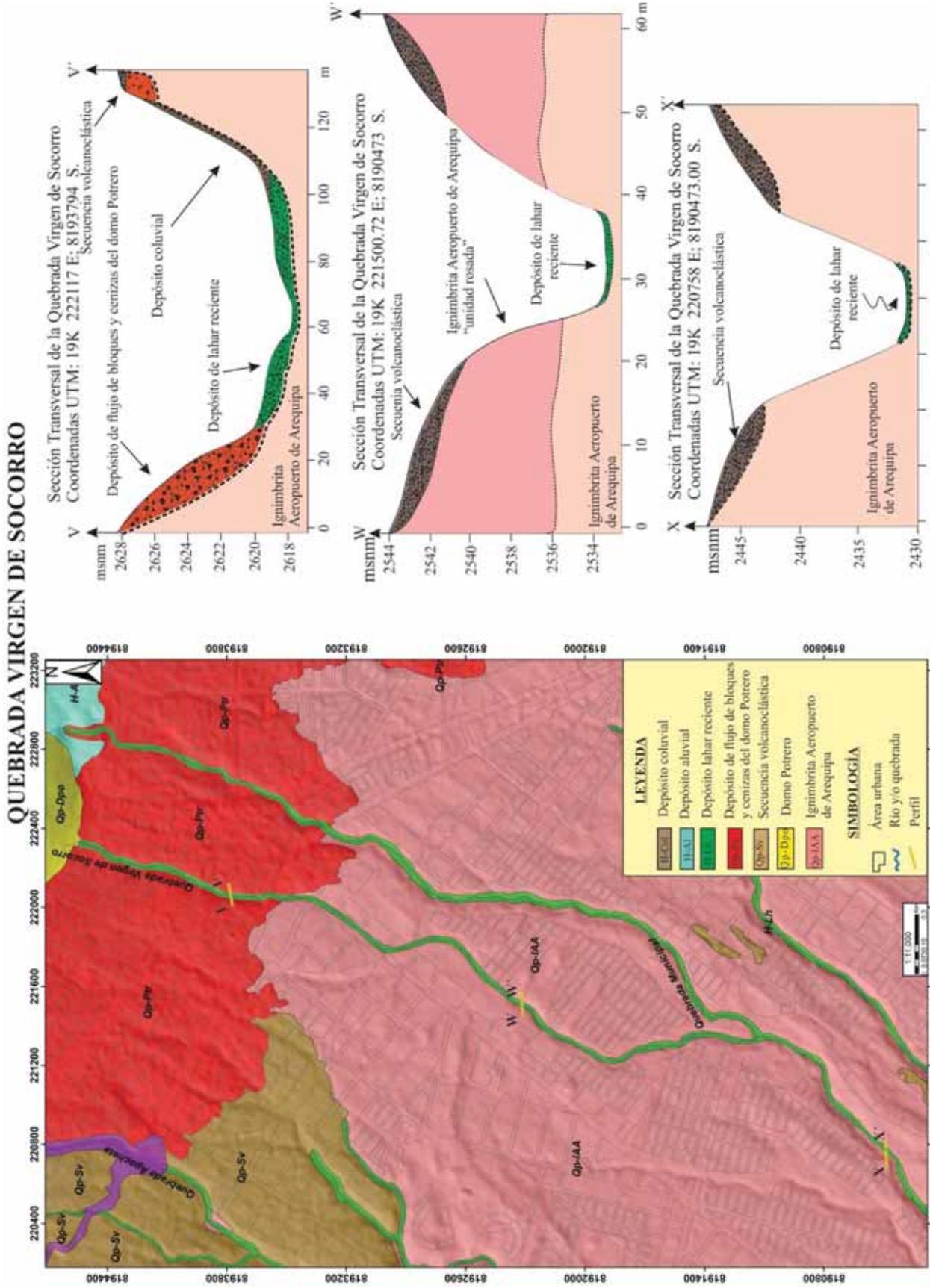


Figura 4.39. Perfiles estratigráficos: V-V', W-W', X-X', de la quebrada Virgen de Socorro. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.10.9 Quebrada Apacheta

La quebrada Apacheta (Fig. 4.42), está localizada en el distrito de Cerro Colorado y tiene una extensión aproximadamente de 6 km; siendo su afluente principal el domo Potrero. A lo largo de ella afloran, ignimbrita Aeropuerto de Arequipa, flujos de lava, secuencias volcanoclásticas y depósitos de lahares recientes.

Los depósitos de lahares a lo largo de la quebrada, generalmente presentan espesores de 2-4 m y se caracterizan por ser masivos y compactos. Presentan una matriz limo arcillosa, de color pardo y gris claro con fragmentos de roca de forma sub anguloso a sub redondeado, de tamaños centimétricos a decimétricos. Estos fragmentos de roca están compuestas por andesitas, dacitas afaníticas y porfiríticas.

Los depósitos de lahares recientes, en esta quebrada no son visibles desde las faldas del domo Potrero hasta la carretera Yura, debido a que en este sector la quebrada ha sido rellenada por material de escombros. Cabe señalar que sobre estos materiales la población se encuentra asentada. Desde la carretera Yura, hasta el río Chili, el depósito posee un espesor promedio de 10 a 20 cm.

En la fotografía 4.40. Se observa depósito de lahar reciente; el cual aflora en la margen izquierda de la quebrada. Este depósito tiene un espesor promedio de 1.2 m. Es masivo y poco friable. Presenta una matriz limo-arenosa (60%) de color gris, con fragmentos líticos (40%), de forma sub angulosa a sub redondeada. Estos fragmentos están compuestos por andesitas porfíricas y afaníticas, de tamaños centimétricos 25% 2-8 cm a decimétricos 15% 11-60 cm.



**Fotografía 4.40.** Depósito de lahar reciente de 1.2 m, en la zona de depositación. Visible, en la quebrada Apacheta.

A continuación, se describen los depósitos que afloran en dicha quebrada.

En la margen derecha de la quebrada Apacheta (Coordenadas UTM: E 220767; S 8194343) (Figura 4.41). Se observan: secuencia de depósito de caída de escoria del Complejo Volcánico Chachani “A” y dos secuencias de depósitos de lahar “B y C”. A continuación, se describen cada uno de los depósitos antes mencionados.



**Figura 4.41.** Columna estratigráfica, en la quebrada Apacheta. Fuente: Elaboración propia.

**Secuencia de caída de escoria del Complejo Volcánico Chachani “A”:** Esta secuencia, posee un espesor promedio de 50 cm; la cual esta compuesta por dos capas, la capa inferior está compuesta por escorias de color gris oscuro de tamaños menores a 2 cm, los fragmentos lávicos representan el 10% del depósito de color negro y rojizo. La capa superior está compuesta por escorias de tamaños menores de 10 cm, los fragmentos lávicos representa el 15% del depósito de color negro y rojizo.

**Depósito de lahar “B”:** Este depósito posee un espesor promedio de 65 cm, es masivo y compacto. Presenta una matriz limo arcillosa (70%) de color gris oscuro, con fragmentos lávicos, compuestas por andesitas porfíricas y afániticas de color gris claro y oscuro . Estos fragmentos son de tamaños centimétricos (5%) 2-9 cm a decimétrico 25% 12-35cm.

**Depósito de lahar “C”:** Este depósito, posee un espesor promedio de 85 cm, es masivo y compacto. Presenta una matriz limo-arenoso (70%) de color pardo, con fragmentos lavicos formados por andesitas y dacitas porfíricas (30%), de color gris claro y gris oscuro. Estos fragmentos son de forma sub angulosa a sub redondeada, de tamaños centimétricos (20%) 3-8 cm a decimétricos (10%) 12-45cm.

### **Descripción de secciones transversales en la quebrada Apacheta**

En campo se han levantado tres secciones transversales a lo largo de la quebrada Apacheta, los cuales son descritos a continuación.

**Sección transversal Y Y’:** Esta sección posee un espesor que varía de 7-8 m. En la margen derecha de la quebrada afloran, flujos de lava y una secuencia volcanoclástica (secuencias de depósitos de lahar y un depósito de caída de escoria del Complejo Volcánico Chachani); las cuales han sido descritas en la figura 4.41, mientras que en la margen izquierda afloran flujos de lavas.

**En la sección transversal Z Z’:** Esta sección posee un espesor que varía de 15-20 m. En ambos extremos de la quebrada afloran; secuencias depósitos de lahares.

**En la sección transversal de la AA AA’:** Esta sección posee un espesor que varía de 30-35 m. En ambos extremos de la quebrada afloran, ignimbrita Aeropuerto de Arequipa de la unidad blanca, secuencias de depósitos de lahares y depósitos de lahares recientes.

# QUEBRADA APACHETA

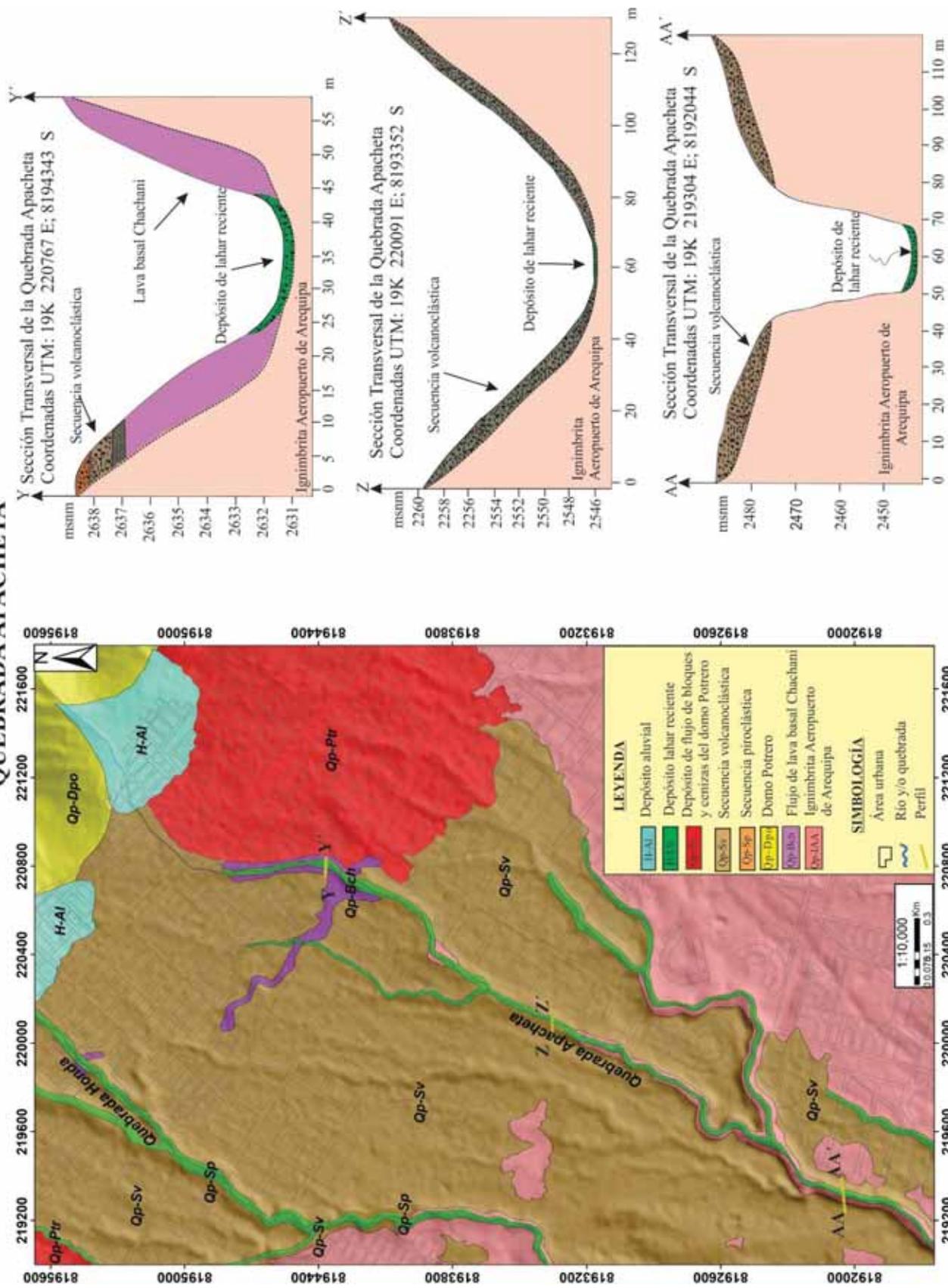


Figura 4.42. Secciones transversales: Y-Y, Z-Z, AA-AA, de la quebrada Apacheta. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.10.10 Quebrada Honda

La quebrada Honda (Fig. 4.45), está localizada en el distrito de Yura y tiene una extensión aproximadamente de 6.5 km; siendo su afluente principal el domo Potrero. A lo largo de ella afloran: ignimbrita Aeropuerto de Arequipa, flujos de lava, secuencias volcanoclásticas, secuencias piroclásticas y depósitos de lahares recientes.

A lo largo de la quebrada se llegó a identificar dos tipos de depósitos lahares: los depósitos de lahares de color gris oscuro y los depósitos de lahares de color pardo. Los depósitos de color pardo subyace al depósito de color gris oscuro.

Los depósitos de lahares de color pardo, se caracterizan por ser masivos y compactos. Presentan una matriz limosa con fragmentos lávicos de color gris oscuro y gris claro. Estos fragmentos lávicos son de forma redondeada a sub redondeada, de tamaños centimétricos a decimétricos, mientras que los depósitos de lahares de color gris oscuro, se caracterizan por ser masivos y muy compactos, con matriz limo-arcillosa de fragmentos lávicos de forma angulosa a sub angulosa, de tamaños centimétricos a decimétricos. Estos fragmentos lávicos están compuestos por andesitas porfíricas y afaníticas, de color gris oscuro y rojizo, pómez de color amarillento a anaranjado, escorias de color gris oscuro y gris claro

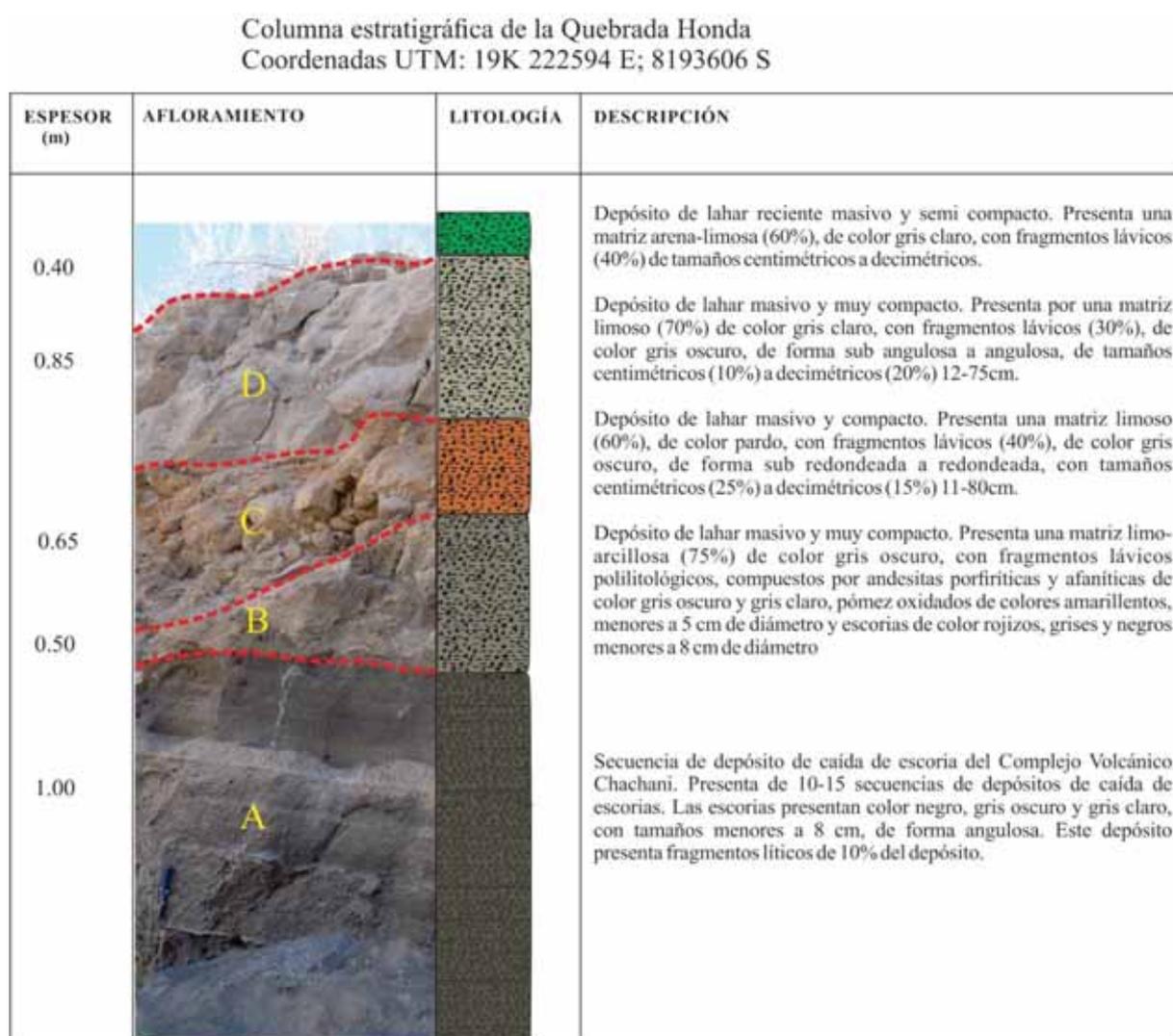
Los depósitos de lahares recientes en la zona de depositación presentan un espesor que varía de 15- 70 cm y se caracterizan por ser masivos y friables. Presenta una matriz limo-arenosa, con fragmentos lávicos de composición andesíticas y dacíticas porfíricas y afaníticas, de forma sub redondeada a sub angulosa, de tamaños centimétricos a decimétricos (Fotografía 4.43).



**Fotografía 4.43.** Depósito de lahar reciente, en la zona de depositación. Visible en la quebrada Honda

A continuación, se describen los depósitos que afloran en la quebrada.

En la margen derecha de la quebrada Honda (Coordenadas UTM: E: 222594; S: 8193606), (Fig. 4.44). Se observan: secuencias de depósitos de caída de escoria del Complejo Volcánico Chachani “A” y tres depósitos de lahar “B”, “C” y D”. A continuación, se describen cada uno de los depósitos antes mencionados.



**Figura 4.44.** Columna estratigráfica, de la quebrada Honda, en la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Secuencia de depósito de caída de escoria del Complejo Volcánico Chachani “A”:** Esta secuencia, posee un espesor promedio de 1 m, compuesto por 10-15 secuencias de depósitos de caída de escorias, del volcán Chachani. Las escorias presentan un color negro, gris oscuro y gris claro, con tamaños menores a 8 cm, de forma angulosa. Este depósito presenta fragmentos líticos de 10% del depósito.

**Depósito de lahar “B”:** Este depósito posee un espesor de promedio de 50 cm, es masivo y muy compacto. Presenta una matriz limo-arcillosa (75%) de color gris oscuro, con fragmentos lávicos polilitológicos, compuestos por andesitas porfíricas y afaníticas de color gris oscuro y gris claro. Estos fragmentos lávicos, tienen forma angulosa a sub angulosa de tamaños centimétricos, pómez oxidados de colores amarillentos, menores a 5 cm de diámetro y escorias de color rojizos, grises y negros menores a 8 cm de diámetro.

**Deposito de lahar C:** Este depósito posee un espesor promedio de 65 cm, es masivo y compacto. Presenta una matriz limoso (60%) de color pardo, con fragmentos lávicos, compuestos por andesitas y dacitas porfíricas (40%). Estos fragmentos lávicos son de color gris oscuro de forma redondeada a sub redondeada de tamaños centimétricos (25%) a decimétricos (15%) 11-80 cm.

**Deposito de lahar D:** Este depósito posee un espesor promedio de 85 cm, es masivo y muy compacto. Presenta una matriz limo-arcillosa (70%) de color gris claro, con fragmentos lávicos compuestos por andesitas y dacitas porfíricas (30%), de forma angulosa a sub angulosa de tamaños centimétricos (10%) a decimétrico (20%) 12-75cm.

### **Descripción de las secciones transversales de la quebrada Honda**

En campo se han levantado tres secciones transversales a lo largo de la quebrada Honda, los cuales son descritos a continuación.

**Sección transversal AB AB’:** Esta sección posee un espesor que varía de 10 a 15 m. En ambos extremos de la quebrada, afloran, secuencias volcanoclásticas (secuencias de depósitos de lahares y un depósito de caída de pómez del volcán Misti).

**En la sección transversal AC AC’:** Esta sección posee un espesor que varía de 15 a 30 m. En la margen derecha de la quebrada aflora una secuencia piroclástica (18-20 secuencias de depósitos de caída de escoria del Complejo Volcánico Chachani y dos secuencias de depósitos de lahar), descrita en la figura 4.44, mientras que en la margen izquierda, aflora secuencias de depósitos de lahar.

**En la sección transversal de la AD AD’:** Esta sección posee un espesor que varía de 20 a 25 m. En ambos extremos de la quebrada afloran ignimbrita Aeropuerto de Arequipa de la unidad rosada y blanca.

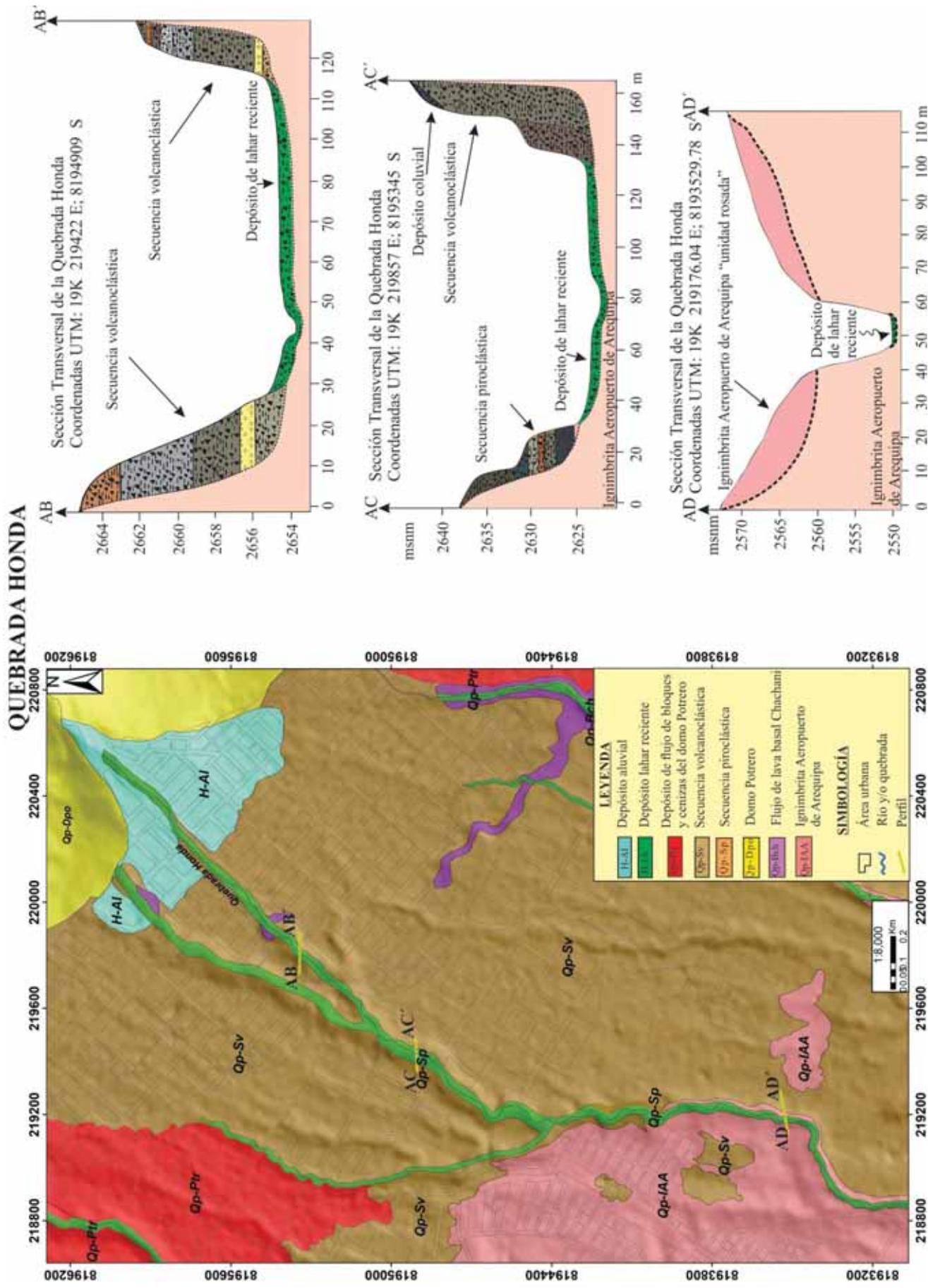


Figura 4.45. Perfiles estratigráficos: AB-AB', AC-AC', AD-AD', de la quebrada Honda. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.10.11 Quebrada Los Andenes

La quebrada Los Andenes (Fig. 4.48), está localizada en el distrito de Yura y tiene una extensión aproximadamente 5.1 km; siendo su afluente principal el domo Potrero. A lo largo de ella se observan, ignimbrita Aeropuerto de Arequipa, flujos de lava, secuencia de depósitos de lahares, secuencias de depósitos de caída de lapilli de pómez y escorias del CVC, depósitos de flujo piroclásticos de bloques y cenizas del domo Potrero y depósitos de lahares recientes.

A lo largo de la quebrada se llegó a identificar dos tipos de depósitos de lahares: los depósitos de lahares color gris oscuro y pardo. Los depósitos de lahares de color gris oscuro, se caracterizan por ser masivos y muy compactos, con una matriz limo-arcillosa con fragmentos líticos de forma angulosa a sub angulosa, de tamaños centimétricos y decimétricos. Estos fragmentos de líticos están compuestos por andesitas porfíricas y afaníticas, pómez de color amarillento a anaranjado, escorias de color gris oscuro y gris claro y los depósitos de color pardo, se caracterizan por ser masivos y compactos, con una matriz limo arcillosa, que presenta fragmentos lávicos de color gris oscuro y gris claro, de forma redondeada a sub redondeada, con tamaños centimétricos a decimétricos, mientras que los depósitos de lahares de color pardo son masivos y compactos, con una matriz limosa. Los fragmentos líticos están compuestos por andesitas y dacitas porfíricas, de tamaños centimétricos a métricos.

Los depósitos de lahares recientes, en la zona de depositación presentan un espesor promedio de 20 cm-1.5 m y se caracterizan por ser masivos, y semi compactos con matriz limoso (60%) y fragmentos de roca (40%), de forma sub angulosa a sub redondeado de tamaños centimétricos a decimétricos, compuestos por andesitas porfíricas y afaníticas, de color gris oscuro y gris claro. Cabe señalar que en algunos sectores de esta quebrada la población ha construido sus viviendas, en el cauce principal (Fotografía 4.46).



**Fotografía 4.46.** Depósito de lahar reciente, en la zona de depositación. Visible en la quebrada Los Andenes

A continuación, se describen los depósitos que afloran en dicha quebrada.

En la margen derecha de la quebrada Los Andenes (Coordenada UTM: E: 219857; S: 8195345) (Fig. 4.47). Se observan de 15 a 20 secuencia de depósitos caída de escorias del volcán Chachani “B” y “D”, dos depósitos de caída de pómez del Complejo Volcánico Chachani “A” y “C” y dos secuencias de depósitos de lahar “E” y “F”. A continuación, se describen cada uno de los depósitos mencionados:

Columna estratigráfica de la Quebrada Los Andenes  
Coordenadas UTM: 19K 219857 E; 8195345 S

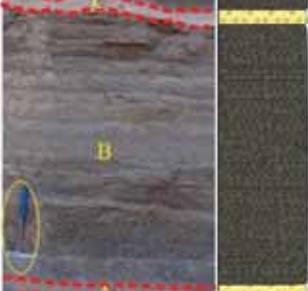
ESPESOR (m)	AFLORAMIENTO	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
0.30			Depósito coluvial
0.50			Depósito de lahar reciente, masivo y friable. Presenta una matriz limo-arenoso (50%), de color gris claro, con fragmento lávicos (50%), de tamaños centimétricos a decimétricos.
0.05			Depósito de caída de ceniza fina, de color gris claro, del volcán Huaynaputina.
0.35			Depósito de lahar masivo y compacto, con matriz limosa (65%), de color pardo y con fragmentos lávicos (25%) de forma redondeada a sub redondeada, de tamaños centimétricos a decimétricos.
1.00			Depósito de lahar masivo y muy compacto. Presenta una matriz arena-arcillosa (80%) de color gris oscuro, con fragmentos lávicos polilitológico, compuesto por andesitas porfíricas y afáníticas de color gris oscuro, gris claro, pómez oxidadas de color amarillento a anaranjado y escorias de color negro, gris oscuro, gris claro y rojizos.
0.20			Depósito de caída de escoria del CVC, de color negro y gris oscuro.
0.15			Depósito de caída de pómez, del CVC de color amarillento a blanquecina.
1.30			Secuencia de depósitos de caída de escoria del Complejo Volcánico Chachani. Presenta de 15 a 20 depósitos de caída de escorias del volcán Chachani. Las escorias son de color negro y gris oscuro, con presencia de fragmentos líticos de 15%, de forma anguloso a sub anguloso, con tamaños menores a 3 cm de diámetro. Estas escorias presentan tamaños máximos de 5 cm, las cuales son vesiculados.
0.15			Depósito de caída de pómez, del CVC, de color amarillento.
0.25			Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa "unidad rosada"

Figura 4.47. Columna estratigráfica, de la quebrada Los Andenes, en la zona de depositación.  
Fuente: Elaboración propia.

**Depósito de caída de pómez del Complejo Volcánico Chachani “A”:** Este depósito tiene un espesor promedio de 15 cm; el cual está compuesto por pómez, con líticos oxidados y algunos hidrotermalizado. Las pómez presentan tamaños menores a 5 cm de diámetro; las cuales se vesículas y alargadas. Estas pómez contienen cristales de plagioclasa y biotita.

**Secuencia de depósito de caída de escoria del Complejo Volcánico Chachani “B”:** Esta secuencia tiene un espesor promedio de 1.30 m; el cual está compuesto por una secuencia de 15 a 20 depósitos de caída de escorias del volcán Chachani. Las escorias son de color negro y gris oscuro, con presencia de fragmentos líticos de 15%, de forma anguloso a sub anguloso, con tamaños menores a 3 cm de diámetro. Estas escorias presentan tamaños máximos de 5 cm, las cuales son vesiculados.

**Deposito de caída de pómez del Complejo “C”:** Este depósito, posee un espesor promedio de 15 cm. Presenta pómez y fragmentos lávicos de 10%. Las pómez se muestran vesículas y alargadas. Estas contienen cristales de plagioclasa y biotita.

**Deposito de caída de escoria del Complejo Volcánico Chachani D:** Este depósito, posee un espesor promedio de 20 cm. Presenta dos depósitos de caída de escorias. Estas escorias tienen tamaños menores a 2 cm de diámetro, son de color gris oscuro y gris claro.

**Deposito de lahar “E”:** Este depósito, posee un espesor promedio de 1m, es masivo y muy compacto. Presenta una matriz arena-arcillosa (80%) de color gris, con fragmentos lávicos polilitológico, compuestos por andesitas porfíricas y afaníticas de color gris oscuro y rojizos de forma angulosa a sub angulosa con tamaños centimétricos. Las pómez son oxidados de colores amarillentos, de tamaños menores a 3 cm de diámetro, y las escorias son de color rojizo, grises y negros menores a 5 cm de diámetro.

**Deposito de lahar “F”:** Este depósito, posee un espesor promedio de 35 cm, es masivo y compacto. Presenta una matriz limosa de (65%) de color pardo, con fragmentos lávicos (25%), de forma redondeada sub redondeada. Los fragmentos lávicos, están compuestos por andesitas y dacitas porfírica, con tamaños centimétricos (20%) 2-9 cm y decimétricos (10%) 11-55cm.

**Deposito de caída de ceniza del volcán Huaynaputina “G”:** Este depósito, posee un espesor de 0.05 cm, está compuesto depósito de caída de ceniza fina, de color gris claro, del volcán Huaynaputina.

### **Descripción de secciones transversales en la quebrada Los Andenes**

En campo se han levantado tres secciones transversales a lo largo de la quebrada Los Andenes, los cuales son descritos a continuación.

**Sección transversal AE AE’:** Esta sección posee un espesor que varía de 25 a 30 m. En la margen derecha de la quebrada afloran, un depósito de lahar reciente, una secuencia piroclástica del CVC (8 a 15 secuencia de depósitos de caída de escoria, un depósito de caída de pómez y secuencia de depósitos de lahares); las cuales han sido descritos en la figura 4.47, mientras que en la margen izquierda afloran: un depósito de lahar reciente, secuencia de depósitos de lahares.

**En la sección transversal AF AF’:** Esta sección posee un espesor que varía de 12 a 15 m. En la margen derecha de la quebrada afloran: ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (unidad rosada) y un depósito de lahar reciente, mientras que en la margen izquierda, afloran: ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (unidad rosada), secuencia de depósitos de lahares y un depósito de lahar reciente.

**En la sección transversal de la AG AG’:** Esta sección posee un espesor que varía de 40 a 50 m. En ambos extremos de la quebrada afloran; ignimbrita Aeropuerto de requipa de unidad rosada y blanca.

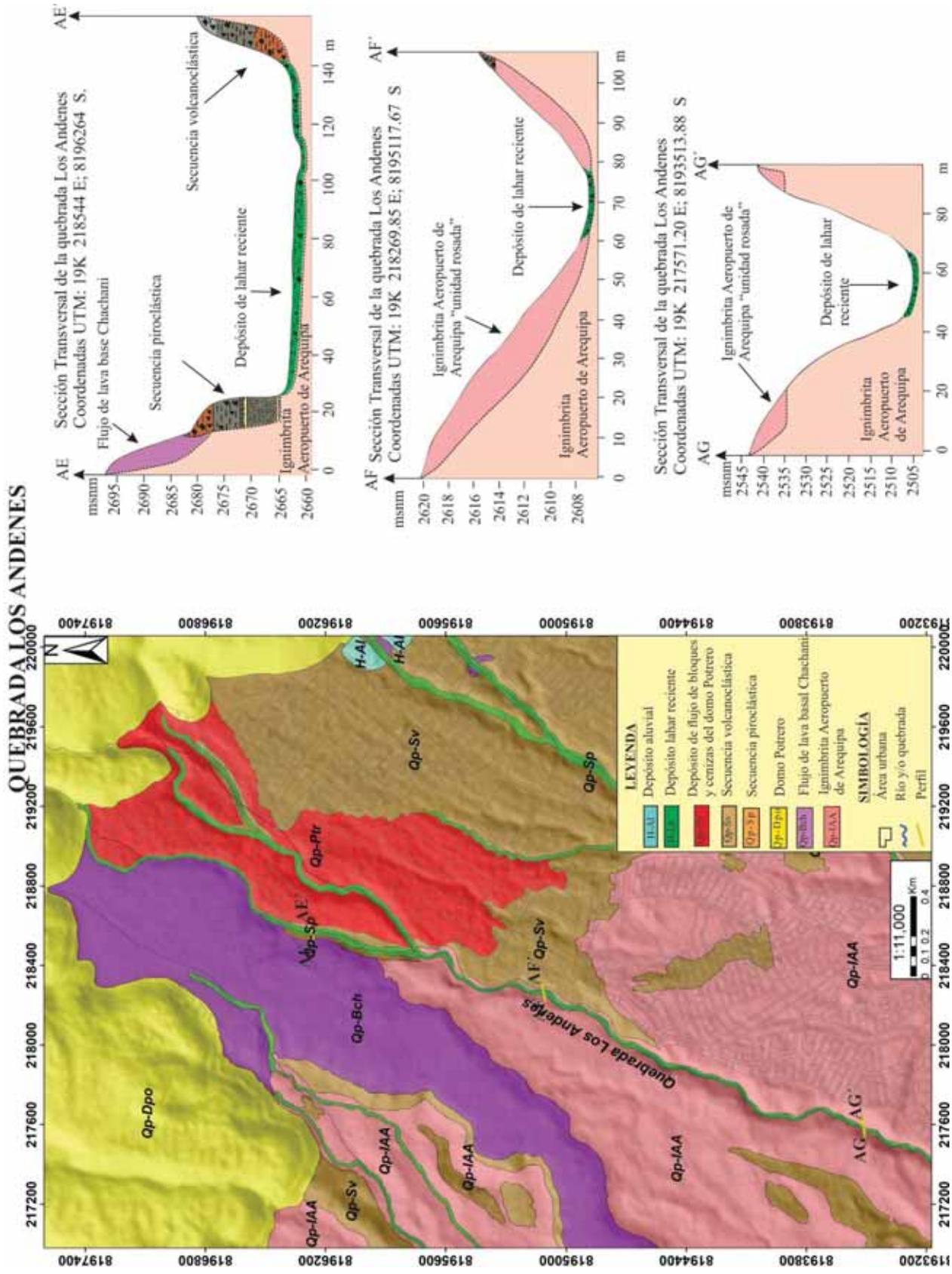


Figura 4.48. Perfiles estratigráficos: AE-AE', AF-AF' y AG-AG', de la quebrada Los Andenes. Fuente: Elaboración propia.

## **CAPITULO V: MODELAMIENTO DE LAHARES EN EL SUR DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CHACHANI**

### **5.1 Método por simulación numérica**

Este método se basa en la aplicación de modelos numéricos asistidos por computadora. Los modelos de este tipo son una simplificación cuantitativa de la realidad, los cuales según Griswold (2004) pueden clasificarse de la siguiente manera

- Modelos de base física
- Modelos de base estadística
- Modelos de base física y estadísticas

Para resolver los modelos numéricos se requiere de la representación de un evento lahárico sobre una determinada superficie, en este sentido, los programas de computadora como los sistemas de Información Geográfica (SIG) son útiles, ya que pueden trabajar la componente espacial y representar distintos atributos de carácter geográfico (Muñoz, 2007).

### **5.2 Modelamiento de lahares**

La complejidad del comportamiento dinámico de los lahares ha dado lugar a una diversidad de enfoques de modelado, que van desde simples modelos empíricos que carecen de física hasta sofisticados modelos basados en la física. Estos modelos de lahar tienen cuatro componentes principales: (1) un conjunto de términos que describen la conservación de la masa y el momento del flujo (2) una descripción de la geometría del canal (3) un medio de cuantificación de resistencia al flujo (4) un medio para resolver numéricamente el conjunto resultante de ecuaciones. Estos se basan típicamente en análisis estadísticos de los eventos de lahar y depósitos pasados que predicen el comportamiento promedio de los lahares futuros sin tener en cuenta la física de flujo subyacente. Cabe señalar que los resultados de dichos modelos se centran típicamente en parámetros tales como la velocidad de flujo, descarga máxima y el área de inundación (Manville et al., 2013).

Hasta la actualidad existen varios métodos numéricos para realizar el modelamiento de lahar como: TITAN2D, FLO-2D, MSF, RAMMS, HEC-RAS, etc. Estos modelos han sido adaptados para el modelamiento de lahar. Mientras que el programa, LAHARZ fue diseñado únicamente para los lahares y hasta la actualidad es el programa más utilizado y con resultados más precisos y detallados.

### **5.3 LaharZ**

Es un conjunto de programas de computador basados en el Sistema de Información Geográfica (SIG), diseñado por Iverson et al. (1998) del Servicio Geológico de Estados

Unidos (USGS). Se basa en un modelo físico y estadístico, que utiliza dos ecuaciones con el fin de delinear zonas de amenaza por flujos de escombros (lahares). En su conjunto, estos análisis dieron como resultado dos ecuaciones semi empíricas que predicen (A) las áreas transversales de la inundación del valle y (B) las áreas de planimetría como funciones del volumen del lahar (V). Estas ecuaciones (A) y (B), conservan la masa, momento y energía durante el cálculo de la superficie de inundación y utilizan las fórmulas siguientes:

$$A = \alpha_1 V^{2/3}$$

$$B = \alpha_2 V^{2/3}$$

Donde

A: Área de inundación de un lahar en una sección transversal del canal,

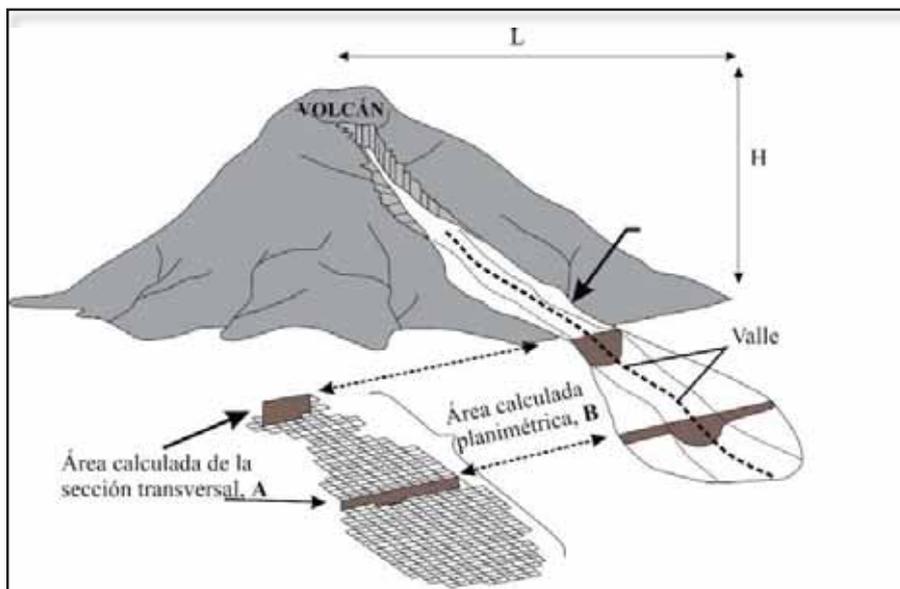
B: Área de inundación de un lahar en su sección planimétrica,

$\alpha$ : es un valor constante que se calcula estadísticamente. En LaharZ,  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  se obtuvieron mediante el análisis de 27 lahares en 9 volcanes que se localizan en los siguientes países: Estados Unidos de América, México, Colombia, Canada y Filipinas (Iverson et al., 1998).

Los resultados que se obtuvieron fueron:  $\alpha_1 = 0.05$  y  $\alpha_2 = 200$ ,

V: volumen del lahar

El programa LaharZ, también se utiliza, para peligros de corriente de densidad piroclástica y avalancha de escombros, utilizando el “cono de energía” (Malin y Sheridan, 1982). Para las zonas de peligro proximales alrededor del volcán. El método postula que el alcance horizontal (L) de un flujo piroclástico está en función de la diferencia de alturas (H), entre el punto de generación del flujo y el punto de depósito (Fig. 5.1).



**Figura 5.1** Diagrama esquemático que muestra una trayectoria idealizada para un lahar y las relaciones geométricas entre H y L; las cuales describen la extensión de la zona de riesgo proximal, y A y B, que describen la extensión de la zona de riesgo distal de la inundación (Iverson et al., 1998).

### 5.3.1 Datos para el procesamiento con el programa LaharZ

Para utilizar el programa lahar Z se requiere de un modelo de elevación digital (DEM), un punto de inicio y el volumen de lahar. En la simulación con programa laharZ se utilizó un DEM de 12 m de resolución, el cual se generó utilizando imágenes Alos Palsar.

Parámetros del LAHARZ	
Volumen (m <sup>3</sup> )	ArcGis, utilizando el modelo de elevación Digital (DEM).
Punto de inicio	

**Tabla 5.1.** Parámetros que se utilizarán para el modelamiento de lahar, con el programa laharZ.

### 5.3.2 Parametros de LAHARZ

#### 5.3.2.1 Modelo de elevación digital (DEM)

Un Modelo Digital de Terreno (MDT) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. El tipo de MDT más conocido es el Modelo Digital de Elevaciones (DEM), un caso particular de aquel, en el que la variable representada es la cota del terreno en relación a un sistema de referencia concreto.

Para modelar la superficie topográfica del sector sur del complejo volcánico Chachani se utilizó un DEM, de 12 m de resolución. El valor de pixel es de formato entero (métrico) 16 bit para el caso del DEM.

#### 5.3.2.2 Volumen de lahar

Para determinar el volumen de lahar, se estimó tres volúmenes de 1, 4 y 9 millones de m<sup>3</sup>. Estos volúmenes están siendo descritos con más detalle en el capítulo VI.

#### 5.3.2.3 Zona de generación de lahar

La zona de generación de lahar está delimitada por el divortium aquarum (línea imaginaria que traza la separación entre dos vertientes o cuencas fluviales limítrofes), (Fig. 5.2).

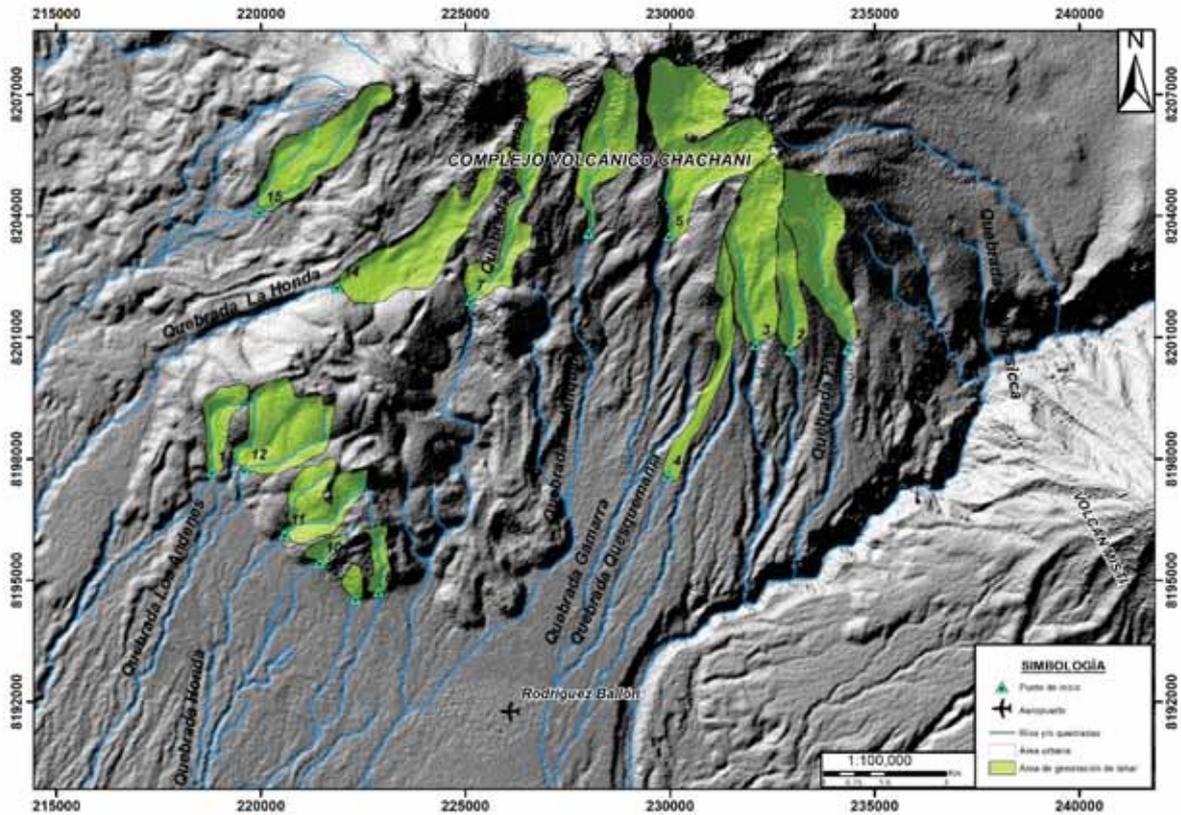


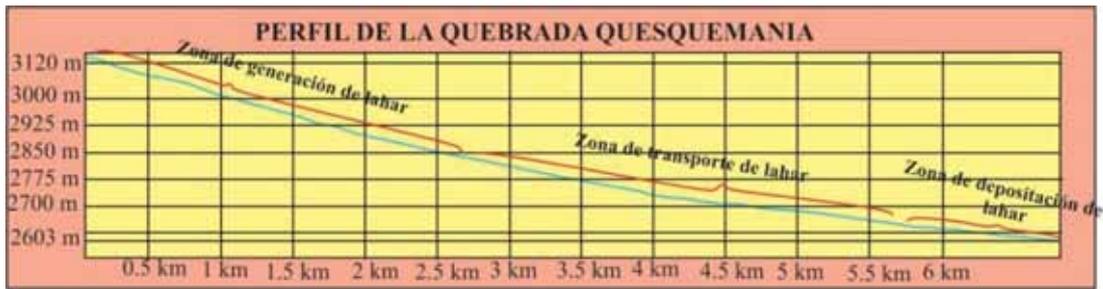
Figura 5.2. Área de generación de lahar y el punto de inicio de lahar.

El límite vertical de la zona de generación del lahar no es muy claro, este depende directamente del cambio de pendiente de la quebrada. En las figuras 5.3; 5.4; 5.5; 5.6; 5.7; 5.8; 5.9; 5.10 y 5.11, se muestra la zona de generación de lahar para las quebradas: Pastoraíz, Quesquermania, Gamarra, Estanquillo, Añashuayco, Municipal, Apacheta, Honda y Los Andenes respectivamente. En estos perfiles se muestran zonas de: generación, transporte y deposición de los lahares.

En el sector sureste del complejo, se puede reconocer la zona de generación, zona de transporte y la zona de deposición de lahar (Figs. 5.3; 5.4; 5.5 y 5.6), mientras en el sector suroeste solo se puede reconocer la zona de generación del lahar y la zona deposición (Figs. 5.7; 5.8; 5.9; 5.10 y 5.11). Cabe mencionar que el cambio entre estas tres zonas es de manera transicional, no existiendo un límite marcado entre cada zona.



Figura 5.3. Perfil de la quebrada Pastoraíz, donde se observan: la zona de generación, zona de transporte y la zona de deposición. Fuente: Elaboración propia.



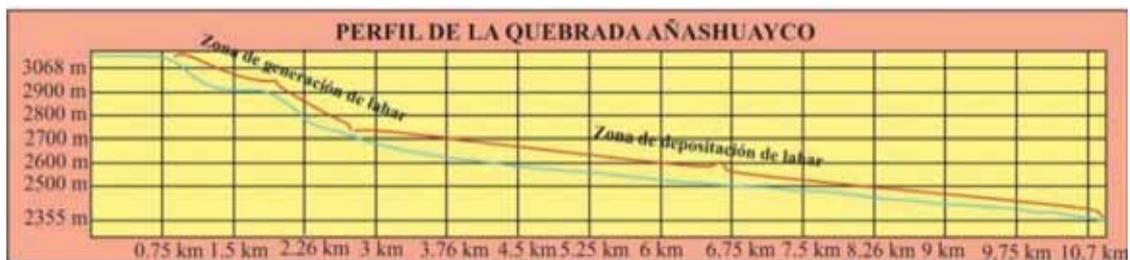
**Figura 5.4.** Perfil de la quebrada Quesquemania, donde se observan: zona de generación, zona de transporte y la zona de deposición. Fuente: Elaboración propia.



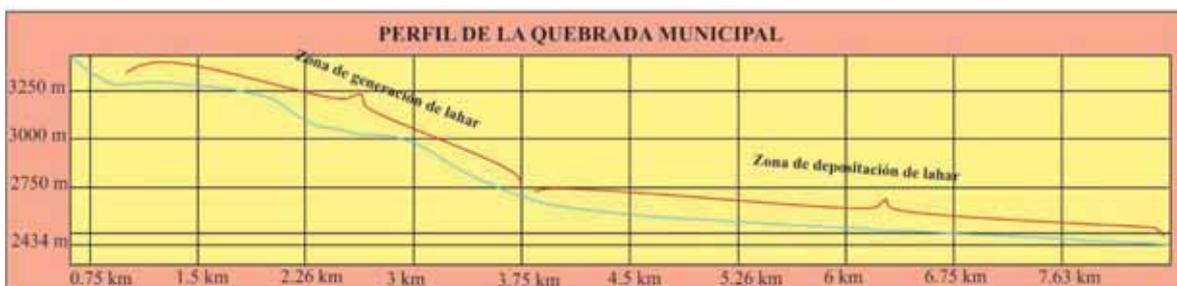
**Figura 5.5.** Perfil de la quebrada Gamarra, donde se observan: zona de generación, zona de transporte y la zona de deposición. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.6.** Perfil de la quebrada Estanquillo, donde se observan: zona de generación, zona de transporte y la zona de deposición. Fuente: Elaboración propia.



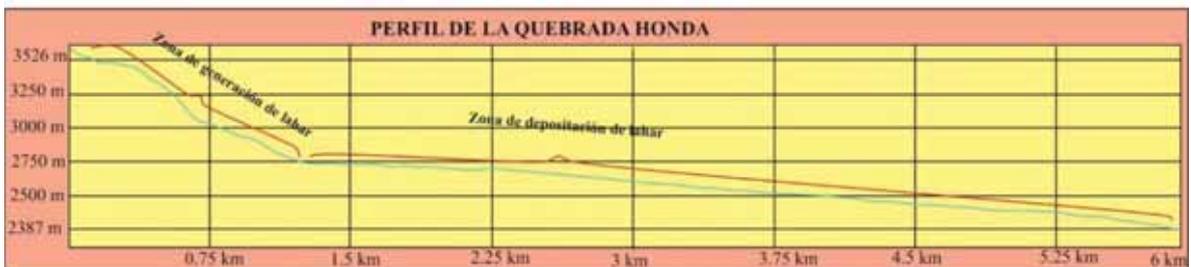
**Figura 5.7.** Perfil de la quebrada Añashuayco, donde se observan: zona de generación y la zona de deposición. Fuente: Elaboración propia.



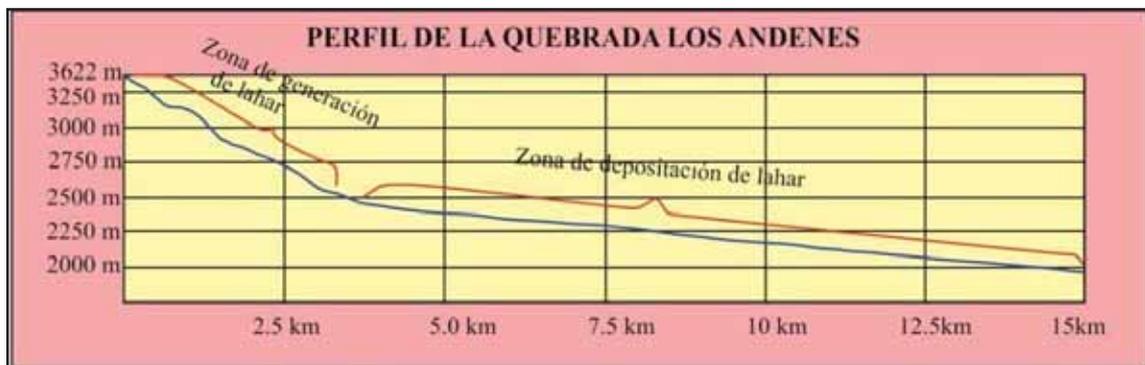
**Figura 5.8.** Perfil de la quebrada Municipal, donde se observan las zonas de generación y la zona de deposición. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.9.** Perfil de la quebrada Apacheta, donde se observan: zona de generación y la zona de deposición. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.10.** Perfil de la quebrada Honda, donde se observan: zona de generación y la zona de deposición. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5.11.** Perfil de la quebrada Los Andenes, donde se observa las zonas de generación y la zona de deposición. Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.3 Modelamiento con el programa Lahar Z

El programa laharZ realiza simulaciones en el entorno del programa ArcGis, como parte de la herramienta Arctoolbox, tal como se observa en la figura 5.12. En el ArcGis ingresamos el DEM de 12 m de resolución y trabajamos con las herramientas del laharZ. El tiempo de simulación depende de la resolución de un DEM.

#### Pasos para el modelamiento con programa LaharZ

1. Se ingresó al programa ArGis. En el menú Arctoolbox, añadimos el programa laharZ\_py (Fig. 5.12)

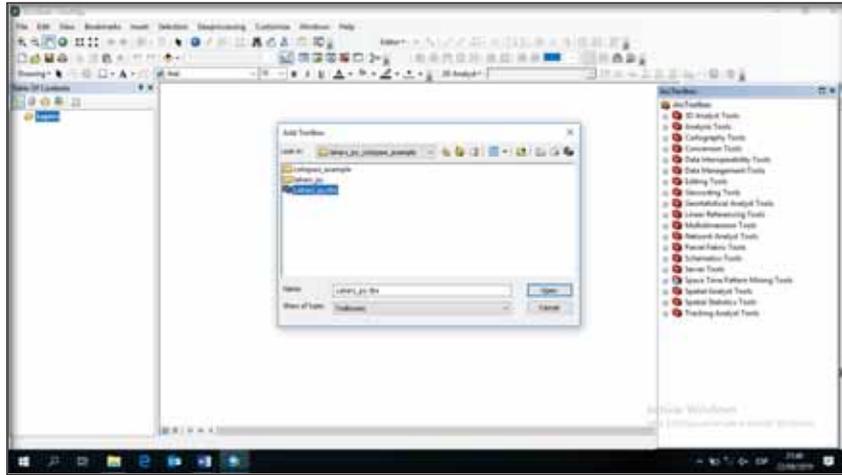


Figura 5.12 Añadiendo en el menú ArcToolbox, el programa LaharZ.

2. Dentro del programa ArGis se añadió el DEM de 12 m de resolución (Fig. 5.13).

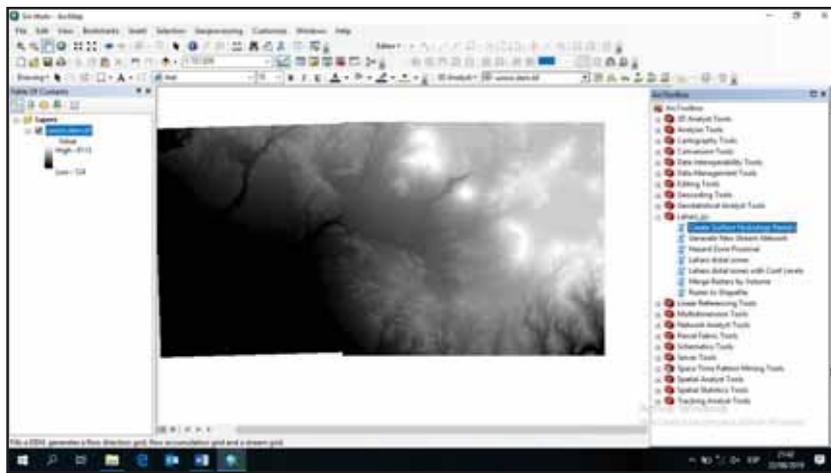


Figura 5.13 DEM de 12 m de resolución.

3. Sobre el DEM, el programa dibuja las líneas de drenaje. Para obtener la hidrología se ingresa en el menú ArcToolbox, seleccionamos laharZ\_py, y creamos la hidrología (Fig. 5.14).

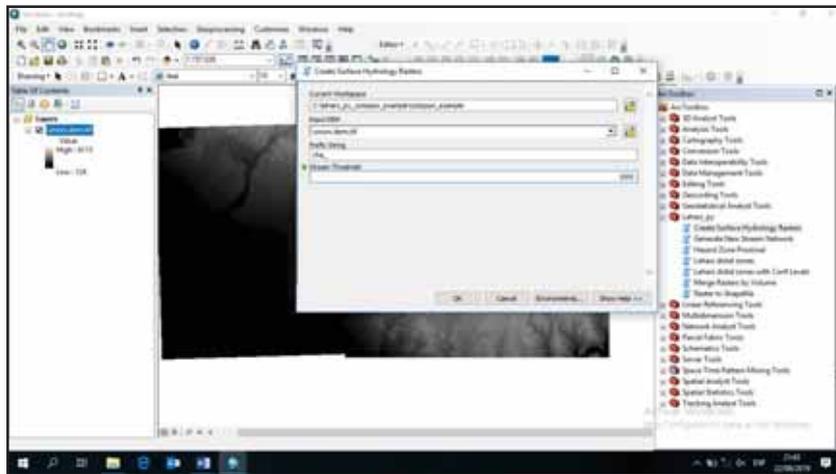


Figura 5.14. Hidrología del DEM de 12 m de resolución.

- Para realizar el modelamiento de lahares, se utilizó la opción “Lahar distal zones” (Fig. 5.15), se requiere ingresar los datos del DEM con sufijo “fil”, los volúmenes en metros cúbicos y los puntos de inicio de lahares, en coordenadas UTM. Estos son utilizados por LaharZ para calcular (A) y (B).

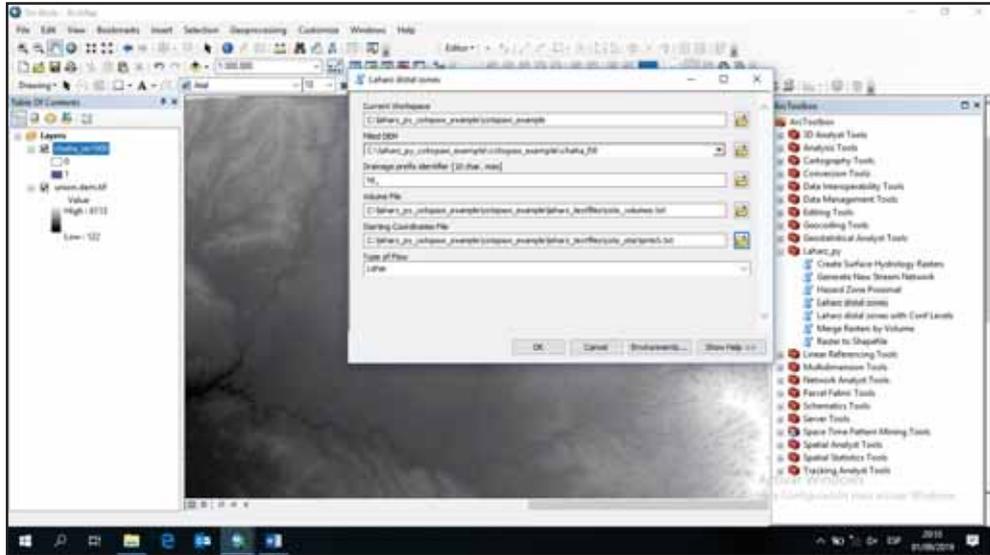


Figura 5.15. Datos de ingreso para hacer correr el programa LaharZ.

- El programa comienza a rellenar las secciones de corte al canal desde el pixel de inicio hasta el pixel situado en el final a través de la línea de drenaje. Para ello, LaharZ rellena una sección de corte y cuenta los pixeles inundados en su sección planimétrica. En el interior de esta superficie, suma las secciones de corte contiguas hasta alcanzar el valor de (B). Para este proceso el tiempo de duración depende la resolución del DEM (Fig. 5.16).

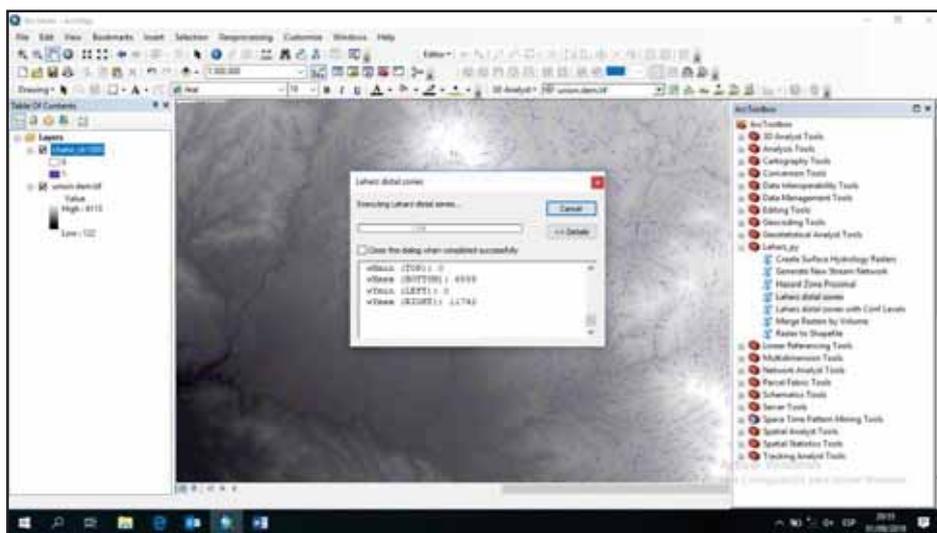


Figura 5.16 Diagrama que muestra el procesamiento del programa LaharZ.

6. Los resultados que nos proporciona el programa son en formato GRID. El tiempo de procesamiento depende de la resolución del DEM y de las características de la computadora. Desde luego, el DEM debe ser mayor que el área de trabajo.
  
7. Para establecer tres escenarios se introduce tres volúmenes. Por ejemplo, para un escenario de alto peligro se introduce el valor mínimo del volumen que equivale a 2 millón de m<sup>3</sup>; cual se muestra de color rojo (Fig. 5.17). Este escenario ocurre cada año en el sector sur del complejo volcánico Chachani, por ejemplo en 2017 en la Variante Uchumayo se produjeron lahares dejando a tres personas fallecidas (Fuente: El Búho, 2018) y en el 2018 en la quebrada Añashuayco, se produjo lahares dejando a una persona fallecida. (Fuente: RRP noticias, 2018). Para un escenario de moderado peligro, se introduce el valor de 5 millones de m<sup>3</sup>, el cual corresponde al color anaranjado (Fig. 5.18), y Para un escenario de bajo peligro, se introduce el valor más alto de 9 millones de m<sup>3</sup>; el cual corresponde al color amarillo. (Fig.5.19).

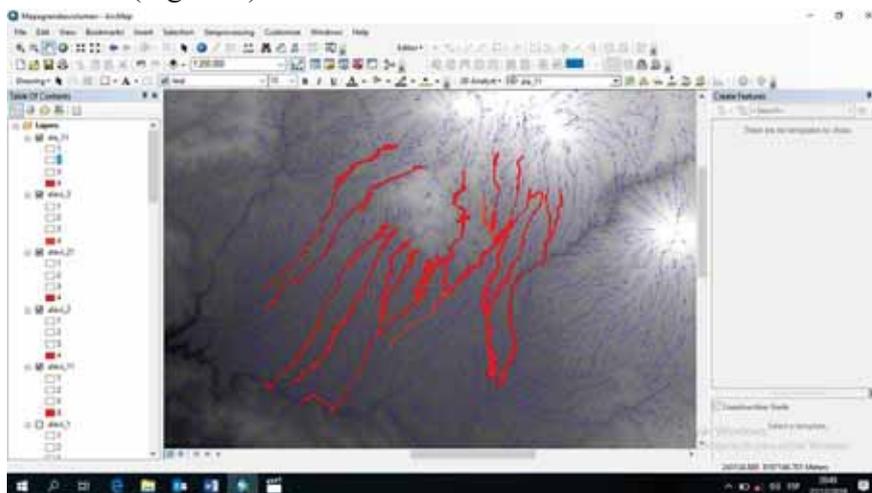
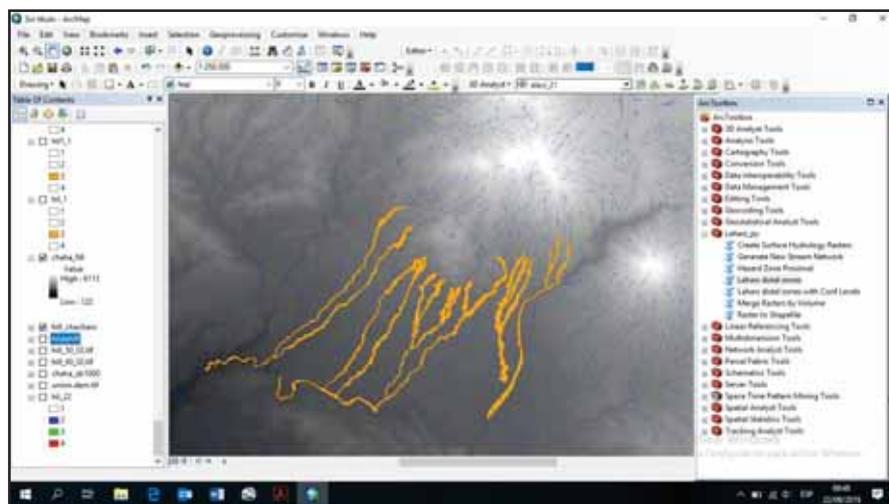
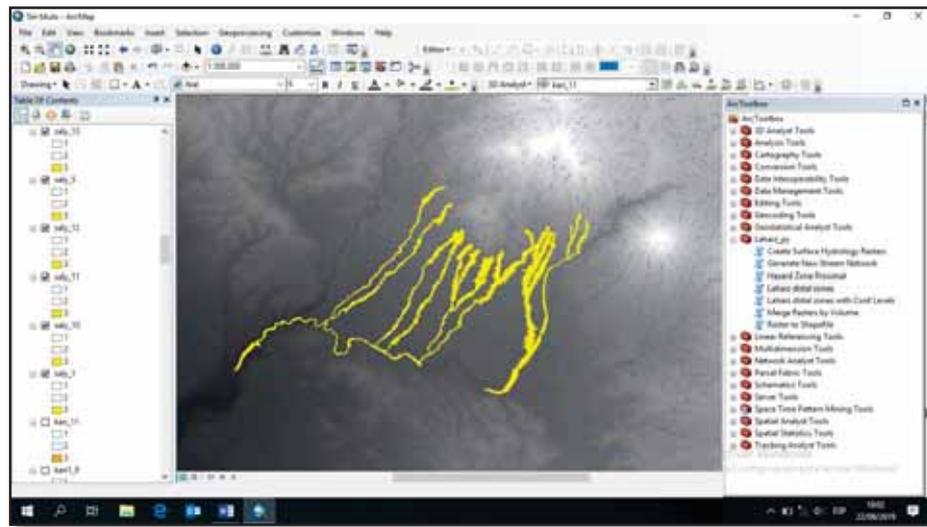


Figura 5.17 Diagrama que muestra el procesamiento del programa LaharZ, para un peligro alto.

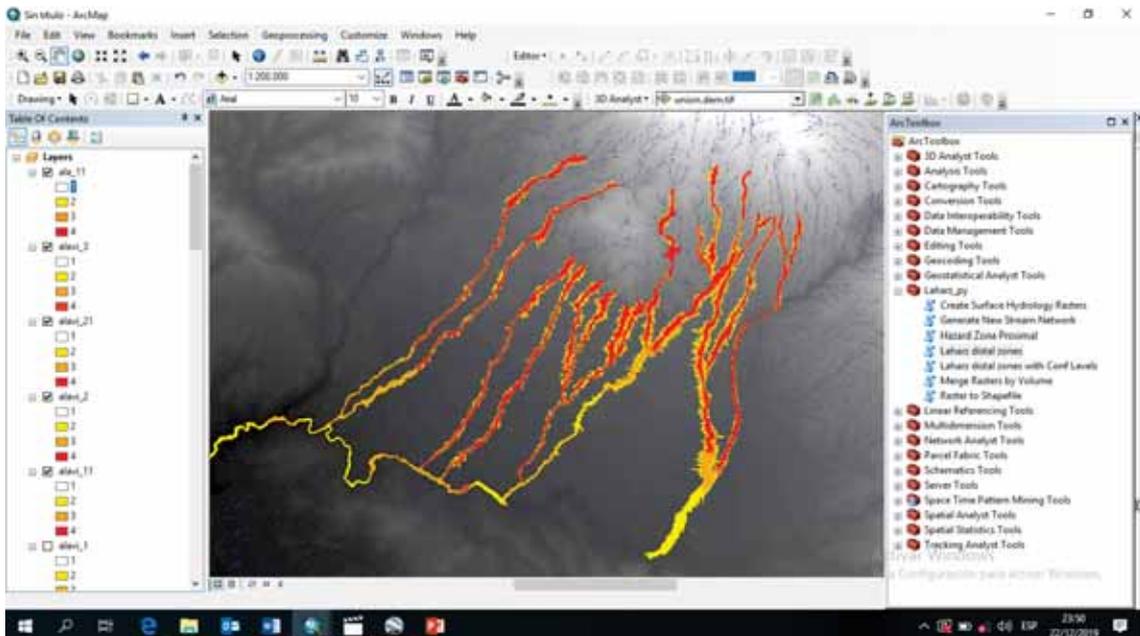


**Figura 5.18** Diagrama que muestra el procesamiento del programa LaharZ, para un peligro moderado.



**Figura 5.19** Diagrama que muestra el procesamiento del programa LaharZ, para un bajo peligro.

8. Para la confección de mapa de peligro por lahares, se obtiene introduciendo los datos de los tres volúmenes y el punto de inicio de lahares. Resultando zonas de: alto peligro (rojo), moderado peligro (amarillo) y bajo peligro (naranja) (Fig.5.20).



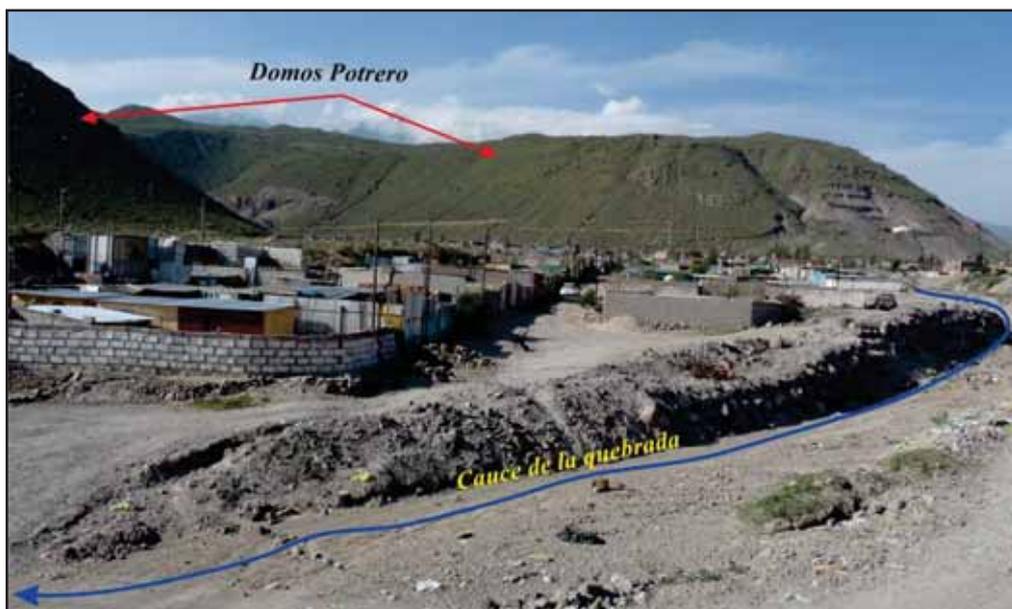
**Figura 5.20** Diagrama esquemático que muestra una trayectoria idealizada para un lahar de alto peligro, moderado peligro y bajo peligro, del sur del complejo volcánico Chachani.

## CAPITULO VI: EVALUACIÓN DE PELIGRO POR LAHARES

El resultado del cartografiado geológico de los depósitos de lahares del sur del Complejo Volcánico Chachani, constituye la base para descifrar el comportamiento de los lahares y predecir el nivel de peligrosidad a través de escenarios de alto, moderado y bajo peligro. Para poder predecir estos valores se tomó en cuenta, el volumen de los lahares.

Los lahares actúan directa e indirectamente sobre las zonas pobladas provocando daños y muchas veces provocando víctimas humanas. Cabe señalar que la población ha construido sus viviendas en el cauce principal de las quebradas, haciendo que estas zonas se encuentren en un peligro alto, en los meses de enero, febrero, marzo y abril, como se muestran en las fotografías 6.1, 6.2 y 6.3.

- En la quebrada Estanquillo (distrito de Cerro Colorado), en la “Asociación La Victoria”, la población se encuentra asentada en la rivera de la quebrada, como se muestra en la fotografía 6.1. En el Asentamiento Humano (AAHH) Villa Las Canteras se ha identificado una vivienda en la quebrada principal (Fotografía 6.2). Cabe señalar que la quebrada Estanquillo, en los meses de verano se encuentra muy activo debido a las precipitaciones intensas.
- En la quebrada Municipal (Distrito de Cerro Colorado). Ubicado en el Asentamiento Humano (AAHH) Ciudad de Dios, en el cauce principal de la quebrada, se observa la carretera pavimentada, y el asentamiento de la población, (Fotografía 6.3). Cabe señalar que, en las quebradas Virgen de Socorro y Apacheta la población se encuentra asentada en el cauce principal.



**Fotografía 6.1.** Vista de la población asentada sobre el depósito de lahar reciente, visible en la quebrada Estanquillo. Ubicado en la Asociación La Victoria-Cerro Colorado.



**Fotografía 6.2.** Vista de la vivienda, sobre el depósito de lahar reciente visible en la quebrada Estanquillo. Ubicado en el Asentamiento Humano Villa Las Canteras- Cerro Colorado.



**Fotografía 6.3.** Vista de la población asentada en el cauce principal de la quebrada Municipal, ubicada en el Asentamiento Humano Ciudad de Dios-Cerro Colorado.

## **6.1 Cálculo de volumen del lahar para un escenario alto, moderado y bajo peligro del sur del Complejo Volcánico Chachani**

Para calcular el volumen de los flujos de lahares de alto peligro se tomó en cuenta el volumen de agua generado por las precipitaciones intensas, mientras que el volumen de moderado peligro, ha sido tomado de los datos calculados del complejo volcánico Sabancaya- Perú (Rivera et al., 2016) y el volumen de bajo peligro han sido tomado de los datos calculados para los flujos de lahares antiguos del complejo volcánico Pichincha de Ecuador (Canuti et al, 2002). A continuación se describen la obtención de los volúmenes de lahares para cada escenario.

### **6.1.1 Cálculo de volumen de lahar, para un escenario de alto peligro**

Los lahares para un escenario de alto peligro, se obtienen a partir de los datos de la precipitación. Para este escenarios se tomó los cálculos realizados por Vallance, 2000. El autor indica que el volumen de lahar se genera, con 50% de agua y 50% de escombros. A continuación, se describe como se obtiene el volumen de lahar para este escenario.

### Cálculo de volumen de agua para un escenario de alto peligro

Para el cálculo del volumen de agua que se vería involucrado en la generación de lahares en el sur del Complejo Volcánico Chachani, se tomaron en cuenta los datos de las precipitaciones intensas de los meses de enero, febrero y marzo y un área determinada por el divortium aquarum (6083714.083).

En las inmediaciones del Complejo Volcánico Chachani se encuentran cuatro estaciones de meteorología e hidrología- SENAMHI (ver capítulo I; Fig. 1.11; Tabla 1.2). Para el cálculo de volumen de agua se consideró los datos de la estación Pampa de Arrieros, ubicado en el Distrito de Yura a 16 km al noroeste de la zona de estudio. Esta estación, se encuentra más próximo a este complejo, además presenta condiciones climatológicas similares.

En el año 2017, la estación pampa de Arrieros registró una precipitación de 201 mm /mes, y es esta cantidad de precipitación la que se tomará como valor máximo para el modelamiento. Los factores de infiltración y la evapotranspiración no son considerados para el modelamiento, puesto que para desencadenar un lahar, los suelos ya se encuentran sobresaturados, y la evapotranspiración es mínima porque este fenómeno ocurre en un tiempo muy corto.

Los lahares son fenómenos eventuales que solo ocurre en horas, como lo que ocurrió el 26 de enero en la Variante Uchumayo presentando una precipitación de 12mm/h (SENAMHI, 2017), generó la presencia de lahares, lo cual implica que los días anteriores se presentaron precipitaciones pluviales pequeñas moderadas llegando a saturar el suelo para luego provocar la ocurrencia de lahares.

AÑO / MES / DÍA	01/01/2017	02/01/2017	03/01/2017	04/01/2017	05/01/2017	06/01/2017	07/01/2017	08/01/2017	09/01/2017	10/01/2017	11/01/2017	12/01/2017	13/01/2017	14/01/2017	15/01/2017
PRECIPITACIÓN (mm/día) TOTAL	1.6	4.5	6.4	17.2	1.8	2.2	0.8	0	5.2	11.4	5.6	7.3	9.9	21.2	6.4

AÑO / MES / DÍA	16/01/2017	17/01/2017	18/01/2017	19/01/2017	20/01/2017	21/01/2017	22/01/2017	23/01/2017	24/01/2017	25/01/2017	26/01/2017	27/01/2017	28/01/2017	29/01/2017	30/01/2017	31/01/2017
PRECIPITACIÓN (mm/día) TOTAL	5.4	6.1	6.8	5.4	3.3	1.8	6.8	5.8	7.2	20.1	12.2	5	3.1	2	5.4	3.1

**Tabla 6.1** Datos de la precipitación del mes de enero del 2017; el cual genero la ocurrencia de lahares en la Variante Uchumayo (SENAMHI, 2017).

Para calcular el volumen total de agua que pueda generarse en la zona: primero se obtiene el área de la superficie (determinada por el divortium aquarum), para cada quebrada (Fig. 5.2). Estas áreas se multiplica por la precipitación calculada, la precipitación se convierte a metros: (Precipitación = 0.201m), obteniendo como resultado el volumen máximo de agua. Para tomar el volumen de agua, se tomó el mayor valor obtenido (Tabla 6.1).

N° de la quebrada	Área (m2)	P-Max (m)	Volumen Máximo (m3)
1	4225769.503	0.201	849379.6701
2	1667323.011	0.201	335131.9253
3	4665310.725	0.201	937727.4557
4	2095933.661	0.201	421282.6658
5	<b>6083714.083</b>	0.201	<b>1222826.531</b>
6	3340419.968	0.201	671424.4136
7	3943236.9	0.201	792590.617
8	743694.2787	0.201	149482.55
9	336212.6769	0.201	67578.74805
10	411493.4001	0.201	82710.17341
11	2686088.266	0.201	539903.7415
12	4028701.109	0.201	809768.923
13	1341633.443	0.201	269668.3221
14	4660568.581	0.201	936774.2848
15	3728077.016	0.201	749343.4803

**Tabla 6.2** Cuadro de resumen, de los volúmenes de agua estimados, para la generación de lahares del sur del Complejo Volcánico Chachani.

En la tabla 6.1, se determinó el volumen máximo de **1222826.531**; este volumen servirá para determinar el volumen total del lahar, para un escenario de alto peligro.

### Calculo de volumen de lahar para un escenario alto peligro

Según Vallance (2000), los lahares de tipo secundario se generan con 50% de agua y 50% de escombros. Estos valores son proporción promedio general de agua y escombros en los flujos de escombros. Tomando en cuenta estas proporciones se calculó un volumen máximo de 1999307.4 (tabla 6.3).

	líquido (m <sup>3</sup> )	escombros(m <sup>3</sup> )	lahar (m <sup>3</sup> )
<b>Vol. Máximo</b>	1222826.531	1222826.531	2445653.06

**Tabla 6.3** Cuadro de resumen, de los volúmenes estimados, para la generación de los lahares.

- Por lo cual se empleará un volumen de 2 millones de m<sup>3</sup>, para un escenario de alto peligro.

### 6.1.2 Cálculo de volumen de lahar para un escenario de moderado peligro

Para el cálculo de volumen para un escenario de moderado peligro, se tomó en cuenta el volumen de lahar de complejo volcánico Sabancaya (Bellot, 2011; Rivera et al, 2016).

El complejo volcánico Sabancaya, está localizado a 76 km al NW de la ciudad de Arequipa, en la provincia de Caylloma. El estratovolcán Sabancaya es de edad Holocénica, la fresca morfología de los domos y coladas de lava en bloques de este volcán sugieren su emplazamiento en una etapa muy reciente. Para el modelamiento de peligros por lahares del complejo volcánico Sabancaya se utilizó el software LAHARZ, tomando en

cuenta los volúmenes de 5,10 y 20 millones de m<sup>3</sup>. El volumen de 5 millones m<sup>3</sup>, tomaron para lahares de poco volumen y que son más frecuentes en las temporadas de lluvia, y están asociadas a erupciones de baja a moderada magnitud (IEV 1-2) y los lahares de 10 y 20 millones de m<sup>3</sup>, podrían estar asociadas a erupciones de gran magnitud (IEV ≥3), la posibilidad de ocurrencia de tales erupciones es baja a muy baja (Rivera et al., 2016).

El clima del Complejo Volcánico Sabancaya corresponde a un clima frío, presentando precipitaciones pluviales intensas entre los meses de diciembre-abril, con temperaturas que varían de -6-15°C.

El Complejo Volcánico Chachani y el Complejo Volcánico Sabancaya, se encuentran en el sur del Perú y las condiciones climáticas en ambos complejos son semejantes, por ende se tomó el volumen de 5 millones de m<sup>3</sup>, para un escenario de moderado peligro.

### **6.1.3 Cálculo de volumen de lahar para un escenario de bajo peligro**

Para el cálculo de volumen para un escenario de bajo peligro, se tomó en cuenta el volumen de lahar antiguo del complejo volcánico Pichincha Canuti et al. (2002).

El complejo volcánico Pichincha, se encuentra a 10 km de la ciudad de Quito, capital de Ecuador. Este complejo está compuesto por un volcán activo Guagua Pichincha y un volcán extinto Rucu Pichincha. La presencia de casquete glaciar, solo se puede observar en los meses de verano.

En las quebradas que descienden del complejo volcánico Pichincha, se identificaron depósitos de lahares antiguos que se encuentran en la ciudad de Quito - Ecuador. Para el cálculo de volumen de lahar antiguo, en el complejo volcánico Pichincha Canuti et al. (2002) se enfocaron en medir un total de 49 secciones transversales de canales, que discurren hacia la ciudad de Quito. Estos depósitos de lahares antiguos, contenían grandes cantidades de escombros rocosos arrastrados. Los datos estratigráficos de los depósitos fueron obtenidos de la excavación del sitio de construcción, para poder medir los espesores, ya que las áreas investigadas están muy urbanizadas y hay pocos afloramientos naturales. El espesor de los depósitos y la extensión del área se interpolaron para estimar el volumen de los depósitos. A partir de los datos obtenidos estimaron los volúmenes de lahares de 1.6 millones m<sup>3</sup>, 7.4 millones m<sup>3</sup> y 9 millones m<sup>3</sup> (Canuti, et al, 2002).

Los depósitos del sur del complejo volcánico Chachani, presenta las mismas características que el complejo volcánico Pichincha; ya que al sur CVC, también se llegaron a cartografiar depósitos de lahares antiguos y sobre estos depósitos la población se encuentra asentada; por lo cual se utilizó el volumen de 9 millones m<sup>3</sup>, para un escenario de bajo peligro.

## 6.2. Mapa de peligro por lahares del sur del complejo volcánico Chachani

El mapa de peligro por lahares, es elaborado para ser utilizado en la planificación del crecimiento urbano, para planificar obras de infraestructuras, para definir las rutas de evacuación e identificar las zonas de peligro frente a un escenario de lahar, del sur del complejo volcánico Chachani.

En la elaboración de mapa de peligro por lahares se utilizaron los volúmenes: máximo, moderado y mínimo, y el punto de inicio de lahar. De esta forma se determinaron las zonas de alto, moderado y bajo peligro del sur del Complejo Volcánico Chachani (Fig. 6.4).

Se utilizó el programa LAHARZ\_py (Iverson et al., 1998) para determinar las áreas por inundación por lahares (flujos de lodo). Como se explicó anteriormente este programa correlaciona el volumen de un evento lahárico y el área planimétrica y en sección transversal inundadas por un lahar.

En el complejo volcánico Chachani se estimaron volúmenes de 2 millones  $m^3$ , para lahares de poco volumen que son frecuentes en épocas de lluvia (enero, febrero, marzo y abril), según SENAMHI. Para lahares menos frecuentes se ha considerado un volumen de 5 y 9 millones  $m^3$ , la posibilidad de que ocurran este tipo de eventos es muy baja. Estos dos volúmenes se estimaron a partir de los lahares del complejo volcánico Sabancaya (Perú) y del complejo volcánico Pichincha (Ecuador).

En el mapa de peligros por lahares, la zona roja es considerada la zona de **alto peligro**, y corresponde a las áreas que pueden ser afectadas por lahares de hasta 2 millones de  $m^3$ , que están asociadas a las precipitaciones intensas producidas en los meses de verano (enero, febrero, marzo y abril). La zona naranja, denominada de **moderado peligro**, puede ser afectada por lahares de volumen moderado, y corresponde a las áreas que pueden ser afectadas por lahares de hasta 4 millones  $m^3$ , que están asociados a las precipitaciones intensas producidas en los meses de verano (enero, febrero, marzo y abril) y por una erupción pequeña del CVC, y la zona amarilla, es la zona considerada de **bajo peligro** o de menor posibilidad de ser afectada por lahares muy voluminosos de 9 millones de  $m^3$ , este fenómeno puede ocurrir por una erupción explosiva del CVC.

### Zona de alto peligro (rojo)

La zona de alto peligro, corresponde a la zona con mayor posibilidad de ser afectada por lahares de poco volumen de 2 millón de  $m^3$ , causados por las precipitaciones intensas que comúnmente ocurren en los meses de enero, febrero, marzo y abril. Según el modelamiento los lahares de este volumen pueden tener un alcance máximo de 13 km.

Estos lahares afectarían: 42 Instituciones Educativas, 2 Puestos de Salud y 28 sectores (Asentamientos Humanos y Urbanizaciones): Alto Cayma, Nazareno, Monteneros, San Miguel, Zamácola, La Tomilla, Acequia Alta Chilina, Carmen Alto, Santa Luisa, Galendulas, Umacollo, La Victoria, Las Flores, Las Canteras, Virgen de Chapi, Granjeros Unidos, Ciudad Municipal, Río Seco, Los Camineros, Apipa, Cuesta Blanca, San Jancinto, Tambillo, Uchumayo, La Rinconada, Piedra Grande, Los Milagros y Las Laderas; las cuales corresponden a los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura y Yanahuara.

### **Zona de moderado peligro (naranja)**

La zona de moderado peligro, corresponde a la zona que puede ser afectada por lahares de moderado volumen de 5 millones de m<sup>3</sup>; causados por las precipitaciones intensas que ocurren en los meses de verano (enero, febrero, marzo y abril) y por una posible erupción del CVC. Este volumen de lahar, fue obtenida del complejo volcánico Sabancaya. Estos lahares tienen un alcance máximo de 20 km.

Estos lahares afectarían: 98 Instituciones Educativas y 36 sectores (Asentamientos Humanos y Urbanizaciones): Alto Cayma, Nazareno, Monteneros, San Miguel, Zamácola, La Tomilla, Acequia Alta Chilina, Carmen Alto, Santa Luisa, Galendulas, La Victoria, Las Flores, Las Canteras, Virgen de Chapi, Granjeros Unidos, Ciudad Municipal, Río Seco, Los Camineros, Apipa, Cuesta Blanca, San Jancinto, Tambillo, Uchumayo, La Rinconada, Piedra Grande, Los Milagros, Las Laderas, Umacollo, Montevello, Vallecito, Mollebaya Chico, Mollebaya Grande y Socosani; las cuales corresponde a los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura, Yanahuara y Sachaca.

### **Zona de bajo peligro (amarillo)**

La zona de bajo peligro, corresponde a la zona que puedo ser afectada por lahares de gran volumen de 9 millones de m<sup>3</sup>. Este volumen de lahar, fue obtenida del complejo volcánico Pichincha. Estos lahares tienen un alcance máximo de 40 km.

Estos lahares de gran volumen afectarían: 136 Instituciones Educativas, 2 Puestos de Salud y 40 sectores (Asentamientos Humanos y Urbanizaciones): Alto Cayma, Nazareno, Monteneros, San Miguel, Zamácola, La Tomilla, Acequia Alta Chilina, Carmen Alto, Santa Luisa, Galendulas, La Victoria, Las Flores, Las Canteras, Virgen de Chapi, Granjeros Unidos, Ciudad Municipal, Río Seco, Los Camineros, Apipa, Cuesta Blanca, San Jancinto, Tambillo, Uchumayo, La Rinconada, Piedra Grande, Los Milagros, Las Laderas, Umacollo, Montevello, Vallecito, Mollebaya Chico, Mollebaya Grande y Socosani, La Aparecida, Alata, Tingo Grande y Alto Cerro Verde; las cuales corresponde a los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura, Yanahuara, Sachaca, Tiabaya y Uchumayo.

MAPA DE PELIGROS POR LAHARES (FLUJO DE LODO) DEL SUR DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CHACHANI

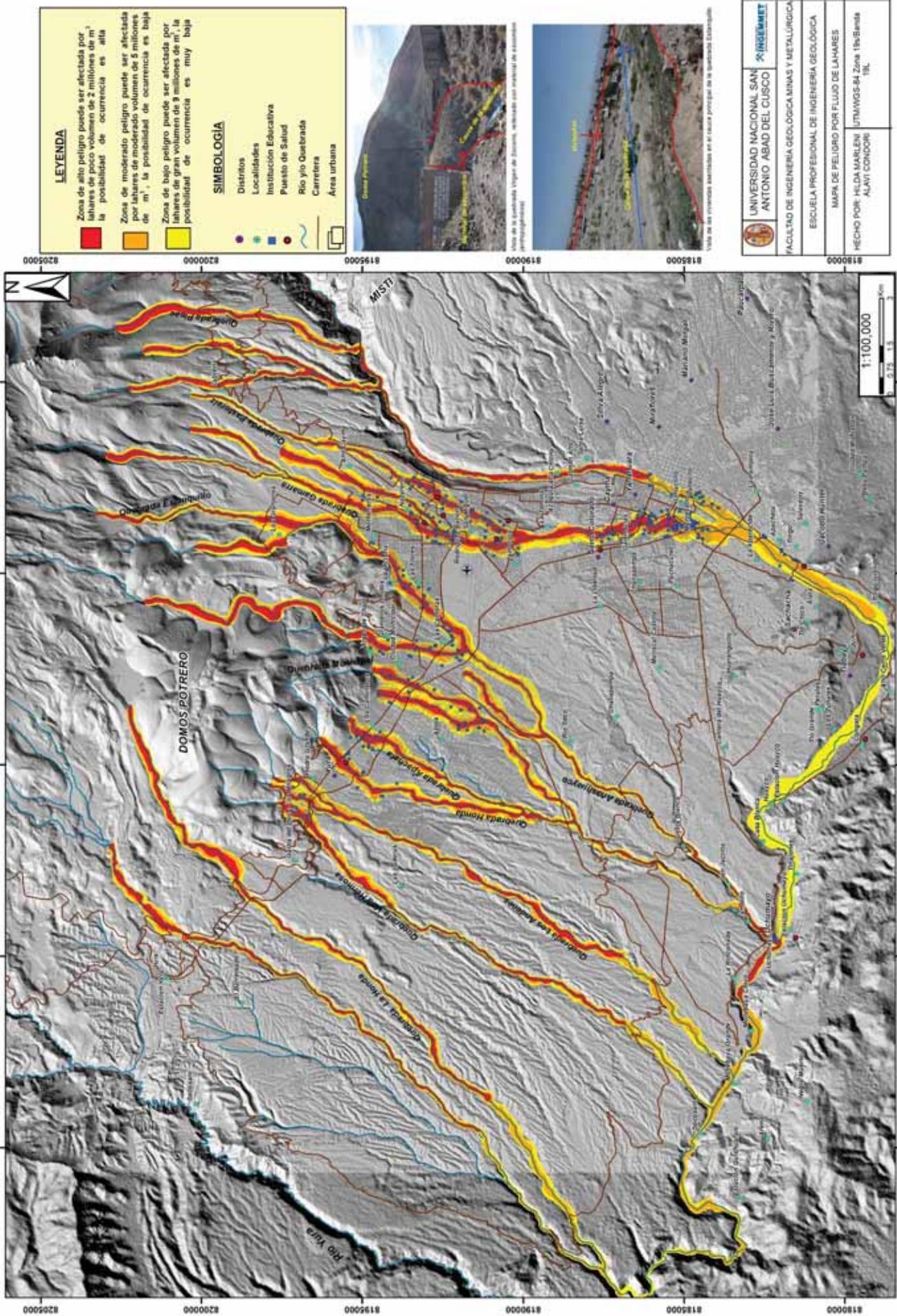


Figura 6.4. Mapa de peligro de lahares (flujo de lodos) en el sur del complejo volcánico Chachani. Fuente: Elaboración Propia

## CAPÍTULO VII: DISCUSIONES

### 7.1 Depósitos de lahares que afloran al sur del Complejo Volcánico Chachani

El cartografiado geológico de los depósitos que afloran al sur del Complejo Volcánico Chachani muestra la presencia de depósitos de flujo piroclástico de bloques y cenizas “domo Cabrerías”, datado en  $56 \pm 31.6$  ka (Aguilar, 2015), depósitos de caída piroclástica de lapilli de pómez (Sacarosa) del volcán Misti, datado en  $33.7 \pm 250$  ka (Cuno, 2018) y depósitos de lahares recientes, todos descansan sobre la ignimbrita Aeropuerto de Arequipa, datada en  $1.65 \pm 0.04$  Ma (Paquereau et al, 2006). Los depósitos antes mencionados, sirven como capas guías para correlacionar los eventos de los lahares (Fig. 7.3). A continuación, se describen cada uno de los eventos.

#### a) Depósitos de lahares emplazados entre $1.65 \pm 0.04$ Ma - $56 \pm 31.6$ ka

Los depósitos de lahares emplazados sobre la ignimbrita Aeropuerto de Arequipa, hasta antes del emplazamiento de los depósitos de flujo piroclástico de bloques y cenizas “domo Cabrerías” se habrían emplazado entre  $1.65 \pm 0.04$  Ma y  $56 \pm 31.6$  ka. Estos depósitos de lahares varían en su litología, ubicación, génesis, estratigrafía y facies. Según el cartografiado se ha identificado en dos sectores: lahares del sector sureste y suroeste.

Los depósitos de lahares del sector sureste: quebradas Pastoraíz, Quesquemanía, Gamarra y Chullo afloran conjuntamente con un depósito de caída de lapilli de pómez del volcán Chachani. En este sector se observan entre 3 a 6 depósitos de lahares y como máximo 2 depósitos de caída de lapilli de pómez que miden entre 50 cm a 1 m de espesor. Estos depósitos de lahares posiblemente se habrían generado por una erupción explosiva del Complejo Volcánico Chachani, debido a las precipitaciones intensas y/o ligadas a la fusión del casquete glaciar del Complejo Volcánico Chachani.

Los depósitos de lahares del sector suroeste: quebradas Añashuayco, Municipal, Virgen de Socorro, Apacheta, Honda y Los Andenes afloran conjuntamente con las secuencias piroclásticas del CVC. Estas secuencias yacen en contacto directo sobre la ignimbrita Aeropuerto de Arequipa. En este sector se han identificado entre 2 a 3 depósitos de lahares, con espesores que oscilan entre de 2 a 5 m y de 15 a 30 depósitos de caída de pómez y escorias, con espesores que oscilan entre 30 cm y 1 m. En las secuencias volcanoclásticas se observa una intercalación de lahares y caídas de escoria y pómez, por lo cual se deduce que los lahares se habrían emplazado durante una actividad recurrente del volcán Chachani y por las precipitaciones intensas y/o ligadas a la fusión del casquete glaciar del Complejo Volcánico Chachani.

#### **b) Depósitos de lahares emplazados entre 56±31.6 y 33.7±250 ka**

Los depósitos de lahares emplazados sobre los depósitos de flujos piroclástico de bloques y cenizas “domo Cabrerías”, son cubiertos por los depósitos de caída de pómez (Sacarosa) del volcán Misti. Estos depósitos de lahares se habrían emplazado entre 56 y 33.7 ka.

Los depósitos de lahares emplazados sobre los depósitos de flujos piroclástico de bloques y cenizas “domo Cabrerías”, corresponden a dos secuencias de depósitos de lahares; las cuales se caracterizan por ser masivos. Estos depósitos se habrían emplazado durante las precipitaciones intensas y/o debido a la fusión del casquete glaciar del Complejo Volcánico Chachani.

#### **c) Depósitos de lahares emplazados entre 33.7 ka y el siglo XIX**

Los depósitos de lahares emplazados sobre las caídas de lapilli de pómez del volcán Misti afloran en las quebradas Estanquillo y Añashuayco al sur del volcán Chachani. Estos depósitos de lahares generalmente son masivos y compactos, con espesores de 1 y 3 m. Estos depósitos de lahares se habrían emplazado durante las precipitaciones intensas y por una posible fusión del casquete glaciar del Complejo Volcánico Chachani.

#### **d) Depósitos de lahares recientes emplazados entre el Siglo XIX y la Actualidad**

Los depósitos de lahares recientes afloran en el cauce principal de las quebradas Pastoraíz, Quesquemania, Gamarra, Chullo (Distrito de Cayma), Estanquillo, Añashuayco, Virgen de Socorro, Municipal, Apacheta (Cerro Colorado), Honda y Los Andenes (Yura). Estas quebradas se caracterizan principalmente por contener materiales antropogénicos (residuos dejados por la actividad humana), los cuales se depositaron a partir de mediados del siglo XIX. Estos depósitos de lahares recientes se han depositado durante las precipitaciones intensas presentados en los meses de enero, febrero, marzo y abril.

### **7.2 Correlación estratigráfica de los depósitos de lahares**

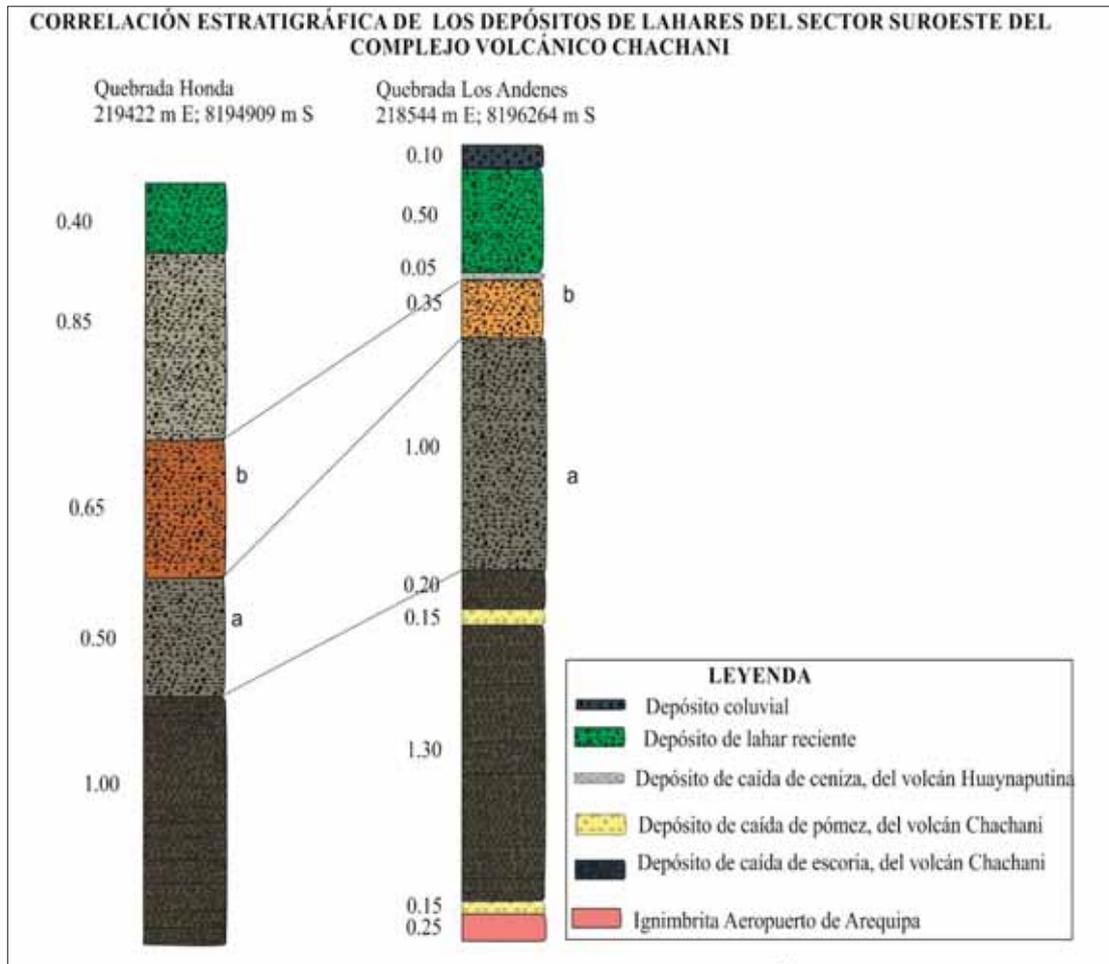
El cartografiado geológico de los depósitos de lahares que afloran en las diversas quebradas al sur del complejo volcánico Chachani, permitió la correlación de los depósitos. A continuación, se describen dichos depósitos.

#### **7.2.1 Correlación estratigráfica de los depósitos de lahar, del sector suroeste del complejo volcánico Chachani**

En las quebradas Honda y los Andenes, se observan secuencias de depósitos de lahares que presentan las mismas características litológicas y facies. Estos depósitos se

emplazaron sobre las secuencias de caída de pómez y escorias del volcán Chachani (Fig. 7.2).

- **Depósito de lahar “a”.** Estos depósitos de lahares, se caracterizan por ser masivos y muy compactos, compuestas por una matriz limo-arcillosa, la cual engloba fragmentos de roca de forma sub angulosa a sub redondeada, de tamaños centimétricos. Estos fragmentos son lavas de composición andesítica (porfiríticas y afaníticas), pómez, de color amarillo a anaranjado y escorias de color gris oscuro y gris claro.
- **Depósito de lahar “b”.** Estos depósitos de lahares se caracterizan, por ser masivo y compacto, compuestos por una matriz limoso de color pardo, la cual engloba fragmentos líticos de forma redondeada sub redondeada, de tamaños centimétricos a decimétricos. Estos fragmentos de roca corresponden a lavas andesíticas porfiríticas de color gris claro y gris oscuro.



**Figura 7.1** Correlación estratigráfica de los depósitos de lahares del sector suroeste del complejo volcánico Chachani. Fuente: Elaboración propia.

### 7.2.2 Correlación estratigráfica de los depósitos de lahar del sector sureste del complejo volcánico Chachani

En las quebradas Pastoraíz, Quesquemania, Gamarra y Chullo se observan secuencias de depósitos de lahares, que presentan las mismas características en su litología y facies; las cuales se encuentran emplazados sobre los depósitos de caída de lapilli de pómez del Complejo volcánico Chachani (Fig.7.2).

- **Depósito de lahar “a”.** En las cuatro quebradas antes mencionadas los depósitos de lahares se caracterizan por ser masivos y muy compactos, compuestos por una matriz limo-arcillosa de color beige, la cual contiene fragmentos líticos monolitológicos (lavas andesíticas porfiríticas), de forma sub angulosa a sub redondeada de tamaños centimétricos a decimétrico. Sin embargo, el espesor de los depósitos varía para cada quebrada.
- **Depósito de lahar “b”.** Estos depósitos de lahares, se caracterizan por ser masivos y compactos, compuesta por una matriz limosa de color marrón y con fragmentos líticos de forma sub angulosa a sub redondeada con tamaños centimétricos a decimétrico. Los fragmentos líticos son lavas de composición andesítica porfirítica.

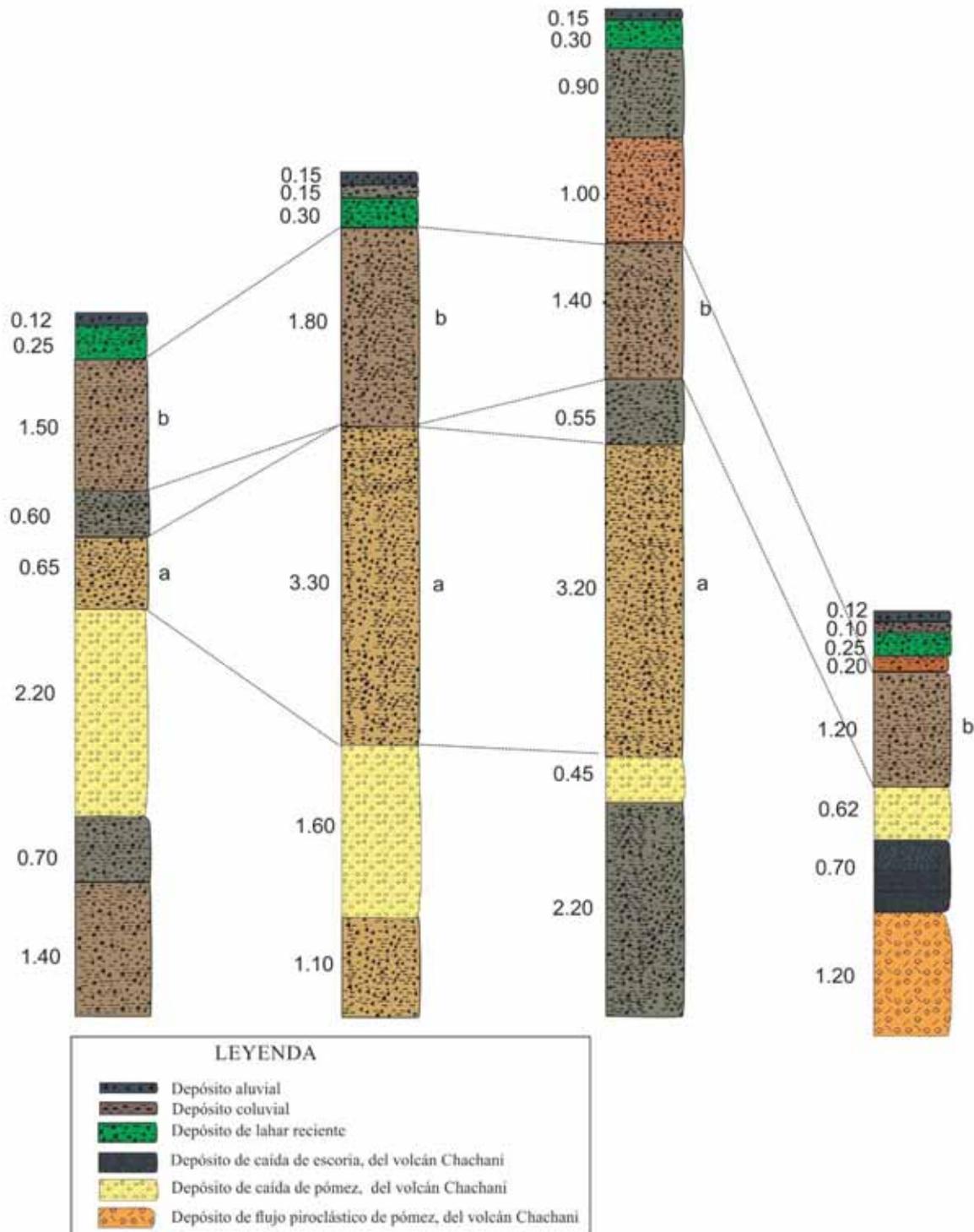
**CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA DE LOS DEPÓSITOS DE LAHARES DEL SECTOR SURESTE DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CHACHANI**

Quebrada Pastoraiz  
229454 m E; 8194567 m S

Quebrada Quesquemania  
229053 m E; 8195657 m S

Quebrada Gamarra  
227754 m E; 8193658 m S

Quebrada Chullo  
227039 m E; 8190985 m S



**Figura 7.2.** Correlación estratigráfica de los depósitos de lahares del sector sureste del complejo volcánica Chachani. Fuente: Elaboración propia.

EDAD	SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA	DESCRIPCIÓN
Siglo XVI		<p><b>Depósito aluvial</b> <b>Depósito coluvial</b></p> <p><b>Depósito de lahar reciente.</b> Este depósito es masivo y friable, presenta una matriz arena-limosa, con fragmentos líticos compuestos por andesitas y dacitas porfíricas y residuos sólidos causados por la actividad humana (botellas, plásticos, etc).</p>
33.7 ka		<p><b>Depósito de lahar</b> masivo y compacto, posee una matriz limosa, con fragmentos líticos lávicos compuestos por andesitas y dacitas porfíricas de color gris oscuro y claro.</p> <p><b>Fibroso II,</b> este depósito se encuentra generalmente retrabajado presentando un aspecto amarillento.</p> <p><b>Sacarosa,</b> presenta una granulometría bien gradada, sus pómez son de color blanquecina.</p>
56.5 ka		<p><b>Depósito de lahar,</b> masivo y compacto, presenta un matriz limosa de color gris, con fragmentos líticos de forma sub angulosa a sub redondeada. Estos fragmentos están compuestos por andesitas y dacitas porfíricas.</p> <p><b>Depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas del domo Cabrerías,</b> este depósito posee una matriz arena-limosa. Los bloques están compuestas por andesitas porfíricas de forma sub angulosa a sub redondeada, de tamaños centimétricos a decimétricos.</p>
1.65 Ma		<p><b>Depósito de lahar</b> masivo y compacto, compuesta por una matriz limo-arcilloso de color gris, con fragmentos líticos monolíticos, compuestas por andesitas y dacitas porfíricas, de forma sub angulosa a sub redondeada, con tamaños centimétricos a decimétricos</p> <p><b>Depósito de lahar</b> masivo y compacto, compuesta por una matriz limo-arcillosa de color pardo claro, con fragmentos líticos lávicos, compuesto por andesitas y dacitas porfíricas, de color gris oscuro, de forma sub angulosa a sub redondeada, con tamaños centimétricos a decimétricos.</p> <p><b>Depósito de caída de pómez del Complejo Volcánico Chachani,</b> de color blanquecino a amarillento claro.</p> <p><b>Depósito de lahar</b> masivo y compacto on una matriz limosa de color pardo, Este depósito está constituido por fragmentos líticos lávicos, compuesto por andesitas y dacitas porfíricas de color gris oscuro y claro.</p> <p><b>Depósito de lahar</b> masivo y muy compacto, con una matriz limo-arcillosa, de color gris oscuro. Está constituido por fragmentos líticos polilíticos, compuestos por fragmentos de lava andesíticas, porfíricas y afaníticas de color gris oscuro y rojizo, con tamaños centimétricos, pómez oxidados de color amarillo y escorias de color rojizo, negro y grises.</p> <p><b>Secuencia de caída de escorias del Complejo Volcánico Chachani.</b> Las escorias son de color negro y gris oscuro, con presencia de líticos lávicos de 15%, de forma sub anguloso, con tamaños menores a 3 cm de diámetro. Estas escorias presentan tamaños menores a 5 cm.</p> <p><b>Depósito de caída de pómez del Complejo Volcánico Chachani.</b> Las pómez son de color amarillento a anaranjado.</p> <p><b>Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa "unidad rosada".</b> Esta unidad es poco consolidada, compuesta por pómez vesiculados, líticos sub anguloso rojizos y cristales de plagioclasa, biotita y rara vez contiene cuarzo y sanidina.</p>

Figura 7.3 Columna estratigráfica generalizada en base a los trabajos de campo mostrando la estratigrafía de los lahares. Fuente: Elaboración propia.

### 7.3 Volumen de los lahares del Sur del Perú

En el sur del Perú, se tiene pocas estimaciones de volúmenes de lahares. Actualmente, solo se tiene mapas de peligro por lahares de los volcanes Misti, Sabancaya y Sara Sara. Estos mapas se han construido a partir de los siguientes volúmenes:

- Para los lahares del volcán Misti, Vargas et al., (2010) estimaron un volumen máximo de lahar de 0.5 millones de  $m^3$  y un volumen mínimo de 0.01 millones de  $m^3$ , para precipitaciones intensas y volúmenes máximos de lahares del orden de 1.5 a 4 millones de  $m^3$ , son frecuentes y ocurren cada 300 a 1000 años. Estos volúmenes son estimados a partir del estudio de los depósitos de lahares del Holoceno,

Harpel et al. (2011), estimaron un volumen mínimo de 0.1 millones  $m^3$ , y un volumen máximo de 3 millones  $m^3$  para precipitaciones moderadas y por la presencia del casquete glaciar, y volumen de 10 millones  $m^3$  es posible en el río Chili durante las precipitaciones intensas con una erupción explosiva. Estos volúmenes son estimados a partir de los depósitos de lahares del holoceno.

- Para los lahares del Complejo Volcánico Sabancaya, Bellot, 2011, estimó cuatro volúmenes de 1, 5, 10 y 20 millones de  $m^3$ . Rivera, et al 2016, en el estudio de peligro por ocurrencia de lahares en el Complejo Volcánico Sabancaya, consideraron los volúmenes de 5, 10 y 20 millones de  $m^3$ , el volumen de 5 millones de  $m^3$ , tomaron para los lahares de poco volumen y que son más frecuentes en las temporadas de lluvia, este volumen está asociada a erupciones de baja a moderada magnitud (IEV 1-2), y los volúmenes de 10 y 20 millones de  $m^3$ , para los lahares de importante volumen y que son menos frecuentes, estos volúmenes están asociadas a erupciones de gran magnitud (IEV $\geq$ 3).
- Para los lahares del complejo volcánico Sara Sara (Ayacucho), Soncco (2016), estimó un volumen máximo de 18 M  $m^3$  y un volumen mínimo de 1.5 M  $m^3$ , para precipitaciones intensas. Para los cálculos de volumen del volcán Sara Sara los datos fueron obtenidos de las estaciones meteorológicas de SENAMHI.

#### a) Estimación del volumen de lahar para el sur del Complejo Volcánico Chachani

En el sur del Complejo Volcánico Chachani en base a los datos del cartografiado geológico se estimaron tres volúmenes: un volumen mínimo de 2 millones de  $m^3$  para un peligro alto, un volumen moderado de 5 millones de  $m^3$ , para un peligro moderado y un volumen alto de 9 millones de  $m^3$ , para un peligro bajo.

El volumen mínimo de 2 millones de m<sup>3</sup>, fue estimado a partir de los datos de SENAMHI, 2019 de la estación Pampa de Arrieros, con una precipitación máxima de 201 mm/mes, ocurrida en el mes de enero del 2017. Para este volumen la ocurrencia de lahares se presenta cada año, afectando a varias familias, vías de comunicación y áreas de cultivo, ubicadas en las riveras de las quebradas.

El volumen moderado de 5 millones de m<sup>3</sup>, fue obtenido a partir de los datos del Complejo Volcánico Sabancaya (Perú). Este Complejo presenta precipitaciones intensas en los meses de enero, febrero y marzo, además en las quebradas que descienden de este complejo se observan depósitos piroclásticos y volcanoclásticos no consolidadas. Estas características del Complejo Volcánico Sabancaya se observan en las quebradas que descienden del Complejo Volcánico Chachani. Por ende el área de estudio, se utilizó el volumen de 5 millones de m<sup>3</sup> para una erupción moderada a baja y por la presencia de las precipitaciones intensas.

El volumen máximo de 9 millones de m<sup>3</sup> fue obtenido a partir de los datos del complejo volcánico Pichincha (Ecuador), ya que en el sur CVC, la población se encuentra asentada sobre los depósitos de lahares antiguos como es el caso de la ciudad de Quito que se encuentra sobre depósitos de lahares del complejo volcánico Pichincha. Cabe señalar que los depósitos de lahares antiguos del sur del CVC, se produjo por intensas precipitaciones pluviales y por una desglaciación del casquete glaciar durante una erupción explosiva del CVC.

Los resultados obtenidos del volumen mínimo del Complejo Volcánico Chachani para un escenario de alto peligro (CVC), se aproximan a los volúmenes obtenidos por Harpel et al., (2011), Soncco, 2016 y Bellot 2011.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

1. En base al cartografiado geológico de los depósitos de lahares del sur del Complejo Volcánico Chachani, se han identificado secuencia de depósitos volcanoclásticos, secuencia de depósitos piroclásticos, depósitos de flujo piroclástico de bloques y cenizas del domo Potrero y Cabrerías, depósitos de caídas del volcán Misti y depósitos de lahares recientes, los cuales son detallados a continuación.
  - Secuencias piroclásticas. Estos depósitos afloran en las quebradas Pastoraíz, Chullo, Honda y Los Andenes. En las quebradas Honda y Los Andenes, estos depósitos sobreyacen a la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (unidad rosada), datada en  $1.65 \pm 0.04$  Ma por Paquereau et al. (2006), por lo cual se infiere que serían del pleistoceno y posteriores a estas ignimbritas. Estas secuencias se caracterizan por estar compuesta por depósitos de caída de lapilli de pómez y escorias del volcán Chachani, con espesores de 5cm a 1m.
  - Secuencias volcanoclásticas. Estas secuencias afloran en todas las quebradas que surcan el sector sur del complejo volcánico Chachani. En las quebradas Honda y Los Andenes estos depósitos afloran sobre los depósitos piroclásticos. Estas secuencias se caracterizan por estar compuestas por depósitos de lahares, con espesores que oscilan entre 50 cm a 2 m.
  - Depósitos de flujo piroclástico de bloques y cenizas del domo Potrero. Estos depósitos afloran al sur de los domos Potreros, en las quebradas Municipal, Virgen de Socorro y Los Andenes.
  - Depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas del domo Cabrerías. Estos depósitos afloran en las quebradas Pastoraiz, Quesquemania y Gamarra; el cual fue datado en  $56 \pm 31.6$  ka (Aguilar, 2015).
  - Depósito de caída de lapilli de pómez del volcán Misti. Este depósito aflora en las quebradas Estanquillo y Añashuayco; el cual fue datado en  $33.7 \pm 250$  ka (Cuno, 2018).
  - Depósitos de lahares recientes, afloran en todas las quebradas que surcan el sur del complejo volcánico Chachani, con espesores de hasta 2 m; las cuales se caracterizan por estar compuestos por una matriz friable que engloban fragmentos antropogénicos (botellas, plásticos, etc.). En la zona de depositación la población se encuentra asentada sobre este depósito e incluso llegan a rellenar las quebradas, con material de escombros como es

el caso del sector Cerro Colorado. El depósito de lahar reciente, por el contenido de materiales antropogénicos, se infiere que serían desde el siglo XIX hasta la actualidad.

2. Según el análisis de campo y gabinete se han calculado tres volúmenes. Los lahares de poco volumen de 2 millones de  $m^3$ , se generan por precipitaciones intensas (enero, febrero y marzo) de 206.1 mm SENAMHI, este fenómeno ocurre cada año, lahares de moderado volumen de 5 millones de  $m^3$ , se generarían por intensas precipitaciones (enero, febrero y marzo) y por una posible erupción de moderada a baja y un lahar de máximo volumen de 9 millones de  $m^3$ , se generaría con las precipitaciones intensas durante una erupción explosiva del CVC.
3. Se realizaron simulaciones matemáticas con el programa LAHARZ para peligros por flujos de lahares en el sur del complejo volcánico Chachani, para volúmenes de 2 M  $m^3$ , 5 M  $m^3$  y 9 M  $m^3$ . Estos volúmenes generan zonas de alto, moderado y bajo peligro. A continuación, se describen cada uno de los peligros:
  - **Zona de alto peligro:** Es afectada por lahares de bajo volumen de 2 millones de  $m^3$ , asociadas a la ocurrencia de precipitaciones intensas. Las zonas afectadas son los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura y Yanahuara; las cuales corresponden 28 Asentamientos Humanos y Urbanizaciones, 42 Instituciones Educativas y 2 Puestos de Salud. La probabilidad de ocurrencia de este peligro es muy alta; ya que las precipitaciones intensas ocurren cada año.
  - **Zona de moderado peligro:** Puede ser afectada por lahares de hasta 5 millones  $m^3$ . Los sectores afectados serían los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura, Yanahuara y Sachaca; las cuales corresponden a 36 Asentamientos Humanos y Urbanizaciones y 98 Instituciones Educativas. La probabilidad de ocurrencia de este peligro es moderada a baja.
  - **Zona de bajo peligro:** Puede ser afectada por lahares de hasta 9 millones  $m^3$ . Las zonas afectadas son los distritos de Cayma, Cerro Colorado, Yura, Yanahuara, Sachaca, Tiabaya y Uchumayo; las cuales corresponden a 40 Asentamientos Humanos y Urbanizaciones, 136 Instituciones Educativas y 2 Puestos de salud. La probabilidad de ocurrencia de este peligro es baja

## RECOMENDACIONES

1. Adquirir un DEM de mayor resolución en el sector sur del complejo volcánico Chachani, para obtener más precisión en el modelamiento de flujos de lahares.
2. Realizar modelamiento de lahares (flujo de lodo) con otros softwares, como por ejemplo TITAN2D, FLOW-2D, MSF, RAMMAS, HEC-RAS, etc.
3. Poner a disposición el mapa de peligro por ocurrencia de lahares del sur del Complejo Volcánico Chachani, con la finalidad de que las autoridades los utilicen en la prevención y mitigación de riesgo de desastre.
4. Elaborar planes de contingencia y planes de evacuación para lahares o flujos de barro en todos los distritos, que cruzan el sur del complejo volcánico Chachani, con la finalidad de reducir el peligro por lahares.
5. Dinfundir el mapa de peligros de lahares del sur del Complejo Volcánico Chachani entre los pobladores, Instituciones Educativas, Municipios, Comisarías de la PNP, Centros de Salud, Empresas Privadas entre otros.
6. Planificar un desarrollo urbano ordenado para evitar pérdidas humanas y económicas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, R. (2015). Long-lived magmatic systems: the post-caldera Chachani volcanic complex case study (Peru), Master Thesis, Universite Blaise Pascal, 56p.
- Aguilar, R., Vela, J., (2018). Evaluación de peligros en la quebrada Matagente-Charcani. INGEMMET-informe técnico N°A6811.
- Arapa, E., (2018). Análisis de los daños producidos por el flujo de detritos en la quebrada El Chullo en enero 2017, Arequipa, Perú. Hazard and risk mapping-the Arequipa-El Misti case and other threatened cities Presses Universitaires Blaise Pascal, Territoires, Hors Serie N°1,2018, p. 55-60.
- Bellot, N. (2011) - Modelamiento de lahares en los volcanes. Sabancaya y Ubinas (Sur Perú), informe inédito. Arequipa: IRD, INGEMMET, 28 p. (disponible en Ingemmet – DGAR Arequipa).
- Benavides V. (1962). Estratigrafía Pre-terciaria de la Región de Arequipa. En: Congreso Nacional de Geología, 2, Lima 1960. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú (38):5-63
- Benavente, C., Delgado, G., Garcia, B., Aguirre, E., & Audin, L. (2018). Neotectónica, Evolución del Relieve y Peligro Sismico en la Región Arequipa. Lima: INGEMMET Boletín Serie C. Geodinámica e ingeniería Geológica N°64.
- Bardintzeff, J. M., y McBirney, A. R. (2000). Volcanology, 2<sup>nd</sup> edition Jones and Bartlett. 268p.
- Bromley, G., Thouret, J-C., Schimmelpfening I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademaker K., Lopez, S., Aumaitre, G., Bourles, D., Keddadouche, K., 2019. In situ cosmogenic <sup>3</sup>He and <sup>36</sup>Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. Bulletin of Volcanology. 16p.
- Canuti, P., Casagli, N., Catani, F., Falorni, G. (2002). Modeling of the Guagua Pichincha volcano (Ecuador) lahars. Physics and chemistry of the earth. (1587-1598).
- Carlotto et al. (2009). Dominios geotectónicos y metalogénesis del Perú. Sociedad Geológica del Perú. Boletín, N° 103, 1-89.
- Cacya, L., Mariño, J., Rivera, M. y Thouret, J.-C. (2007)- La erupción pliniana “Autopista” del volcán Misti (21,000-11,00 años). Boletín Sociedad Geológica del Perú, (102): 25-42.
- Cuno, J. (2018). Estudio de la erupción pliniana del volcán Misti ocurrida hace 33.7 mil años AP, que emplazó el depósito Sacarosa en la ciudad de Arequipa, Tesis de Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 122.
- Cole, P., Neri, A., Peter, J. (2015). Hazards from Pyroclastic Density Currents. Encyclopedia of volcanoes, 2<sup>nd</sup> edition (945-956).

- Garcia F., Chorowicz J., Legros F. (1997). “La Caldera Chachani, gran centro explosivo Plioceno-Holoceno del sur del Perú, identificación y evolución en imágenes de satélite LANDSAT y radar ERS”. Bol. Soc. Geol. Perú, 1,449-454.
- Gudmundsson, Magnus, T., (2015). Hazards from lahars and Jokulhlaups. Encyclopedia of volcanoes, 2nd edition. 972-984p.
- Griswold, J. P. (2004). Mobility Statistics and Hazard Mapping for non-volcánic flows and rock avalanches. Thesis for the Master of Science in Geology, Portland State University.
- Harpel, C. J., De Silva, S., & Salas, G. (2011). The 2 ka Eruption of Misti Volcano, Southern Peru—The Most Recent Plinian Eruption of Arequipa’s Iconic Volcano. The Geological Society of America, Special Paper 484.
- Hoblitt, R.P.; Walder, J.S.; Driedger, C.L.; Scott, K.M.; Pringle, P.T. & Vallance, J.W. (1995) - Volcano hazards from Mount Rainier, Washington. U.S. Geological Survey, Open File Report 95-273, 10 p
- Iverson, R. M. y Schilling, S. P. (1998). Objective delineation of Lahar-inundation hard zones, Geological Society of America Bulletin, V. 110, No. 8, 972-984p.
- Jenks, W. (1948). Geología de la hoja de Arequipa. Instituto Geológico del Perú. Boletín N°9, Lima.
- Jones, G., Rymer, H. (2015). Hazards of volcanic Gases. Encyclopedia of volcanoes, 2<sup>nd</sup> edition (987-992).
- Kilburn, C. (2015). Lava flow hazards and modeling. Encyclopedia of volcanoes, 2<sup>nd</sup> edition (957-969).
- Mac Donald (1972). Volcanoes. A discussion of volcanoes, volcanic products, and volcanic phenomena, New Jersey 510 p.
- Malin, M. C. y Sheridan, M. F. (1982). Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. Science, 217 (4560):637-640.
- Mamani, M., Wörner, G. & Sempere, T. (2009). Geochemical variation in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. Geological Society of America Bulletin, 122(1-2): 162-182.
- Manville, V., Major J. y Fagents, S. (2013). Modeling lahar behavior and hazards. Modeling Volcanic Processes: the physics and Mathematics of Volcanism. Cambridge University Press-2013 (301-319).
- Mariño, J., Valdivia, D., Soncco, Y., Miranda, R., Machaca, R., (2016). Lahares emplazados en el valle de Ubinas en febrero del 2016: Geología, impacto, modelamiento y evaluación de peligros. INGEMMET-Informe técnico A6745.
- Muñoz, (2007). Los Lahares de Popocatepetl: Obtención y Tratamiento de la información para la prevención de riesgos. Tesis Doctoral, Unibersidad Computacional de

Madrid Facultad de Geografía e Historia Departamento de Analisis Geográfico Regional y Geografía Física.

- Núñez, H., Peñalva, J., (2018). Evaluación de la vulnerabilidad y gestión de riesgo de desastre en el Cono Norte (Piedemonte de Chachani) de la ciudad de Arequipa. Hazard and risk mapping-the Arequipa-El Misti case and other threatened cities Presses Universitaires Blaise Pascal, Territoires, Hors Serie N°1, 2018, p. 49-54.
- Ortiz, R., Marreno, J. M., (2004) Riesgo volcánico, edita Dirección General de protección civil y emergencias, España. 103pp.
- Paquereau-Lebti, P., Thouret J.-C.; Wörner, G. y Fornari, M. (2006) Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, Southern Peru: Stratigraphical and petrological correlations. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 154(3-4): 251–275
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J. C., & Borrero, C. A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 17-66 p.
- Rivera, M., Mariño, J., Samaniego, P., Delgado R., Manrique, N., (2016). Geología y evaluación de Peligro del Complejo Volcánico Ampato Sabancaya (Arequipa). INGEMMET-Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N°61. 113p. (108-109).
- Rymer H., (2015). Volcanic Hazards. Encyclopedia of volcanoes 2<sup>nda</sup> Editor Haraldur Sigurdsson 1417 pp. (895). Academic Press.
- Schilling, S. (1998). LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar inundation hazard zones. Report, 98-638 p.USGS.
- Soncco, Y. (2017), “Evaluación de peligros volcánicos del volcán Sara Sara”, Sin publicar, Tesis de Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 120 p.
- Suaña, E., (2012). Evolución tefroestratigrafica, petrológica y geoquímica del complejo volcánico Chachani, Arequipa. Tesis de Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional De San Agustín, Arequipa, 302p.
- Tarbuck, E. y Lutgens, F., 2001, Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física [6<sup>a</sup> ed.].- 540 págs. Prentice Hall, Madrid España.
- Tilling, R.I., ed. (1993) - Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos, Santa Fé, Nuevo México, 2-3 julio 1989: Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos, 125p.
- Vallance, J. (2000). Lahars. Encyclopedia of volcanoes Editor en jefe: Haraldur Sigurdsson 1417 pp. Academic Press.

- Vallance, J. W., Iverson, R. M. (2015). Lahars and Their Deposits. Encyclopedia of volcanoes, 649-664 p.
- Van, B., Davies, T. (2015). Debris Avalanches, and Volcanic Gravitational Deformation. Encyclopedia of volcanoes, 2nd edition. (665-684).
- Vargas, F., Thouret, J. C., Delaite, G., Westen, C., Sheridan, M.F., Siebe, C., Mariño, J., Souriot, T., Stinton, A. (2010). Mapping and assessing volcanic and flood hazards and risks, with emphasis on lahars, in Arequipa, Peru. The Geological Society of America Special Paper. (265-281).
- Vela, J., Cuno, J. (2017), Peligros geológicos en la asociación de vivienda los Jazmines de Cayma, INGEMMET, informe técnico N°A6786, geología, impacto, modelamiento y evaluación de peligro.
- Walker G.P.L. (1971) - Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. The Journal of Geology, 79(6): 696-714.
- Zech, R., Smith J. y Kaplan M.R. (2009)-Chronologies of the Last Glacial Maximum and its termination in the Andes (10-55°S) based on surface exposure dating. En: Vimex, F.; Sylvestre, F.& Khodri, M., eds. Past climate variability in South America and surrounding regions: from the Last Glacial Maximum to the Holocene. Berlin: Springer, Developments in Paleoenvironmental Research 14, p.61-87.

## LISTADO DE FIGURAS Y FOTOGRAFÍAS

- Figura 1.1.** Mapa de ubicación del área de estudio, el cual abarca los distritos de Cayma, Cerro Colorado y Yura. Fuente: Elaboración propia.
- Fotografía 1.2.** Vista del volcán Misti, tomada desde el sector de Yura.
- Fotografía 1.3.** Conos de escoria del valle Andahua. Tomada DePeru.com
- Fotografía 1.4.** Volcán Kilauea en Hawai. Fotografía tomada por María Ortiz, 2018.
- Figura 1.5.** Diagrama donde se muestran los Principales peligros volcánicos. Fuente: Tomado de Myers et al., 2000.
- Fotografía 1.6.** La ciudad de Armero, 1985. (Fotografía tomado de J. Janda, USGS).
- Fotografía: 1.7.** Lahares que se produjieron en la variante Uchumayo, 2017. (Arequipa).
- Fotografía: 1.8.** Vistas de la quebrada Añashuayco, en febrero 2018. a) Vista de los lahares que afectaron las vías de comunicación en la quebrada Añashuayco – distrito de Cerro Colorado, b), Vista del caudal del lahar cerca de las Canteras de Añashuayco- distrito Cerro Colorado.
- Fotografía 1.9.** Depósito de flujo de escombros.
- Fotografía 1.10.** Depósito de flujo hiperconcentrado.
- Figura 1. 11.** Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas (SENAMHI, 2019)
- Figura 2.1.** Mapa geomorfológico del sector sur del Complejo Volcánico Chachani. Fuente: Elaboración propia.
- Fotografía 2.2.** Circo glaciar al sur del estratovolcán El Estribo.
- Fotografía 2.3.** Cobertura glaciar del volcán Chachani.
- Fotografía 2.4.** Cráter de los domos Potrero. Fuente: Google Earth.
- Fotografía 2.5.** Estratovolcanes Estribo y Chachani del Complejo Volcánico Chachani.
- Fotografía 2.6.** Flujos de lava ubicada en el distrito de Yura, los cuales se encuentra en la base del domo Potrero.
- Fotografía 2.7.** Domo La Horqueta y Cabrerías.
- Fotografía 2.8.** Superficie volcanoclástica, que afloran en el flanco sur del Complejo Volcánico Chachani (Yura).
- Fotografía 2.9.** Ladera de acumulación, en el flanco sureste del Complejo Volcánico Chachani.
- Fotografía 2.10.** Planicie ignimbrita visible en el sector sur del Complejo Volcánico Chachani.
- Fotografía 2.11.** Abanico aluvial que aflora en la base de los domos Potrero.
- Fotografía 2.12.** Vista del cañón del río Chili el cual atraviesa por medio de los volcanes Chachani y Misti.
- Fotografía 2.13.** Llanura de inundación en el sector del puente Chilina.
- Fotografía 2.14.** La planicie aluvial aflora en el sector sureste del Complejo Volcánico Chachani.
- Figura 3.1.** Mapa estructural del Complejo Volcánico Chachani, tomado de Aguilar, 2015; Benavente et al. 2018
- Fotografía 3.2.** Movimiento de tipo normal asociado a la reactivación de la falla Aguada Blanca, en el sector de la represa Aguada Blanca (Benavente et al. 2018).
- Fotografía 3.3.** Falla normal con desplazamiento de 2 m, en el flanco oeste del volcán Chachani. (Benavente et al. 2018).
- Fotografía 3.4.** Falla normal que afecta las diatomitas del paleogeno en el sector cerro Alto Jesús-la Calera, ubicado al norte de Chiguata (Benavente et al. 2018).
- Figura 3.5.** Mapa geológico del Complejo Volcanico Chachani. Tomado de Paquereau-Lebti et al., 2006; Aguilar, 2015 e INGEMMET, 2018.
- Fotografía 3.6** Ignimbrita del Río Chili, visible en el cañón del Río Chili.
- Fotografía 3.7** Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa, visible en la quebrada Añashuayco.
- Figura 3.8.** Mapa geológico del complejo volcanico Chachani tomado de Aguilar, 201.
- Fotografía 3.9.** Flujos de lava andesíticos del Chachani Basal, visible en el sector suroeste del domo Potrero (Yura).
- Fotografía 3.10.** Estratovolcán Chingana, el cual presenta lavas hidrotermalizadas.
- Fotografía 3.11.** Estratovolcán Estribo.
- Fotografía 3.12.** Estratovolcán El Ángel, emplazado entre el domo Volcancillo y el estratovolcán Chachani.
- Fotografía 3.13.** Estratovolcán Nocarane, el cual se encuentra hidrotermalizado.
- Fotografía 3.14.** Unidad media y superior, en el sector noroeste del estratovolcán El Rodado.
- Fotografía 3.15.** Unidad superior, al noroeste del Domo La Horqueta.

**Fotografía 3.16.** Domos Potrero, al sur del complejo volcánico Chachani.

**Fotografía 3.17.** Estratovolcán Chachani (unidad inferior, medio y superior).

**Fotografía 3.18.** Domo Cabrería, ubicado al norte del distrito de Cayma.

**Fotografía 3.19.** Domo Volcancillo, emplazado en el sector NW del estratovolcán El Ángel.

**Fotografía 3.20.** Depósito aluvial, en la quebrada Estanquillo.

**Fotografía 4.1.** Secuencia de caída de escorias y pómez, con espesores de 10 -15 cm, visibles en la quebrada Honda, a 16 km al suroeste del volcán Chachani.

**Figura 4.2.** Secuencia de caída de escorias y pómez, con espesores de 8-12 cm, visible en la quebrada Los Andenes, a 17 km al suroeste del volcán Chachani.

**Figura 4.3.** Mapa geológico del sur del complejo volcánico Chachani. Fuente: Elaboración propia.

**Fotografía 4.4.** Secuencia de depósito de lahar visibles en la quebrada Los Andenes, a 18 km al suroeste del volcán Chachani.

**Fotografía 4.5.** Secuencia de depósito de lahar, visibles en la quebrada Honda, a 17 km al suroeste del volcán Chachani.

**Fotografía 4.6.** Depósito de flujo de bloques y cenizas del domo Potrero, visible en la quebrada Virgen de Socorro a 16 km al suroeste del volcán Chachani.

**Fotografía 4.7.** Depósito de flujo de bloques y cenizas visible en la quebrada Municipal a 14 km al suroeste del volcán Chachani.

**Fotografía 4.8.** Depósito de flujo piroclástico de pómez, visible en la quebrada Pastoraíz, a 13 km al sur del volcán Chachani.

**Fotografía 4.9.** Depósito de flujo piroclástico de pómez, visible en la quebrada Chullo, a 18 km al sur del volcán Chachani.

**Fotografía 4.10.** Secuencia de depósito de caída de lapilli de pómez y de escoria, en la quebrada Pastoraíz, a 13 km del volcán Chachani.

**Fotografía 4.11.** Secuencia volcanoclástica, visible en la quebrada Pastoraíz, a 10 km al sur del volcán Chachani.

**Fotografía 4.12.** Depósito de flujo piroclástico de bloques y cenizas del domo Cabrerías visible en la quebrada Gamarra, a 12 km al sur del volcán Chachani.

**Fotografía 4.13.** Secuencia de caída de lapilli de pómez visible en la quebrada Estanquillo, a 18 km al SW del volcán Misti.

**Fotografía 4.14.** Secuencia volcanoclástica visible en la quebrada Estanquillo, visible a 19 km al suroeste del volcán Misti.

**Fotografía 4.15.** Vista de la loza deportiva sobre el depósito de lahar reciente, visible en la quebrada Pastoraíz. Ubicado en el Sector 9 Dean Valdivia, distrito de Cayma.

**Figura 4.16.** Ubicación de las quebradas del sur del Complejo Volcánico Chachani.

**Fotografía 4.17.** Depósito de lahar reciente, sobre el cual, se observa la población asentada. Visible en la quebrada Pastoraiz.

**Figura 4.18.** Columna estratigráfica, de la quebrada Pastoraiz, en la zona de transporte. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.19.** Perfiles estratigráficos: A-A', B-B' y C-C', de la quebrada Pastoraíz: Fuente: Elaboración propia.

**Fotografía 4.20.** Depósito de lahar reciente de 35 cm, visible en la quebrada Quesquermania, en la zona de transporte.

**Figura 4.21.** Columna estratigráfica de la quebrada Quesquermania en la zona de transporte. Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.22 .** Perfiles estratigráficos: D-D', E-E' y F-F', de la quebrada Quesquermania. Fuente: Elaboración propia.

**Fotografía 4.23.** Depósito de lahar reciente, de 30 cm de espesor. en la zona de transporte. Visible en la quebrada Gamarra.

**Figura 4.24.** Columna estratigráfica, de la quebrada Gamarra, en la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.25.** Perfil estratigráfico de la quebrada Gamarra. Fuente: Elaboración propia

**Fotografía 4.26.** Depósito de lahar reciente, de 30 cm, en la zona de depositación. Visible en la quebrada Chullo.

**Figura 4.27.** Columna estratigráfico, de la quebrada Chullo, en la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.28.** Perfiles estratigráficos: J-J', K-K' y L-L', de la quebrada Chullo. Fuente: Elaboración propia.

**Fotografía 4.29** Depósito de lahar reciente de 90cm de espesor, en la zona de depositación. Visible en la quebrada Estanquillo.

**Figura 4.30.** Columna estratigráfica de la quebrada Estanquillo, en la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.31.** Perfiles estratigráficos: M-M', N-N' y O-O', de la quebrada Estanquillo. Fuente: Elaboración propia.

**Fotografía 4.32:** Depósito de lahar reciente de 2 m de espesor, en la zona de depositación. Visible en el sector Cantera. Cerro Colorado.

**Figura 4.33.** Columna estratigráfica de la quebrada Añashuayco, en el sector Los Granjeros Unidos. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.34.** Perfiles estratigráficos: P-P', Q-Q' y R-R', de la quebrada Añashuayco. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.35:** Columna estratigráfica, de la quebrada Municipal. En el sector de la Ciudad Municipal. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.36.** Perfiles estratigráficos: S-S' y Y-Y', de la quebrada Municipal. Fuente: Elaboración propia.

**Fotografía 4.37.** Depósito de lahar reciente de 75 cm, en la zona de depositación. Visible en la quebrada Virgen de Socorro.

**Figura 4.38.:** Columna estratigráfica, de la quebrada Virgen de Socorro, en la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.39.** Perfiles estratigráficos: V-V', W-W', X-X', de la quebrada Virgen de Socorro. Fuente: Elaboración propia.

**Fotografía 4.40.** Depósito de lahar reciente de 1.2 m, en la zona de depositación. Visible en la quebrada Apacheta.

**Figura 4.41.** Columna estratigráfica, en la quebrada Apacheta. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.42.** Secciones transversales: Y-Y, Z-Z, AA-AA, de la quebrada Apacheta. Fuente: Elaboración propia.

**Fotografía 4.43.** Depósito de lahar reciente, en la zona de depositación. Visible en la quebrada Honda.

**Figura 4.44.** Columna estratigráfica, de la quebrada Honda, en la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.45.** Perfiles estratigráficos: AB-AB', AC-AC', AD-AD', de la quebrada Honda. Fuente: Elaboración propia.

**Fotografía 4.46.** Depósito de lahar reciente, en la zona de depositación. Visible en la quebrada Los Andenes.

**Figura 4.47.** Columna estratigráfica, de la quebrada Los Andenes, en la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4.48.** Perfiles estratigráficos: AE-AE', AF-AF' y AG-AG', de la quebrada Los Andenes. Fuente: Elaboración propia

**Figura 5.1** Diagrama esquemático que muestra una trayectoria idealizada para un lahar y las relaciones geométricas entre H y L; las cuales describen la extensión de la zona de riesgo proximal, y A y B, que describen la extensión de la zona de riesgo distal de la inundación (Iverson et al., 1998).

**Figura 5.2.** Área de generación de lahar y el punto de inicio de lahar.

**Figura 5.3.** Perfil de la quebrada Pastoraíz, donde se observan las zonas de generación, zona de transporte y la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.4.** Perfil de la quebrada Quesquemania, donde se observan las zonas de generación, zona de transporte y la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.5.** Perfil de la quebrada Gamarra, donde se observan las zonas de generación, zona de transporte y la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.6.** Perfil de la quebrada Estanquillo, donde se observan las zonas de generación, zona de transporte y la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.7.** Perfil de la quebrada Añashuayco, donde se observan las zonas de generación y la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.8.** Perfil de la quebrada Municipal, donde se observan las zonas de generación y la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.9.** Perfil de la quebrada Apacheta, donde se observan las zonas de generación y la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.10.** Perfil de la quebrada Honda, donde se observa las zonas de generación y la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.11.** Perfil de la quebrada Los Andenes, donde se observa las zonas de generación y la zona de depositación. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5.12** Añadiendo en el menú ArcToolbox, el programa LaharZ.

**Figura 5.13** DEM de 12 m de resolución.

**Figura 5.14.** Hidrología del DEM de 12 m de resolución.

**Figura 5.15.** Datos de ingreso para hacer correr el programa LaharZ.

**Figura 5.16** Diagrama que muestra el procesamiento del programa LaharZ.

**Figura 5.17** Diagrama que muestra el procesamiento del programa LaharZ, para un peligro alto.

**Figura 5.18** Diagrama que muestra el procesamiento del programa LaharZ, para un peligro moderado.

**Figura 5.19** Diagrama que muestra el procesamiento del programa LaharZ, para un bajo peligro.

**Figura 5.20** Diagrama esquemático que muestra una trayectoria idealizada para un lahar de alto peligro, moderado peligro y bajo peligro, del sur del complejo volcánico Chachani.

**Fotografía 6.1.** Vista de la población asentada sobre el depósito de lahar reciente, visible en la quebrada Estanquillo. Ubicado en la Asociación La Victoria-Cerro Colorado.

**Fotografía 6.2.** Vista de la vivienda, sobre el depósito de lahar reciente visible en la quebrada Estanquillo. Ubicado en el Asentamiento Humano Villa Las Canteras- Cerro Colorado.

**Fotografía 6.3.** Vista de la población asentada en el cauce principal de la quebrada Municipal, ubicada en el Asentamiento Humano Ciudad de Dios-Cerro Colorado.

**Figura 6.4.** Mapa de peligro de lahares (flujo de lodos) en el sur del complejo volcánico Chachani. Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 7.1** Correlación estratigráfica de los depósitos de lahares del sector suroeste del complejo volcánico Chachani. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7.2.** Correlación estratigráfica de los depósitos de lahares del sector sureste del complejo volcánico Chachani. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7.3** Columna estratigráfica generalizada en base a los trabajos de campo mostrando la estratigrafía de los lahares. Fuente: Elaboración propia.

## LISTADO DE TABLAS

**Tabla 1.1.** Resumen de los principales lahares que cobraron el mayor número de víctimas en el mundo Fuente: Tomado de Gudmundsson, M., 2015.

**Tabla 1.2** Datos de las precipitaciones. SENAMHI, 2019.

**Tabla 1.3.** Población total censada en el censo nacional 2017: XII de Población, VII de vivienda y III de comunidades Indígenas (INEI 2018), en área urbana y rural

**Tabla 1.4.** Material de construcción predominante en las paredes de las viviendas del Censo Nacional 2017: XII de Población, VII de vivienda y III de comunidades Indígenas (INEI 2018).

**Tabla 1.5.** Material predominante en los techos de las viviendas. Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de vivienda y III de comunidades Indígenas (INEI 2018).

**Tabla 1.6.** Tipo de material de construcción predominante en los pisos de las viviendas. Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de vivienda y III de comunidades Indígenas (INEI 2018).

**Tabla 5.1.** Parámetros que se utilizaran para el modelamiento de lahar, con el programa LaharZ.

**Tabla 6.1** Datos de la precipitación del mes de enero del 2017; el cual genero la ocurrencia de lahares en la Variante Uchumayo (SENAMHI, 2017).

**Tabla 6.2** Cuadro de resumen, de los volúmenes de agua estimados, para la generación de lahares del sur del complejo volcánico Chachani. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6.3** Cuadro de resumen, de los volúmenes estimados, para la generación de los lahares. Fuente: Elaboración propia.